

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций (свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77 – 74159 от 02.11.2018).

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Подписной индекс в «Каталоге периодических изданий. Газеты и журналы» ГК «Урал Пресс» – 41891. Физические лица могут оформить подписку в интернет-магазине «Деловая пресса» <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

Журнал «Вестник Воронежского государственного технического университета» включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор В.Р. Петренко, д-р техн. наук – Воронеж

Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов, д-р техн. наук – Воронеж

Ответственный секретарь С.А. Малукова – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

В.Н. Бурков – д-р техн. наук – Москва;
Д.А. Новиков – д-р техн. наук – Москва;
С. Лухан-Мора – проф. – Испания;
А.К. Погодаев – д-р техн. наук – Липецк;
А.Ф. Тузовский – д-р техн. наук – Москва;
С.Л. Подвальный – д-р техн. наук – Воронеж;
В.Л. Бурковский – д-р техн. наук – Воронеж;
В.В. Куц – д-р техн. наук – Курск;
А.Г. Ивахненко – д-р техн. наук – Курск;
В.П. Смоленцев – д-р техн. наук – Воронеж;
С.Г. Бишутин – д-р техн. наук – Брянск;
В.Ф. Селиванов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Н. Кириллов – д-р техн. наук – Воронеж;
О.Ю. Макаров – д-р техн. наук – Воронеж;
В.П. Пашинцев – д-р техн. наук – Ставрополь;
Ю.Г. Пастернак – д-р техн. наук – Воронеж;
А.В. Ашихмин – д-р техн. наук – Воронеж;
П.П. Чураков – д-р техн. наук – Пенза;
А.А. Гладких – д-р техн. наук – Ульяновск;
А.В. Башкиров – д-р техн. наук – Воронеж

Ответственность за подбор и изложение фактов, цитат, статистических данных и прочих сведений несут авторы публикаций. Статьи, поступающие в редакцию, рецензируются. Мнение редакции может не совпадать с мнением авторов материалов. При перепечатке статей ссылка на журнал обязательна.

Адрес редакции: 394026, Воронеж, Московский проспект, дом 14, комн. 212

Телефон: +7 (473) 278-38-89

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

Адрес издателя: 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2023

12+

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

The journal is registered by the Federal service for supervision of communications, information technology, and mass media (registration certificate PI № FS 77 – 74159 02 November 2018)

Founder: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Subscription index in the «Catalog of periodicals. Newspapers and magazines» of the «Ural Press» Group of Companies – 41891. Individuals can subscribe to it in the online store "Business Press" <http://www.ural-press.ru/dlya-fizicheskikh-lits/>

The journal "Bulletin of Voronezh State Technical University" is included into the list of peer-reviewed editions in which the results of dissertations for obtaining degrees of a Full Doctor and PhD are published.

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

Editor-in-Chief V.R. Petrenko, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh
Deputy Editor-in-Chief I.G. Drozdov, Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

Executive secretary S.A. Malyukova – Voronezh

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

V.N. Burkov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
D.A. Novikov – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
Sergio Lujan Mora – Professor – Spain;
A.K. Pogodaev – Dr. Sc. (Tech.) – Lipetsk;
A.F. Tuzovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Moscow;
S.L. Podvalny – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.L. Burkovskiy – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.V. Kuts – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
A.G. Ivakhnenko – Dr. Sc. (Tech.) – Kursk;
V.P. Smolentsev – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
S.G. Bishutin – Dr. Sc. (Tech.) – Bryansk;
V.F. Selivanov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.N. Kirillov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
O.Yu. Makarov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
V.P. Pashintsev – Dr. Sc. (Tech.) – Stavropol;
Yu.G. Pasternak – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
A.V. Ashihmin – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh;
P.P. Churakov – Dr. Sc. (Tech.) – Penza;
A.A. Gladkikh – Dr. Sc. (Tech.) – Ulyanovsk;
A.V. Bashkirov – Dr. Sc. (Tech.) – Voronezh

The authors of publications are responsible for the selection and presentation of facts, quotations, statistics and other information. The articles coming to the editorial office are reviewed. The opinion of the editors may not coincide with the opinion of the authors of the materials. When reprinting articles, the link to the journal is obligatory.

Address: 394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 212

Phone number: +7 (473) 278-38-89

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Publisher: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”

Publisher address: 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© Voronezh State Technical University, 2023

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Моделирование температурного режима привода из материала с эффектом памяти формы В.Н. Зимин, Г.Н. Кувыркин, И.Ю. Савельева, А.О. Шахвердов.....	7
Разработка алгоритмов управления мобильным роботом с компенсацией возмущения А.С. Веркнер, К.О. Горлова, Е.О. Гурьянова.....	16
Проектирование систем управления робототехническими системами посредством CAD-системы Г.В. Петрухнова, В.А. Трубецкой, А.С. Точилин.....	25
Применение модели конвейерной обработки в задачах логистики И.И. Супрунов.....	32
Разработка проблемно-ориентированной системы для решения оптимизационной задачи управления потоком поступающих заявок А.В. Дятчина, С.А. Олейникова, Т.Н. Недикова.....	37
Разработка прототипа программно-аппаратного комплекса синхронно-векторных измерений на базе GPS-синхронизированного аналого-цифрового преобразователя В.А. Казбанов, М.С. Курицкий, А.Н. Алещенко, В.М. Анискевич.....	44
Методы исследования колебаний инструмента ударного устройства при асимметричных нагрузках А.М. Слиденко.....	55
Функционал автоматизированной системы разработки и управления производством твердотельных реле Д.Н. Трубицын, А.В. Коськин.....	64

Радиотехника и связь

Разработка IP-блоков операционных усилителей для отечественного технологического процесса А.В. Русанов, Л.В. Сопина, А.В. Бунина.....	71
Основные проблемные вопросы и современные подходы к противодействию малоразмерным разведывательно-ударным беспилотным летательным аппаратам Д.Г. Пантенков, В.П. Литвиненко, А.Н. Глушков.....	77
Использование МЭМС-коммутаторов для реализации активной планарной антенны Уда-Яги Е.А. Ищенко, С.О. Распопов, А.С. Тупицына, И.А. Черноиваненко, С.М. Фёдоров.....	89
Влияние шума на погрешность измерения частоты по дискретным отсчетам гармонического сигнала методом моментов М.А. Альрубеи, А.Д. Поздняков.....	94
Методика обоснования требований к аналоговой части приемного тракта цифрового радиоприемника Р.И. Буров, А.И. Гревцев, В.И. Зимарин, В.В. Капитанов.....	103
Исследование влияния фильтрующих конденсаторов на рабочие характеристики управляемого метаматериала С.М. Фёдоров.....	111

Методика контроля влияния импульсных помех на железнодорожную систему радиопередачи И.В. Свиридова, Р.Н. Хорошайлов, Д.В. Лялин.....	115
--	------------

Машиностроение и машиноведение

Исследование параметров охлаждающей системы стола устройства для аддитивного формообразования плазменной дугой в среде динамического вакуума В.В. Куц, А.Н. Гречухин, Д.А. Павлов, И.А. Чернышев.....	123
Технология изготовления абразивного инструмента на основе фотополимер-абразивного композита в условиях единичного и мелкосерийного производства Д.А. Голобурдин, А.М. Козлов.....	131

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Study of the temperature condition of an actuator made of a material with a shape memory effect V.N. Zimin, G.N. Kuvyrkin, I.Yu. Savelieva, A.O. Shakhverdov.....	7
Control algorithms development of mobile robot with perturbation compensation A.S. Verkner, K.O. Gorlova, E.O. Guryanova.....	16
Design of control systems for robotic systems by means of a CAD system G.V. Petrukhnova, V.A. Trubetskoy, A.S. Tochilin.....	25
Application of conveyor processing model in logistics problems I.I. Suprunov.....	32
Development of a problem-oriented system for solving optimization task of managing the flow incoming applications A.V. Dyatchina, S.A. Oleinikova, T.N. Nedikova.....	37
Developing a prototype of software-hardware system for synchrophasor measurements based on GPS-disciplined analog-to-digital converter V.A. Kazbanov, M.S. Kuritskiy, A.N. Aleshchenko, V.M. Aniskevich.....	44
Study of impact device tool oscillations under asymmetric loads A.M. Slidenko.....	55
Functionality of the automated system for the development and production control of solid-state relays D.N. Trubitsyn, A.V. Koskin.....	64

Radio engineering and communication

Bandgap reference voltage source for a domestic technological process A.V. Rusanov, L.V. Sopina, A.V. Bunina.....	71
The main problematic issues and modern approaches to countering small-sized reconnaissance and strike unmanned aerial vehicles D.G. Pantenkov, V.P. Litvinenko, A.N. Glushkov.....	77
Using mems switches for realization of active planar antenna Uda-Yagi E.A. Ishchenko, S.O. Raspopov, A.S. Tupitsina, I.A. Chernoiivanenko, S.M. Fedorov.....	89
Influence of noise on the frequency measurement errors from discrete samples of a harmonic signal by the method of moments M.A. Alrubei, A.D. Pozdnyakov.....	94
Technique of the substantiation of demands to the analog part of the digital radioreceiver reception section R.I. Burov, A.I. Grevtsev, V.I. Zimarin, V.V. Kapitanov.....	103
Study of the influence of filter capacitors on the performance of controlled metamaterial S.M. Fedorov.....	111
Method for control of the effect of pulsed interference on a railway radio transmission system I.V. Sviridova, R.N. Horoshaylov, D.V. Lyalin.....	115

Mechanical engineering and science of machines

Research of the parameters of the cooling system of the table of a device for additive shaping by a plasma arc in a dynamic vacuum environment

V.V. Kuts, A.N. Grechuhin, D.A. Pavlov, I.A. Chernyshov..... 123

Technology of abrasive tools manufacturing on the basis of photopolymer-abrasive composite, in conditions of single and small-scale production

D.A. Goloburdin, A.M. Kozlov..... 131

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2023.19.4.001

УДК 004.942:629.7.02

МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМА ПРИВОДА ИЗ МАТЕРИАЛА С ЭФФЕКТОМ ПАМЯТИ ФОРМЫ

В.Н. Зимин, Г.Н. Кувыркин, И.Ю. Савельева, А.О. Шахвердов

Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, г. Москва, Россия

Аннотация: перспективным направлением использования приводов из материалов с эффектом памяти формы является их применение в крупногабаритных трансформируемых космических конструкциях. В настоящее время при создании механизмов, включающих в себя элементы, выполненные из материала с эффектом памяти формы, основную роль играют экспериментальные методы. Управляющим воздействием на активный элемент из материала с эффектом памяти формы может быть только температурное поле. Для правильной реализации процесса раскрытия крупногабаритной трансформируемой конструкции необходимо точное моделирование процесса работы привода. В связи с этим появляется необходимость углублённо исследовать температурный режим активного элемента. Исследования проводились с активным элементом из никелида титана, выполненным в виде проволоки диаметром 1.5мм. В данной работе представлены результаты экспериментальных исследований температурного режима активного элемента, а также расчёт температурного режима в программном комплексе Matlab. Было проведено исследование изменения температуры по длине активного элемента с эффектом памяти формы, а также изменения температуры в поперечном сечении. Полученные результаты позволят составить более точные математические модели работы активного элемента привода для раскрытия крупногабаритных космических конструкций

Ключевые слова: температура, привод, память формы, математическая модель, конечные элементы, раскрытие, космическая конструкция

Благодарности: работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FSN-2023-0012)

Введение

Перспективы развития космической техники в настоящее время тесно связаны с созданием принципиально новых крупногабаритных трансформируемых космических конструкций. Усложнение конструктивных схем и габаритов современных трансформируемых космических систем вследствие повышения их эксплуатационных функциональных возможностей приводит к необходимости совершенствования их массовых характеристик [1-3]. Дальнейшее совершенствование массовых характеристик трансформируемых космических конструкций возможно с использованием материалов с эффектом памяти формы для создания приводов, обеспечивающих управляемое безударное их раскрытие из транспортного состояния в рабочее положение. Эффект памяти формы основан на фазовых превращениях мартенсит-аустенит в материале. Если при температуре выше температуры конца обратных мартенситных превращений материалу придать некоторую ис-

ходную форму, затем, после охлаждения до температуры ниже конца прямых мартенситных превращений, данный материал продеформировать, то при последующем нагреве до температуры выше температуры конца обратных мартенситных превращений данный материал вернётся к своей первоначально заданной форме [4-6]. Восстанавливаемая деформация во многом зависит от химического состава материала. Для данного исследования был выбран эквиаомный никелид титана, так как он имеет один из лучших показателей по проценту восстанавливаемых деформаций, а также имеет удобные для экспериментальных исследований температуры фазовых превращений. Управляющим воздействием для привода из материала с эффектом памяти формы является температурное поле [7-10]. Как правило, при проектировании приводов с эффектом памяти формы, используется большое количество экспериментально полученных данных. Таким образом, одной из главных задач при разработке подобных конструкций является создание модели теплового режима привода из материала с эффектом памяти формы. Моделирование температурного режима работы подобного привода

позволит уменьшить временные и финансовые затраты на проектирование конструкций. Моделирование температурного режима было решено проводить в программном комплексе MATLAB, ввиду наличия встроенного функционала для расчёта нестационарных задач. В данной работе представлены экспериментальные исследования температурного режима активного элемента, а также математическая модель для исследования изменения температуры по длине активного элемента и в его поперечном сечении.

1. Экспериментальные исследования температурного режима

В условиях космического пространства единственным надёжным методом нагрева активного элемента привода раскрытия является пропускание через него электрического тока [11-14]. Однако во время лабораторных испытаний в условиях атмосферы довольно сложно точно определить при какой именно температуре происходит срабатывание активного элемента, так как процесс нагрева электрическим током протекает со значительной скоростью.

Для осуществления контролируемого нагрева, активный элемент помещался в термокамеру (рис. 1). Рабочая зона термокамеры имеет цилиндрическую форму диаметром 50 мм и длиной 200 мм. Для нагрева используется керамический нагреватель, работающий от сети 220 вольт и позволяющий прогревать рабочую зону до 250 градусов Цельсия. Нагрев камеры происходит по всей площади цилиндрической поверхности, торцы заглушаются силиконовыми пробками для уменьшения влияния конвективного теплообмена.

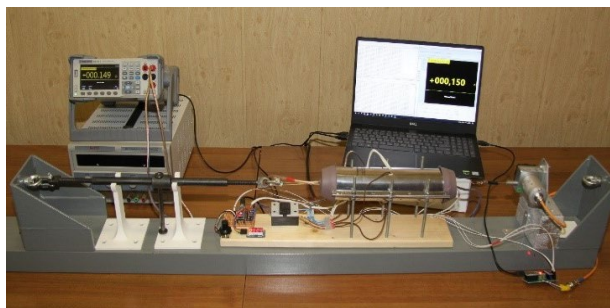


Рис. 1. Экспериментальная установка для нагрева воздухом

Нагрев производился с шагом в 5 градусов, и увеличение температуры производилось только после достижения активным элементом той

же температуры, что и у керамического нагревателя. Из данного эксперимента был получен график изменения длины активного элемента от его температуры, показанный на рис. 2.

На данном графике хорошо видно, что фазовые превращения в активном элементе начинаются при температуре в 130 °C и происходят при этой же температуре с поглощением тепла, что наглядно просматривается на обратном изгибе кривой графика.

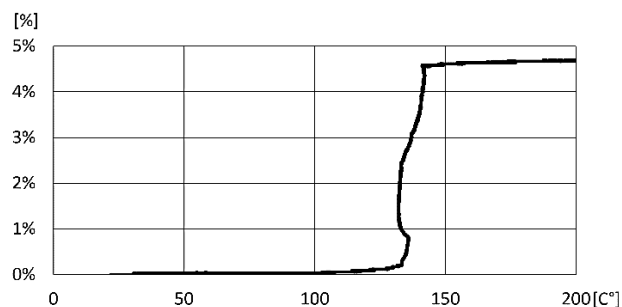


Рис. 2. График изменения длины активного элемента от его температуры

2. Расчёт теплового режима в MATLAB

2.1. Анализ температуры по длине активного элемента

Активный элемент представляет из себя цилиндрическое тело, поэтому удобно будет использовать цилиндрическую систему координат, связанную с активным элементом. Распределение температуры $T(r, \varphi, z, t)$ в активном элементе описывается с помощью уравнения теплопроводности:

$$c\rho \frac{\partial T}{\partial t} - \nabla(\lambda \nabla T) = Q \quad (1)$$

Так как задача нестационарная, то необходимо задать начальное условие: в начальный момент времени температура активного элемента равна температуре окружающей среды T_0

$$t = 0 \rightarrow T(r, \varphi, z, t) = T_0 \quad (2)$$

Граничные условия для данной задачи выглядят следующим образом:

На внешней цилиндрической поверхности активного элемента происходит конвективный теплообмен с окружающей средой

$$\begin{aligned} r = R \rightarrow \lambda \frac{\partial T(r, \varphi, z, t)}{\partial r} = \\ = -\alpha(T(r, \varphi, z, t) - T_0) \end{aligned} \quad (3)$$

На торцах активного элемента происходит конвективный теплообмен с окружающей средой

$$z = 0, L \rightarrow \lambda \frac{\partial T(r, \varphi, z, t)}{\partial z} = -\alpha(T(r, \varphi, z, t) - T_0) \quad (4)$$

Так как задача является осесимметричной, то значение температуры не изменяется по координате φ .

При постановке задачи используются следующие допущения:

а) активный элемент однороден и анизотропен;

б) коэффициент теплопроводности и другие физические характеристики активного элемента не зависят от температуры;

в) деформация объёма, связанная с изменением температуры, не влияет на температурный режим;

г) теплообмен на торцах в местах закрепления можно принять равным теплообмену с окружающей средой ввиду незначительной площади контакта в закреплении;

Расчёт температурного режима производился в программном комплексе MATLAB. Температурный расчёт производился с помощью встроенного решателя дифференциальных уравнений в частных производных «PDE Toolbox». Задача решалась в нестационарной постановке с помощью метода конечных элементов. В табл. 1 представлены параметры и характеристики исследуемого активного элемента из никелида титана.

Таблица 1

Параметры для расчёта

Длина, м	L	0.176
Радиус, м	R	0.00075
Удельная теплоёмкость, Дж/кг * К	c	500
Плотность, кг/м ³	ρ	6450
Удельное электрическое сопротивление, Ом*м	ρ_R	$0.8 * 10^{-6}$
Сила тока, А	I	8.9
Температура окружающей среды, °С	T_0	25
Коэффициент теплоотдачи, Вт/м ² * К	α	50
Коэффициент теплопроводности, Вт/м * К	λ	20
Коэффициент излучения, ед.	ε	0.66
Постоянная Стефана-Больцмана, Вт/м ² * К ⁴	σ	$5.67 * 10^{-8}$

Моделирование начинается с построения геометрической модели рассматриваемого активного элемента. В данном случае он представляет из себя цилиндр длиной 0.176 м и радиусом 0.00075 м. Далее создаётся сетка конечно-элементной модели, которая состоит из тетраэдров с максимальным заданным размером стороны 0.001 м (рис. 3).

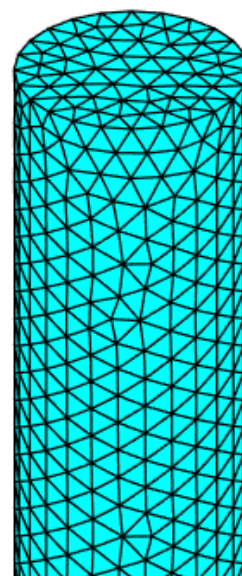


Рис. 3. Конечно-элементная сетка модели активного элемента

Затем необходимо задать тепловые характеристики исследуемого материала: коэффициент теплопроводности, плотность материала и удельную теплоёмкость. На следующем шаге задаём краевые условия. В первой итерации расчёта рассматриваемой задачи будем учитывать только конвективный теплообмен по цилиндрической поверхности, а также теплоотдачу на торцах, учитывающую теплообмен с активного элемента с конструкцией закрепления.

Далее задаём начальную температуру модели и источник нагрева. Так как нагрев осуществляется пропусканием через активный элемент электрического тока, то нагрев в модели задаётся внутренним объёмным тепловым потоком, величина которого рассчитана по закону Джоуля — Ленца:

$$Q_I = \rho_R \frac{L}{\pi R^2} I^2 \quad (5)$$

Полученное в результате расчёта распределение температуры по длине активного элемента показано на рис. 4. Разница между самой низкой температурой на концах проволоки и температурой основной части составляет 8 °С, что меньше 5%.

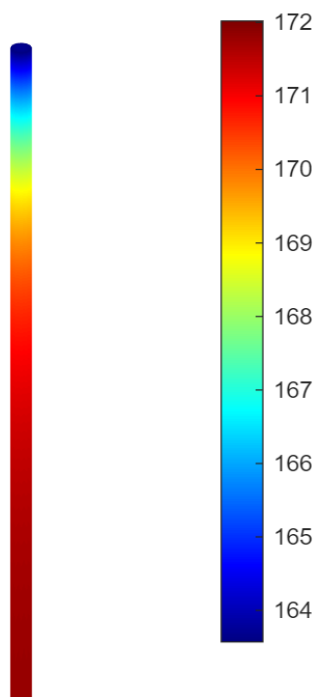


Рис. 4. Температурное поле на одном из концов активного элемента

Также из рис. 5 видно, что часть, в которой наблюдается градиент температуры, занимает малую долю объёма исследуемого активного элемента. Из данного расчёта можно сделать вывод, что при расчёте нагрева активного элемента, у которого длина многократно превышает поперечный размер, его температуру можно с хорошей точностью считать однородной по всей длине.

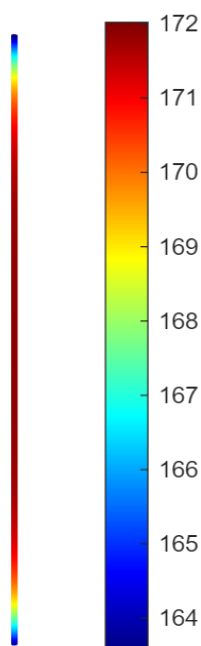


Рис. 5. Температурное поле всего активного элемента

Рассмотрим влияние лучистого теплообмена на поле температур по поверхности всего активного элемента. Для данного расчёта была взята та же конечно-элементная модель, что и в предыдущем расчёте, а в граничное условие (3) был добавлен лучистый теплообмен на цилиндрической поверхности активного элемента.

$$\lambda \frac{\partial T(r, \varphi, z, t)}{\partial r} = -\alpha(T(r, \varphi, z, t) - T_0) - \varepsilon \sigma (T(r, \varphi, z, t)^4 - T_0^4) \quad (6)$$

На рис. 6 показано рассчитанное по новым условиям температурное поле по длине активного элемента. Из данного рисунка видно, что влияние лучистого теплообмена на температурный режим активного элемента довольно значительно. Температура всей поверхности уменьшилась на 19 °С, однако распределение температуры по поверхности осталось таким же, как и в предыдущем расчёте.

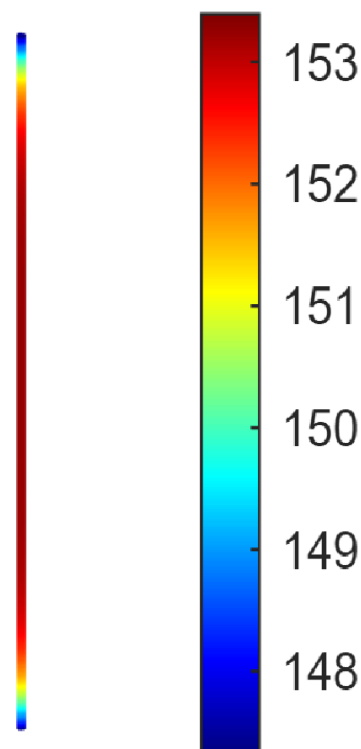


Рис. 6. Температурное поле всего активного элемента с учётом лучистого теплообмена

Исходя из проведённых расчётов, можно сделать вывод о том, что лучистый теплообмен необходимо учитывать при расчёте температуры, однако он не вносит значительных изменений в распределение температуры по длине активного элемента.

2.2. Анализ температуры в поперечном сечении активного элемента

Рассмотрим изменение температуры в поперечном сечении активного элемента. Построение модели проводилось аналогично расчёту, описанному выше. Однако для того чтобы корректно учесть изменение температуры в поперечном сечении проволоки, необходимо значительно уменьшить размер конечно-элементной сетки. В связи с этим чтобы сэкономить вычислительные мощности был рассмотрен только небольшой отрезок активного элемента длиной 0.00176 м. Максимальный заданный размер стороны тетраэдра в данном расчёте был 0.0001 м (рис. 7).

Так как данный расчёт проводился для вырезанной средней части активного элемента, то в расчёте не учитывался теплообмен на торцах, заданный граничным условием (4). Данное допущение применимо, так как, не считая небольшого объёма в районе закреплений, активный элемент имеет одинаковую температуру по своей длине, что было показано в предыдущем расчёте.

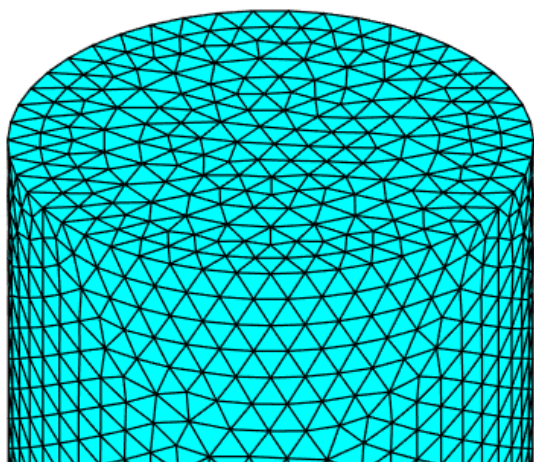


Рис. 7. Конечно-элементная сетка модели активного элемента для расчёта изменения температуры в поперечном сечении

В постановке задачи для данного расчёта уравнение теплопроводности (1), начальное условие (2) и граничное условие (6) а также принятые допущения берутся без изменений. Из полученных результатов, показанных на рис. 8, видно, что разница между температурой на поверхности активного элемента и в середине различается всего на 0.1 °С.

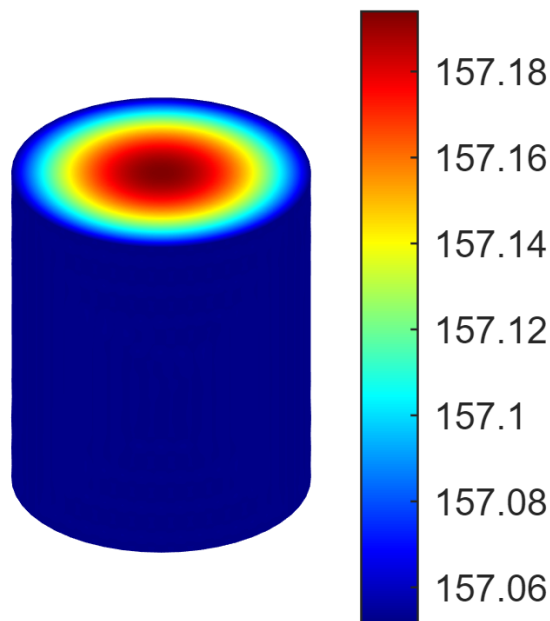


Рис. 8. Температурное поле в поперечном сечении активного элемента

Данный расчёт был проведён с использованием коэффициента теплоотдачи $\alpha = 50 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$. Это значение коэффициента было получено из экспериментальных данных и соответствует условию конвективного теплообмена в лаборатории, где проводятся экспериментальные исследования [15]. Но в испытаниях на макете или же при других испытаниях активного элемента режим теплообмена с окружающей средой может изменяться довольно сильно. Проведём расчёт, с увеличенным в двое коэффициентом теплоотдачи, чтобы проверить гипотезу о том, что при более интенсивном конвективном теплообмене температурный режим в поперечном сечении может значительно отличаться от полученного ранее распределения.

На рис. 9 показано температурное поле в поперечном сечении активного элемента. Разумеется, с увеличением интенсивности конвективного теплообмена значения температуры по всему поперечному сечению изменились в меньшую сторону, однако разница между температурой на поверхности активного элемента и в середине различается также, как и в предыдущем расчёте, всего на 0.1 °С. Исходя из полученных данных, можно сделать вывод о том, что при заданных габаритах активного элемента, а также при всех обозримых условиях конвективного теплообмена температуру в поперечном сечении активного элемента можно считать постоянной.

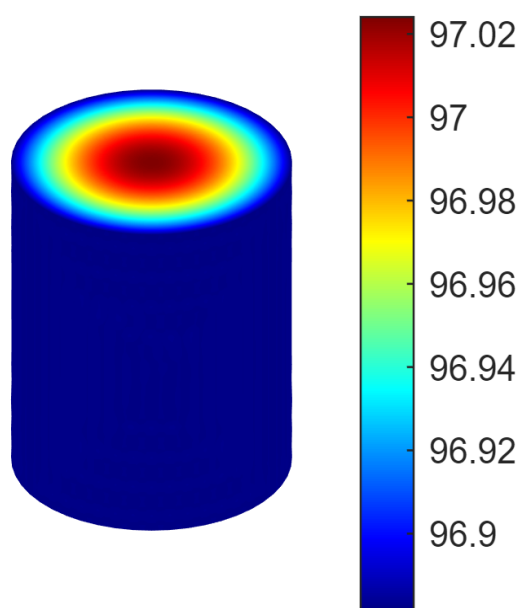


Рис. 9. Температурное поле в поперечном сечении активного элемента с увеличенным конвективным теплообменом

Так как предполагается использование активного элемента данного вида в качестве привода раскрытия крупногабаритной космической конструкции, то необходимо проанализировать как будет изменяться температурный режим в условиях орбиты Земли. Так как в космическом пространстве отсутствует какое-либо значимое влияние окружающей среды, то потери на конвективный теплообмен можно полностью исключить из рассмотрения. В таком случае граничное условие (6) примет вид:

$$\lambda \frac{\partial T(r, \varphi, z, t)}{\partial r} = -\varepsilon \sigma T(r, \varphi, z, t)^4 \quad (7)$$

В постановке задачи для данного расчёта уравнение теплопроводности (1), начальное условие (2) и граничное условие (6) а также принятые допущения берутся без изменений.

На рис. 10 показаны результаты проведённого расчёта температурного режима с теплообменом только за счёт излучения. Из данного рисунка видно, что при той же мощности внутренних источников тепла, температура активного элемента значительно превышает ту температуру, которая достигается в испытаниях в лабораторных условиях. Данная температура превосходит пороговое значение температуры, при котором данный материал может сохранять свои эксплуатационные свойства. Не смотря на то что по закону Стефана-Больцмана мощность излучения пропорциональна 4-й степени температуры тела, даже при такой завышенной

температуре разница между температурой в центре и температурой на поверхности активного элемента остаётся незначительной.

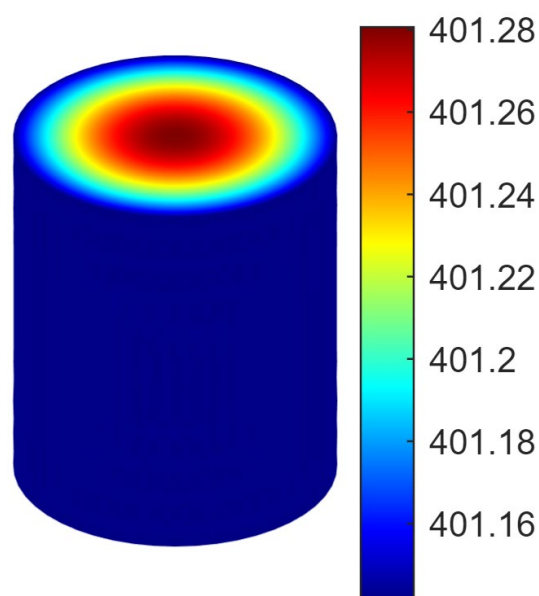


Рис. 10. Температурное поле в поперечном сечении активного элемента с теплообменом только излучением

Значит, в условиях космического пространства активный элемент должен нагреваться с меньшей мощностью, чем при экспериментальной отработке в условиях атмосферы. Мощность внутренних источников тепла зависит от силы тока, протекающего через активный элемент. Проведём расчёт аналогичный предыдущему, но уменьшив данную силу тока с 8.9А до 4А.

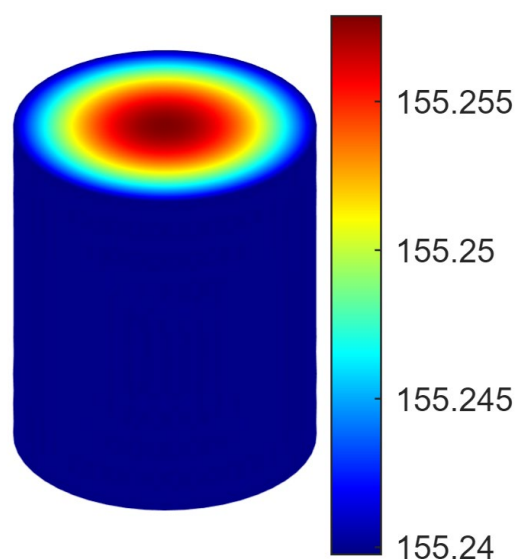


Рис. 11. Температурное поле в поперечном сечении активного элемента с уменьшенной мощностью внутренних источников тепла

На рис. 11 показаны результаты проведённого расчёта температурного режима с уменьшенной мощностью внутренних источников тепла. Данный расчёт показывает, что при умеренном нагреве активного элемента до приемлемых температур во внеатмосферном пространстве, температурный режим в поперечном сечении активного элемента остаётся практически идентичным по всей толщине проволоки.

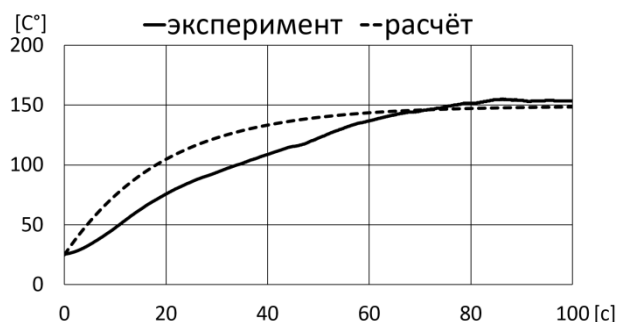


Рис. 12. График изменения температуры активного элемента в эксперименте и при расчёте

На рис. 12 показаны графики изменения температуры активного элемента. Сплошной линией показаны данные полученные экспериментально при нагреве пропусканием через активный элемент электрического тока, а пунктирной линией показаны данные полученные при расчёте по описанной выше математической модели в программном комплексе MATLAB. Как видно из данного рисунка, расчётные данные хорошо совпадают с экспериментальными в области установившейся температуры, однако имеют заметное расхождение в начале нагрева, что объясняется тем, что в модели не учитывается энергия, затраченная на фазовые превращения в материале.

Исходя из проведённых расчётов, можно сделать вывод, что в процессе нагрева температура, замеряемая на поверхности активного элемента, соответствует температуре всего материала. Также данное исследование показало, что при моделировании температурного режима активного элемента можно пренебрегать разницей в скорости нагрева внешнего и внутреннего слоёв проволоки из никелида титана малого диаметра.

Заключение

В работе были проведены расчёты температурного режима при помощи программного комплекса MATLAB. Моделирование производилось с использованием метода конечных элементов. Были рассмотрены температурные

режимы активного элемента по его длине с учётом тепловых потерь на концах. Проведена оценка влияния лучистого теплообмена на температурный режим проволоки из материала с эффектом памяти формы. Также были проведены расчёты температурного режима в поперечном сечении активного элемента. Было рассмотрено влияние интенсивности конвективного теплообмена на температурный режим в поперечном сечении активного элемента. Также был изучен режим нагрева проволоки из материала с эффектом памяти формы в безвоздушном пространстве. Проведённые экспериментальные и теоретические исследования позволяют более точно оценить температурный режим активного элемента привода для раскрытия крупногабаритных трансформируемых космических конструкций. Полученные данные позволят разработать модель нагрева активного элемента, которая необходима для расчёта динамики раскрытия трансформируемой конструкции. Подобные модели целесообразно использовать при разработке перспективных конструкций, так как они существенно уменьшают затраты на отработку и макетирование.

Литература

1. Лопатин А.В., Рутковская М.А. Обзор конструкций современных трансформируемых космических антенн (Часть 1) // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнёва. 2007. № 2. С. 51-57.
2. Prospects of large deployable reflector antennas for a new generation of geostationary Doppler weather radar satellites. / E. Im, M. Thomson, H. Fang, J. Pearson, J. Moore, & J. Lin // AIAA SPACE 2007 Conference & Exposition (p. 9917).
3. Механика больших космических конструкций / Н.В. Баничук, И.И. Карпов, Д.М. Климов и др. М.: Изд-во «Факториал», 1997. 302 с.
4. Zheng F. (2015). Affordable System Conceptual Structure Design of New Deployable Spaceborne Antenna // 33rd AIAA International Communications Satellite Systems Conference and Exhibition (p. 4343).
5. Truss mounting in space by shape memory alloys / V.A. Likhachev, A.I. Razov, A.G. Cherniavsky, Y. Kravchenko, & S.N. Trusov // Proceedings of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, California, USA, 1994, March. Pp. 245-248.
6. Footdale J.N., & Banik J. System Design Study of a Deployable Reflector Antenna with Flexible Shell Segments // 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference, 2016. P. 0698.
7. Привод из материала с эффектом памяти формы для трансформируемых космических конструкций / В.Н. Зимин, А.В. Крылов, В.С. Филиппов, А.О. Шахвердов // Сибирский аэрокосмический журнал. 2022. Т. 23 № 1. С. 73-80.
8. Мишустин И.В. Трёхуровневая модель сплава с памятью формы и её применение к описанию эффекта реверсивной памяти формы // Механика композиционных материалов и конструкций. 2012. Т. 18. № 4. С. 463-474.
9. Schiedeck F., Hemsell T., Wallaschek J. The use of

shape memory alloy wires in actuators // *Solid state Phenomena*. 2006. Vol. 113. Pp. 195-198.

10. Привод из материала с эффектом памяти формы для раскрытия трансформируемой космической конструкции / В.Н. Зимин, А.В. Крылов, Г.Н. Кувыркин, А.О. Шахвердов // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. 2021. № 4. С. 97-102.

11. Optimal design of shape memory alloy wire bundle actuators / De K. J. Laurentis, A. Fisch, J. Nikitzuk, C. Mavroidis // *Proceedings 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. 2002. Vol 3. IEEE, USA, Pp. 2363-2368.

12. Kalra S., Bhattacharya B., & Munjal B.S. Design of shape memory alloy actuated intelligent parabolic antenna for

space applications. *Smart Materials and Structures*. 2017. 26(9), 095015.

13. Development of a mathematical model of a force actuator for the opening of a space structure with transformable configuration / V. Zimin, A.V. Krylov, G.N. Kuvyrkin & A.O. Shakhverdov // *Journal of Physics: Conference Series*, 2022. 2231.

14. Liang C., Rogers C.A. Design of shape memory alloy actuators. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*. 1997. Vol. 8(4). Pp. 303-313.

15. Zimin V.N., Krylov F.V. and Shakhverdov A.O. Development of the mathematical model of the force actuator for deployment of large-sized space structures *Journal of Physics: Conference Series*. 2021. 1902(1). 012115.

Поступила 28.04.2023; принята к публикации 01.08.2023

Информация об авторах

Зимин Владимир Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой СМ-1, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская улица, 5, стр. 1), e-mail: zimin@bmstu.ru

Кувыркин Георгий Николаевич – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой ФН-2, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, Россия, г. Москва, 2-я Бауманская улица, 5, стр. 1), e-mail: gnk1914@mail.ru

Савельева Инга Юрьевна – канд. физ.-мат. наук, доцент, доцент кафедры ФН-2, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, стр. 1), e-mail: inga.savelyeva@bmstu.ru

Шахвердов Артур Олегович – ассистент кафедры СМ-1, Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, (105005, Россия, Москва, 2-я Бауманская улица, 5, стр. 1), e-mail: shah@bmstu.ru

STUDY OF THE TEMPERATURE CONDITION OF AN ACTUATOR MADE OF A MATERIAL WITH A SHAPE MEMORY EFFECT

V.N. Zimin, G.N. Kuvyrkin, I.Yu. Savelieva, A.O. Shakhverdov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Abstract: a promising trend in the use of actuators made of materials with the shape memory effect is their use in large-sized transformable space structures. Currently, when creating mechanisms that include elements made of a material with a shape memory effect, experimental methods play a major role. Only the temperature field can act as a controlling effect on the active element made of a material with a shape memory effect. For the correct implementation of the process of opening a large-sized transformable structure, it is necessary to accurately simulate the operation of the actuator. In this regard, there is a need to study in depth the temperature conditions of the active element. The studies were carried out with an active element made of titanium nickelide, made in the form of a wire with a diameter of 1.5 mm. This paper presents the results of experimental studies of the temperature condition of the active element, as well as the calculation of the temperature condition in the Matlab software package. A study was conducted of temperature changes along the length of the active element with the shape memory effect, as well as temperature changes along its width. The results obtained will make it possible to make more accurate mathematical models of the functioning of the active element of an actuator for opening of large-sized space structures

Key words: temperature, actuator, shape memory effect, mathematical model, finite elements, opening, space structures

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project № FSN-2023-0012)

References

1. Lopatin A.V., Rutkovskaya M.A. "The review of designs of modern transformed space antennas (Part 1)", *The Bulletin of the Siberian State Aerospace University (Vestnik Sibirskogo gosudarstvennogo aerokosmicheskogo universiteta)*, 2007, no. 2, pp. 51-57.
2. Im E., Thomson M., Fang H., Pearson J., Moore J., Lin, J. "Prospects of large deployable reflector antennas for a new generation of geostationary Doppler weather radar satellites", *AIAA SPACE 2007 Conference & Exposition*, p. 9917.
3. Banichuk N.V., Karpov I.I., Klimov D.M. "Mechanics of Large Space Structures" ("Mekhanika bol'shikh kosmicheskikh konstruktsiy"), Moscow: FAKTORIAL, 1997, 302 p.
4. Zheng F. "Affordable System Conceptual Structure Design of New Deployable Spaceborne Antenna", *The 33rd AIAA Inter-*

national Communications Satellite Systems Conference and Exhibition, 2015, p. 4343.

5. Likhachev V.A., Razov A. I., Cherniavsky A.G., Kravchenko Y., Trusov S.N. "Truss mounting in space by shape memory alloys", *proc. of the First International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies*, California, USA, 1994, pp. 245-248.

6. Footdale, J.N., Banik, J. "System Design Study of a Deployable Reflector Antenna with Flexible Shell Segments", *The 3rd AIAA Spacecraft Structures Conference*, 2016, p. 0698.

7. Zimin V.N., Krylov A.V., Filippov V.S., Shakhverdov A.O. "Actuator made of a material with a shape memory effect for transformable space structures", *Siberian Aerospace Journal (Sibirskiy Aerokosmicheskiy Zhurnal)*, 2022, vol. 23, no. 1, pp. 73-80.

8. Mishustin I.V. "Three-level model of shape memory alloy with application to reversing shape memory effect simulation", *Journal on Composite Mechanics and Design (Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruktsiy)*, 2012, vol. 18, no. 4, p. 463-474.

9. Schiedeck F., Hemsell T., Wallaschek J. "The use of shape memory alloy wires in actuators", *Solid State Phenomena*, 2006, vol. 113, pp. 195-198.

10. Zimin V.N., Krylov A.V., Kuvyrkin G.N., Shakhverdov A.O. "Actuator made of material with shape memory effect for development of transformable space structure", *Fundamental and applied problems of engineering and technology (Fundamental'nyye i Prikladnyye Problemy Tekhniki i Tekhnologii)*, 2021, no. 4, pp. 97-102.

11. De Laurentis K. J., Fisch A., Nikitzuk J., Mavroidis C. "Optimal design of shape memory alloy wire bundle actuators", *proc. of IEEE International Conference on Robotics and Automation*, vol 3, IEEE, USA, 2002, pp. 2363-2368.

12. Kalra, S., Bhattacharya, B., Munjal, B.S. "Design of shape memory alloy actuated intelligent parabolic antenna for space applications", *Smart Materials and Structures*, 2017, 26 (9), 095015.

13. Zimin V.N., Krylov A.V., Kuvyrkin G.N., Shakhverdov A.O. "Development of a mathematical model of a force actuator for the opening of a space structure with transformable configuration", *Journal of Physics: Conference Series* 2231 012029 (2022).

14. Liang C., Rogers C.A. "Design of shape memory alloy actuators", *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 1997, vol. 8 (4), pp. 303-313.

15. Zimin V.N., Krylov F.V., Shakhverdov A.O. "Development of the mathematical model of the force actuator for deployment of large-sized space structures", *Journal of Physics: Conference Series* 1902(1), 012115 (2021).

Submitted 28.04.2023; revised 01.08.2023

Information about the authors

Vladimir N. Zimin – Dr. Sc. (Technical), Professor, head of the department «Spacecraft and launch vehicles», Bauman Moscow State Technical University, (5 2-ya Baumanskaya str., srtoeniye 1, Moscow 105005, Russia), e-mail: zimin@bmstu.ru

Georgy N. Kuvyrkin – Dr. Sc. (Technical), Professor, head of the department «Applied Mathematics», Bauman Moscow State Technical University, (5 2-ya Baumanskaya str., srtoeniye 1, Moscow 105005, Russia), e-mail: gnk1914@mail.ru

Inga Yu. Savelieva – Cand. Sc. (Physical and Mathematical), Associate professor of the department «Applied Mathematics», Bauman Moscow State Technical University, (5 2-ya Baumanskaya str., srtoeniye 1, Moscow 105005, Russia), e-mail: inga.savelieva@bmstu.ru

Artur O. Shakhverdov – Assistant of the department «Spacecraft and launch vehicles», Bauman Moscow State Technical University, (5 2-ya Baumanskaya str., srtoeniye 1, Moscow 105005, Russia), e-mail: shah@bmstu.ru

РАЗРАБОТКА АЛГОРИТМОВ УПРАВЛЕНИЯ МОБИЛЬНЫМ РОБОТОМ С КОМПЕНСАЦИЕЙ ВОЗМУЩЕНИЯ

А.С. Веркнер, К.О. Горлова, Е.О. Гурьянова

МИРЭА – Российский технологический университет, г. Москва, Россия

Аннотация: исследуются структурные проблемы, связанные с компенсацией детерминированных возмущений, действующих на мобильного робота. Полученный в работе результат позволяет утверждать, что в сравнении с системами, основанными только на обратной связи, применение упреждения возмущения, каскадного управления во многих случаях имеет преимущество. Описаны математическая и компьютерная модели движения мобильного робота для детерминированных возмущений. Представленная математическая модель, имеющая простую структуру, при этом удобная для решения различных задач управления, может применяться в учебно-методических целях. На основе использования принципа внутренней модели обеспечены условия компенсации возмущения в установившемся режиме. Реализовано упреждение возмущения применительно к данному объекту управления. Произведено аналитическое конструирование каскадного управления. Представлено сравнение исследуемых структур систем управления. Проведен сравнительный анализ и исследована эффективность каждого принципа управления, путем проведения численного моделирования. Представленные алгоритмы управления показали свою эффективность в компенсации возмущения, а также улучшили стабильность и быстродействие системы. Результаты исследований могут быть использованы при разработке и испытаниях систем управления, на которые действуют детерминированные возмущения. В качестве объекта управления рассматривается мобильный робот класса «gobot car kit». Компьютерное моделирование проведено в среде класса MATLAB

Ключевые слова: математическая модель мобильного робота, компьютерная модель мобильного робота, движение мобильного робота в гору, компенсация возмущения, принцип внутренней модели, упреждение возмущения, каскадное управление

Введение

Возмущения являются одними из основных источников ограничений функционирования систем управления. В действительности, приходится всегда учитывать, что на все реальные системы действуют шумы и внешние воздействия, которые оказывают значительное влияние на работу системы. Существуют различные способы и методы решения проблем, связанных с возмущениями.

Нынешнее развитие теории управления и прогресс в вычислительной технике, предъявляет высокие требования к разработчикам систем автоматического управления. Эти требования прежде всего направлены на достижения высокого качества работы системы в условиях неопределенностей.

Большинство методов теории управления созданы для систем, на которые не действуют возмущения, хотя в реальном мире такие системы практически не встречаются. Поэтому возникает потребность в исследовании и совершенствовании известных подходов к управлению, при использовании которых воз-

действия возмущений не скажутся на работе регуляторов и качестве управления.

Актуальность работы связана с тем, что в программе фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 - 2030 годы) запланировано отраслевое сотрудничество между представителями наукоемкой промышленности и учёными в области разработки систем управления. Данная статья представляет исследование различных методов управления мобильным роботом, который подвержен действию возмущения.

Целью авторов является разработка алгоритмов управления с компенсацией возмущения и исследование принципов компенсации возмущения, действующего на динамику мобильного робота. В качестве объекта исследования рассматривается мобильный робот. Предметом исследования являются алгоритмы управления мобильным роботом, на которого действует детерминированное, заранее определенное, возмущение. Методологическую основу могут представлять предложенные в данной работе алгоритмы и практические результаты.

1. Математическая модель движения мобильного робота для детерминированных возмущений

При построении математической модели были приняты следующие допущения:

1. Корпус робота – твердое тело, имеющее продольную плоскость симметрии;
2. Контакт колес с дорогой постоянный и точечный;
3. Колебания корпуса и колес не учитываются;
4. Движение робота прямолинейное и равномерное;

Модель робота (рис. 1) основана на системе уравнений, связывающих входные данные системы (командное напряжение) с выходными параметрами робота (движение или положение робота, скорость и ускорение при заданной нагрузке). Эта модель требует:

- 1) описание протекания тока в двигателе;
- 2) уравнений движения робота с вращением двигателя в обобщенных координатах, в качестве которых выбраны: угловое перемещение робота, угловая скорость вала двигателя, ускорение при заданной нагрузке;
- 3) электрических / механических соотношений в системе [1].

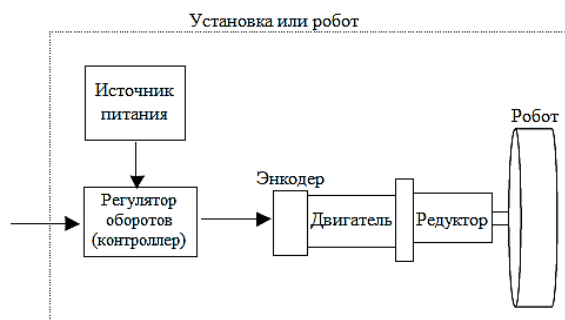


Рис. 1. Модель мобильного робота

Электроника двигателя

Схема системы привода двигателя построена и оценена с использованием закона напряжения Кирхгофа. Суммирование напряжений по всей цепи представлено в уравнении 1,

$$V_{in} = L \frac{di}{dt} + Ri + k_e \omega, \quad (1)$$

обыкновенном дифференциальном уравнении первого порядка для тока i , где L, R – индуктивность и сопротивление двигателя, k_e – электрическая постоянная, V_{emf} – обратная ЭДС, ω – скорость вращения двигателя (рад/с).

Уравнения движения

Уравнения движения для робота описывают простой случай движения с одной степенью свободы, движущегося вперед и назад. Построена схема симметричной половины робота (рис. 2), которая используется для записи уравнений движения [2].

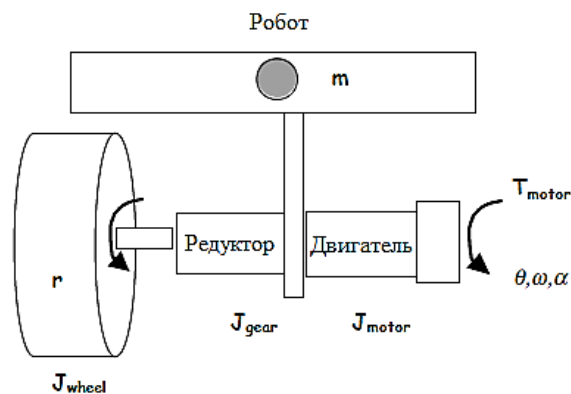


Рис. 2. Схема мобильного робота

$$J_{equiv} \ddot{\theta} + C \dot{\theta} = T - T_{load}, \quad (2)$$

J_{equiv} – эквивалентный момент инерции относительно двигателя, C – эквивалентное вязкое демпфирование, воспринимаемое двигателем, T_{motor} – входной крутящий момент двигателя, T_{load} – все остальные нагрузки в системе.

Полный момент инерции системы относительно двигателя обозначен, как эквивалентный момент инерции и определяется следующим уравнением

$$J_{equiv} = J_{motor} + J_{gear} + (J_{wheel} + mr^2) \left(\frac{1}{GR} \right)^2, \quad (3)$$

J_{motor}, J_{gear} – моменты инерции двигателя и редуктора относительно двигателя, J_{wheel} – инерция колеса робота, m – масса робота, r – радиус колеса, GR – коэффициент передачи, выраженный, как отношение входного вращения к единичному выходному вращению. Уравнение 2, есть обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка определяющее угол поворота вала двигателя θ .

Электромеханическое соотношение

Электрические и механические компоненты связаны двумя способами. Во-первых,

обычно используется приближенное соотношение, описывающее крутящий момент двигателя, как линейную функцию тока в двигателе [3].

$$T = k_t i, \quad (4)$$

k_t – постоянная момента двигателя. Кроме того, обратная ЭДС в двигателе линейно связана со скоростью вращения двигателя

$$V_{emf} = k_e \dot{\theta}. \quad (5)$$

Электрические и динамические взаимосвязи теперь объединены в систему уравнений, управляющих реакцией робота. Уравнения 4 и 5 заменяются уравнения 2 и 1 соответственно для получения окончательных уравнений системы, обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го и 2-го порядка с двумя неизвестными i и θ

$$\begin{aligned} J\ddot{\theta} + C\dot{\theta} - k_t i &= -T_{load} \\ Li + Ri + k_e \dot{\theta} &= V_{in} \end{aligned} \quad (6)$$

В установившемся состоянии приведенная выше динамическая модель двигателя может быть значительно упрощена ($\dot{i} = \ddot{\theta} = 0$) для получения уравнений.

Эта система может быть преобразована в форму пространства состояний для получения системы из трех обыкновенных дифференциальных уравнений 1-го порядка, в дальнейшем величина T_{load} не учитывается [4]

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & -\frac{C}{J} & \frac{k_t}{J} \\ 0 & -\frac{k_b}{L} & -\frac{R}{L} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{L} \end{Bmatrix} \{V_{in}\} \\ \begin{Bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

В этом случае выходными переменными являются линейное положение и скорость робота, а также ток двигателя.

Путем математических преобразований уравнение 7 приведено к описанию в виде передаточных функций.

Исходными данными двигателя являются технические характеристики и параметры двигателя TTU ME3060, мобильного робота класса «robotcarkit», представленные ниже.

Исходные данные

Обозначение	Численное значение	Название	Единицы измерения
m	5	Масса робота	кг
g	9.81	Ускорение свободного падения	м/с ²
rw	0.05	Радиус колеса	м
GR	1/15	Коэффициент передачи	
J _{motor}	1.3e-4	Момент инерции двигателя	кг·м ²
C	1.0791e-5	Эквивалентное вязкое демпфирование	Н/м
kt	35	Крутящий момента двигателя	Нм
kb	0.7840;	Постоянная обратной ЭДС	об / мин
L	4.8*1e-3	Индуктивность	Гн
R	9.65	Сопротивление	Ом
V	12	Входное напряжение	В

Компьютерная модель объекта управления

Компьютерное моделирование проведено в среде класса MATLAB. Графики переходного процесса мобильного робота при входном напряжении 12 В представлены на рис. 3.

Первый график соответствует угловому перемещению робота, второй – угловой скорости

вала двигателя и третий – ускорению при заданной нагрузке.

В работе управление осуществляется по одному каналу, в качестве которого выбран канал скорости движения мобильного робота, для этого необходимо преобразование канала угловой скорости вала двигателя, а именно выход объекта умножить на радиус колеса r и передаточное число GR . В результате разработана компьютерная модель объекта управления.

В качестве детерминированного возмущения используются единичная ступенька и апериодическое звено, имитирующие движение

мобильного робота в гору. Для наглядности влияния возмущения на ступеньке установлена задержка в 4 секунды.

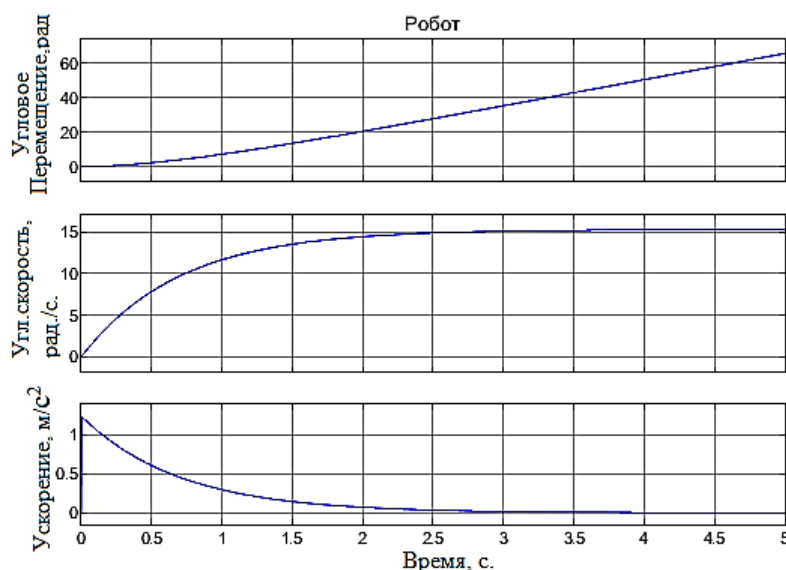


Рис. 3. Графики переходного процесса робота

Математически возмущение $D_g(s)$, преобразованное по Лапласу, может быть записано, как отношение полинома числителя $N_d(s)$ к полиному знаменателя $\Gamma_d(s)$, формирующему возмущение.

В данном исследовании $\Gamma_d(s)$ имеет вид

$$\Gamma_d(s) = s(s+1), \text{ а } N_d(s) = 2.$$

Компьютерная модель ОУ с возмущением представлена на рис. 4, а график переходного процесса ОУ с возмущением на рис. 5.

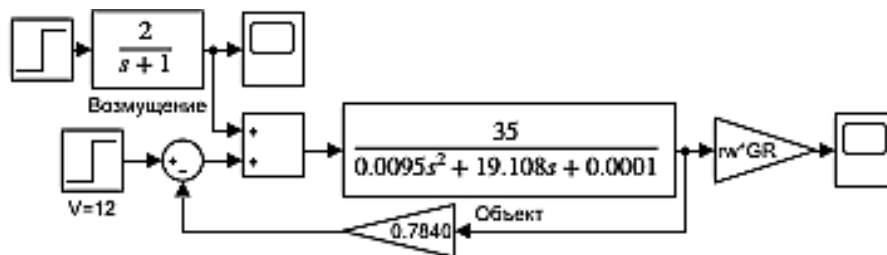


Рис. 4. Компьютерная модель ОУ с возмущением

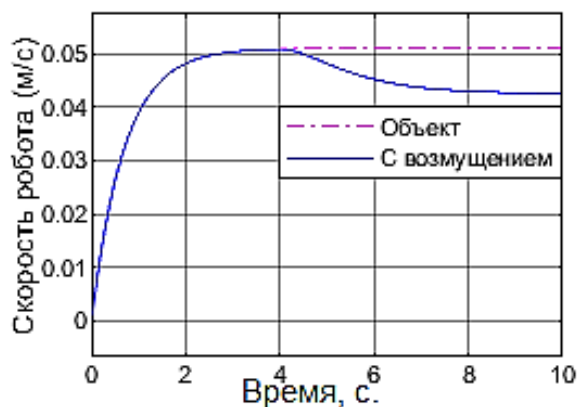


Рис. 5. График переходного процесса ОУ с возмущением

На графике переходного процесса отчетливо видно, как при 4 секундах на объект начинает действовать возмущение, то есть объект начинает ехать в гору, и скорость вращения колес падает. Скорость вращения колес при воздействии возмущения снижается на 16%.

2. Обеспечение условий компенсации возмущения в установившемся режиме на основе использования принципа внутренней модели

Согласно принципу внутренней модели (ПВМ), для компенсации возмущения в устано-

вившемся режиме требуется, чтобы формирующий полином $\Gamma_d(s)$ был включен в соотношение для описания регулятора, как часть знаменателя.

Передаточная функция номинального объекта

$$G_0(s) = \frac{B_0(s)}{A_0(s)} = \frac{35}{0.0095s^2 + 19.108s + 0.0001}. \quad (8)$$

Передаточная функция регулятора $C(s) = \frac{P(s)}{L(s)}$, формирующий полином

$$\Gamma_d(s) = s(s+1).$$

Принцип внутренней модели будет обеспечен, если $L(s) = \Gamma_d(s)\bar{L}(s)$.

Если степень $A_0(s)$ – n, а степень $\Gamma_d(s)$ – q, то минимальная степень желаемого характеристического полинома может быть определена, как $2n-1+q$. То есть желаемый характеристический полином должен быть как минимум степени 5.

Пусть желаемый характеристический полином имеет вид

$$A_{cl}(s) = 0.0095s^5 + 19.1935s^4 + 172.2191s^3 + 497.0369s^2 + 458.5947s + 0.0025. \quad (9)$$

Характеристический полином замкнутой системы имеет вид

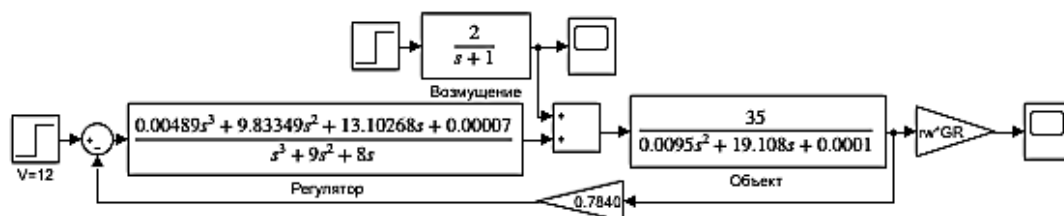


Рис. 6. Компьютерная модель системы с компенсацией возмущения

График переходного процесса замкнутой системы с регулятором представлен на рис. 7.

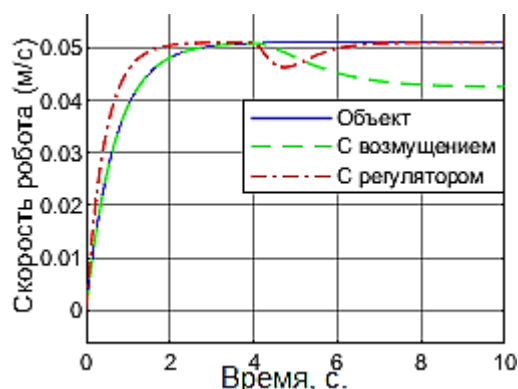


Рис. 7. График переходного процесса системы с компенсацией возмущения

$$\begin{aligned} A_{cl} &= A_0(s)\Gamma_d(s)\bar{L}(s) + B_0(s)P(s) = \\ &= (0.0095s^2 + 19.108s + 0.0001)s(s+1)(l_1s + l_0) + \\ &\quad + 35(p_3s^3 + p_2s^2 + p_1s + p_0) = \\ &= 0.0095l_1s^5 + (19.1175l_1 + 0.0095l_0)s^4 + \\ &\quad + (19.1081l_1 + 19.1175l_0 + 35p_3)s^3 + \\ &\quad + (0.0001l_1 + 19.1081l_0 + 35p_2)s^2 + \\ &\quad + (0.0001l_0 + 35p_1)s + 35p_0. \end{aligned} \quad (10)$$

Согласно лемме о расположении полюсов характеристического полинома Single Input Single Output (SISO)-системы, уравнение 11

$$A_0(s)\Gamma_d(s)\bar{L}(s) + B_0(s)P(s) = A_{cl}(s). \quad (11)$$

Путем решения уравнения 11 получены коэффициенты регулятора системы $l_1=1$, $l_0=8$, $p_3=0.00489$, $p_2=9.83349$, $p_1=13.10268$, $p_0=0.00007$, тогда регулятор

$$\begin{aligned} C &= \frac{P(s)}{\Gamma_d(s)\bar{L}(s)} = \frac{p_3s^3 + p_2s^2 + p_1s + p_0}{s(s+1)(l_1s + l_0)} = \\ &= \frac{0.00489s^3 + 9.83349s^2 + 13.10268s + 0.00007}{s^3 + 9s^2 + 8s}. \end{aligned} \quad (12)$$

Компьютерная модель системы изображена на рис. 6.

Благодаря применению принципа внутренней модели, с помощью метода назначения полюсов удалось в значительной мере компенсировать возмущение, а также улучшить характеристики системы. Переходной процесс протекает быстрее, вызванное возмущением, падение скорости уменьшилось в несколько раз и составляет 6 %.

3. Упреждение возмущения

При упреждении возмущения выход модели и реакция на выходе регулятора определяются выражениями [5]

$$\begin{aligned} Y_d(s) &= S_0(s)G_{02}(s)(1 + G_{01}(s)G_f(s)D_g(s)) \\ U_d(s) &= -S_{uo}(s)G_{02}(s)D_g(s) + S_0(s)G_f(s)D_g(s). \end{aligned} \quad (13)$$

Как видно из уравнения 13, в идеале блок упреждения должен инвертировать часть номинальной модели, то есть $G_f(s) = -[G_{01}(s)]^{-1}$. Также видно, что передаточная функция блока упреждения $G_f(s)$ должна быть устойчивой и собственной, так как действует в разомкнутом контуре.

На первом этапе необходимо осуществить синтез регулятора обратной связи, который реализован с помощью метода назначения полюсов. Пусть желаемый характеристический полином имеет вид

$$A_d(s) = 0.0095s^4 + 19.1935s^3 + 172.1621s^2 + 382.1609s + 0.000059. \quad (14)$$

С помощью метода назначения полюсов получен регулятор обратной связи

$$\begin{aligned} C(s) &= \frac{P(s)}{L(s)} = \\ &= \frac{0.00543s^2 + 10.9189s + 0.000059}{s(s+9)}. \end{aligned} \quad (15)$$

Для упреждения возмущения требуется найти $G_f(s) = -[G_0(s)]^{-1}$, $G_f(s)$ выбрана, как приближение инверсии $G_0(s)$

$$G_f(s) = -\frac{0.0095s^2 + 19.108s + 0.0001}{\beta \cdot 0.0095s^2 + 19.108s + 0.0001}, \quad (16)$$

β допускает компромисс между эффективностью упреждения и величиной управляющего воздействия. Согласно [5] β был принят 0,01, при котором наблюдается удовлетворительная динамика.

Компьютерная модель с упреждением возмущения, представлена на рис. 8.

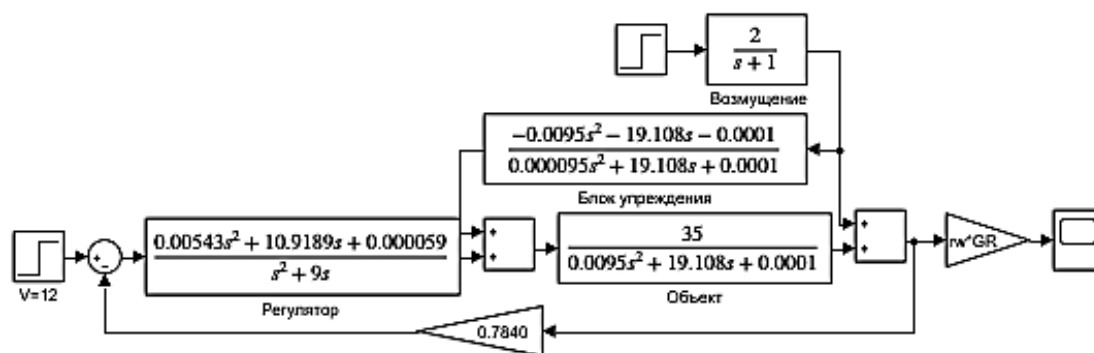


Рис. 8. Компьютерная модель с упреждением возмущения

График переходного процесса без упреждения и с упреждением возмущения продемонстрирован на рис. 9.

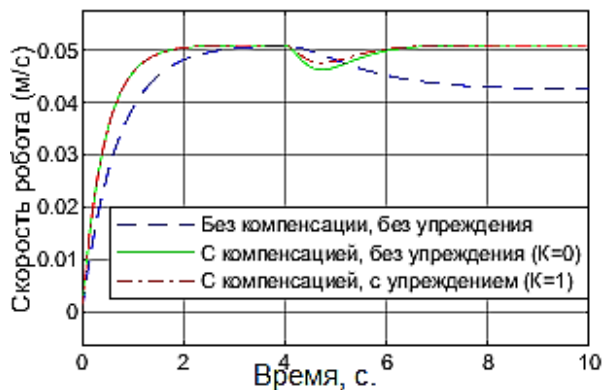


Рис. 9. График переходного процесса с упреждением возмущения

Из рис. 9 видно, что наилучшими характе-

ристиками обладает система с использованием упреждения и компенсацией возмущения. Скорость вращения колес при упреждении возмущения снижается на 4 %.

4. Аналитическое конструирование каскадного управления

Основная идея каскадного управления заключается в том, чтобы передать в обратную связь некоторые промежуточные переменные, которые находятся между точкой приложения возмущения и выходом. В каскадном управлении вводится второй контур управления. Выход первого регулятора формирует эталонный сигнал для второго контура. В этой структуре имеются два контура управления, первичный контур с первичным регулятором и вторичный контур с вторичным регулятором.

На первом этапе требуется разделить объект $G_0(s)$ для реализации двух контуров управления.

$$G_{01}(s) = \frac{35}{s+7};$$

$$G_{02}(s) = \frac{s+7}{0.0095s^2 + 19.108s + 0.0001}. \quad (17)$$

На следующем этапе необходимо разработать вторичный регулятор. Пусть эталонный характеристический полином имеет вид

$$A_{cl}(s) = s^3 + 24s^2 + 191s + 504. \quad (18)$$

С помощью метода назначения полюсов получен вторичный регулятор

$$C_2 = \frac{(s+7)(0.457s + 2.057)}{s(s+1)} =$$

$$= \frac{0.457s^2 + 5.256s + 14.399}{s^2 + s}. \quad (19)$$

Этот регулятор был выбран для получения удовлетворительной компенсации возмущения во вторичном контуре. Дополнительная чувствительность вторичного контура равна [6]

$$T_{02} = \frac{BP}{AL + BP} = \frac{15.995s + 71.995}{s^2 + 16.995s + 71.995}. \quad (20)$$

Первичный регулятор работает с эквивалентным объектом, описанным передаточной функцией, уравнения 21 [7]

$$G_{oeg} = G_{02}(s)T_{02}(s) =$$

$$= \frac{15.995s^2 + 183.69s + 503.3965}{0.0095s^4 + 19.2695s^3 + 325.424s^2 + 1375.682s + 0.0072}. \quad (21)$$

Теперь необходимо для объекта G_{oeg} разработать первичный регулятор C_1 . Пусть эталонный характеристический полином, имеет вид

$$A_{cl}(s) = 0.0095s^7 + 19.536s^6 + 867.405s^5 +$$

$$+ 15524.589s^4 + 139063.062s^3 +$$

$$+ 622646.644s^2 + 1114304.25s + 5.832. \quad (22)$$

С помощью метода назначения полюсов найден первичный регулятор

$$C_1 = \frac{(-20.44s^3 - 41059.73s^2 - 408324.69s - 2.14)}{(s^3 + 28.1s^2 + 34462.84s + 150226.34)}. \quad (23)$$

Таким образом, система с каскадным управлением представлена на рис. 10.

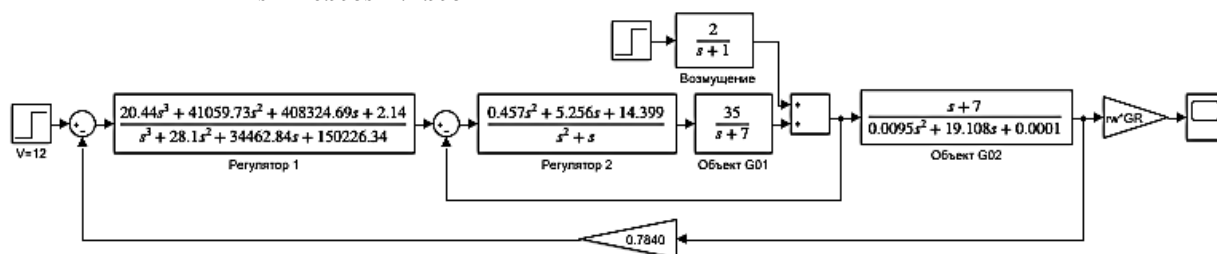


Рис. 10. Компьютерная модель с каскадным управлением

График переходного процесса с каскадным управлением продемонстрирован на рис. 11.

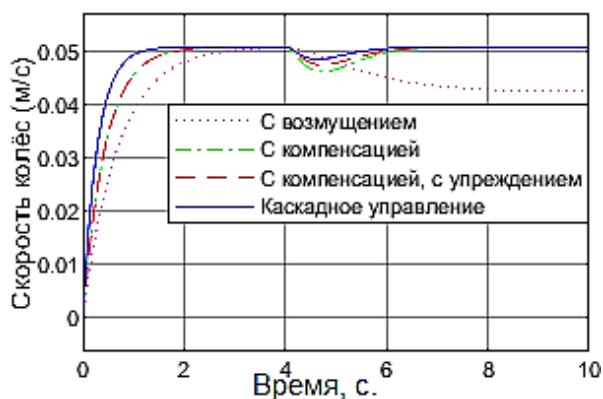


Рис. 11. График переходного процесса с каскадным управлением

Благодаря применению каскадного управления удалось существенно улучшить характеристики системы. Результаты использования каскадного управления значительно лучше, чем при использовании упреждения возмущения и компенсации возмущения. Скорость вращения колес при каскадном управлении снижается на 2 %, что в 8 раз меньше, чем в случае без использования управления.

Заключение

Описана математическая модель объекта управления и произведено компьютерное моделирование. На основе использования принципа внутренней модели обеспечены условия

компенсации возмущения в установившемся режиме. Реализовано упреждение возмущения применительно к данному объекту управления. Произведено аналитическое конструирование каскадного управления.

Из рис. 11 видно, что все структуры компенсируют возмущение, наилучшими характеристиками обладает система с применением каскадного управления.

Все результаты подтверждены вычислениями и компьютерным моделированием. Компьютерное моделирование проведено в среде класса MATLAB. Основные параметры приведены из открытых источников информации на примере мобильного робота класса «robotcarkit» и двигателя TTU ME3060.

Литература

1. Технологический университет Теннесси: лабора-

тория ME 4370: Мехатроника и разработка интеллектуальных машин. Теннесси, 2000. URL: <https://www.cae.tntech.edu/~scanfield/me4370/9Controls.PDF> (Дата обращения 17.07.22).

2. Первозванский А.А. Курс теории автоматического управления (изд. третье). М.: Наука, 2010. 624 с.

3. Копылов И.П., Клоков Б. К. Справочник по электрическим машинам. В 2 т. Т. 1. М.: Энергоатомиздат, 1988. 456 с.

4. Асанов А.З. Введение в математическое моделирование систем управления. М.: МИРЭА–Российский технологический университет, 2019. 198 с.

5. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.

6. Асанов А.З. Компенсация возмущений и взаимовлияния каналов управления угловой ориентацией и стабилизацией космического аппарата дистанционного зондирования земли // Автометрия. 2022. № 4. С. 20-27.

7. Проектирование регуляторов систем управления / В.В. Григорьев, В.И. Бойков, А.В. Парамонов, С.В. Быстров. СПб.: Университет ИТМО, 2021. 94 с.

Поступила 28.04.2023; принята к публикации 01.08.2023

Информация об авторах

Веркнер Алексей Сергеевич – аспирант, ассистент кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр. Вернадского, 78), e-mail: aleksverk@mail.ru, тел. +7(910)708-62-42, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7269-4396>

Горлова Ксения Олеговна – инженер кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр. Вернадского, 78), e-mail: ko.gorlova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1092-8315>

Гурьянова Екатерина Олеговна – старший преподаватель кафедры автоматических систем, МИРЭА – Российский технологический университет (119454, Россия, г. Москва, пр. Вернадского, 78), e-mail: guryanova-e.o@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8809-8801>

CONTROL ALGORITHMS DEVELOPMENT OF MOBILE ROBOT WITH PERTURBATION COMPENSATION

A.S. Verkner, K.O. Gorlova, E.O. Guryanova

MIREA – Russian Technological University, Moscow, Russia

Abstract: the paper considers the structural problems associated with compensation of deterministic perturbations acting on a mobile robot. The result obtained in the work makes it possible to assert that in comparison with systems based only on feedback, the use of perturbation anticipation, cascade control in many cases has an advantage. The mathematical and computer models of the movement of a mobile robot for deterministic perturbations are described. The presented mathematical model, which has a simple structure and is convenient for solving various control problems, can be used for educational and methodological purposes. Based on the use of the principle of the internal model, the conditions for compensating the perturbation in the steady state are provided. Disturbance anticipation has been implemented in relation to this control object. An analytical design of cascade control has been made. A comparison of the studied structures of control systems is presented. A comparative analysis has been carried out and the effectiveness of each control principle has been investigated by means of numerical simulation. The presented control algorithms have shown their effectiveness in compensating the disturbance, and also improved the stability and speed of the system. The research results can be used in the development and testing of control systems that are subject to deterministic disturbances. A mobile robot of the "robot car kit" class is considered as a control object. Computer simulation was carried out in the MATLAB class environment

Key words: mathematical model of a mobile robot, computer model of a mobile robot, movement of a mobile robot uphill, disturbance compensation, internal model principle, disturbance anticipation, cascade control

References

1. "Tennessee Technological University: Laboratory ME 4370: Mechatronics and Intelligent Machine Engineering", Tennessee, 2000, available at: <https://www.cae.tntech.edu/~scanfield/me4370/9Controls.PDF> (accessed 07.17.22).
2. Pervozvanskiy A.A. "Course of the theory of automatic control (third ed.)" (*Kurs teorii avtomaticheskogo upravleniya (izd. tret'ye)*), Moscow, Nauka, 2010, 624 p.
3. Kopylov I.P., Klovov B.K. "Handbook of electric machines (in 2 vol., vol. 1)" (*Spravochnik po elektricheskim mashinam. (v 2 t., t. 1)*), Moscow, Energoatomizdat, 1988, 456 p., ISBN 5-283-00500-3.
4. Asanov A.Z. "Introduction to mathematical modeling of control systems" (*Vvedeniye v matematicheskoye modelirovaniye sistem upravleniya*), Moscow, MIREA–Rossiyskiy tekhnologicheskiy universitet, 2019, 198 p., ISBN: 978-5-98180-513-4
5. Goodwin G.K., Grebe S.F., Salgado M.E. "Design of control systems" (*Proyektirovaniye sistem upravleniya*), Moscow, BINOM. Laboratoriya znaniy, 2004, 911 p., ISBN 5-94774-128-8.
6. Asanov A.Z. "Compensation of disturbances and interference of control channels for angular orientation and stabilization of the earth remote sensing spacecraft", *Autometry (Avtometriya)*, 2022, no. 4, pp. 20-27.
7. Grigoriev V.V., Boikov V.I., Paramonov A.V., Bystrov S.V. "Design of control system regulators" (*Proyektirovaniye regulyatorov sistem upravleniya*), St. Petersburg: Universitet ITMO, 2021, 94 p.

Submitted 28.04.2023; revised 01.08.2023

Information about the authors

Alexey S. Verkner - Postgraduate student, MIREA – Russian Technological University (84 Vernadskogo prosp., Moscow 119454, Russia), e-mail: aleksverk@mail.ru, tel.: +7(910)708-62-42, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7269-4396>

Ksenia O. Gorlova – Engineer of the Automatic Systems Department, MIREA – Russian Technological University (84 Vernadskogo prosp., Moscow 119454, Russia), e-mail: ko.gorlova@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1092-8315>

Ekaterina O. Guryanova – Senior Lecturer of the Automatic Systems Department, MIREA – Russian Technological University (84 Vernadskogo prosp., Moscow 119454, Russia), e-mail: guryanova-e.o@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8809-8801>

ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ ПОСРЕДСТВОМ CAD-СИСТЕМЫ

Г.В. Петрухнова, В.А. Трубецкой, А.С. Точилин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: разработка и использование робототехнических систем актуальны, эффективны и обоснованы. Для контроля состояния роботов требуются современные инструменты сбора, хранения и анализа данных. Грамотная реализация процедур управления робототехническими системами является одним из главных условий обеспечения эффективности и надежности их функционирования. Рассматривается полуавтономный робот, управляемый посредством CAD-системы. Целью статьи является представление архитектуры системы для управления роботом-манипулятором. В данной задаче CAD-система представляет собой среду моделирования-управления, в которой трёхмерные модели отражают поведение физического устройства. Представляемая система включает в себя произвольную робототехническую подсистему, состоящую из функциональных блоков, а также desktop-приложение, которое отображает модель управляемого устройства. Каждый блок робототехнической подсистемы может обмениваться информацией с другими элементами подсистемы. Протокол обмена информацией устроен так, что система модулей со своими внутренними адресами развернута на транспортном уровне. Внутренний адрес содержит тип устройства и его уникальный номер из числа таких устройств. Межмодульный обмен информацией определяется сеансовым уровнем протокола. Реализация программного обеспечения основана на использовании DLL-библиотеки с общим для всех таких библиотек API. Стек протоколов предполагает наличие нескольких независимых модулей, так данные распределяются между ними сервером. Для внешнего клиента существует только одна точка входа в систему – сервер. Модели реальных устройств загружаются в систему из файлов открытых форматов: OBJ, STL. Для каждого формата написаны шейдеры. Разработчик библиотеки может задать набор типов датчиков, приводов, накопителей, подходящих для работы с его устройством. Это делает систему подходящей для работы с устройствами из произвольного набора модулей с известным протоколом обмена данными. Чтобы добавить какое-либо новое устройство для мониторинга и управления, необходимо лишь реализовать протокол внутри встраиваемой системы, а после собрать реализацию части графической системы в виде динамической библиотеки. Рассмотрены примеры практического использования представляемой системы

Ключевые слова: робототехнические системы, модель OSI, трехмерное моделирование, CAD-система, шейдер, протокол обмена данными, desktop-приложение, модель освещения Фонга

Введение

Роботизированные системы широко используются на предприятиях для автоматизации широкого спектра производственных процессов. Внедрение робототехники позволяет не только оптимизировать производственные процессы, но и снизить затраты, сократить время выполнения операций, устранить ошибки человеческого фактора и улучшить качество продукции. Роботы используются для достижения самых разных целей, обусловленных спецификой производственного объекта. Для успешного решения своих профильных задач автоматизации производственных процессов роботы должны создаваться на надежных и эффективно работающих узлах информационно-управляющих систем.

Одна из целей создания робототехнических систем состоит в том, чтобы наделить роботов расширенными функциями восприятия и действия, иначе говоря, сделать роботов спо-

собными выполнять самые разнообразные задачи в изменяющихся условиях, в которых люди и роботы сотрудничают. На сегодняшний день разработка и использование робототехнических систем актуальны, эффективны и обоснованы [1], [2].

Для контроля состояния роботов требуются современные инструменты сбора, хранения, анализа и передачи данных. Грамотная реализация процедур управления робототехническими системами является одним из главных условий обеспечения эффективности и надежности их функционирования.

В данной статье рассматривается полуавтономный робот, управляемый посредством CAD-системы. Целью данной статьи является представление архитектуры системы для управления роботом-манипулятором в реальном режиме времени.

Актуальность представленной работы состоит в создании системы, при помощи которой пользователь мог бы управлять робототехнической системой, состоящей из произвольных периферийных модулей. На рынке в дан-

ный момент распространены лишь системы проектирования от производителей роботов, которые выполняют предварительную настройку заранее заданных типов роботов.

Постановка задачи

Рассмотрим постановку задачи по аналогии с работами [3] – [5].

Реализация функций управления состояниями робота сводится к выполнению ряда технологических операций в рамках соответствующих технологических процедур. Формализуем этот процесс.

В общем случае модель любого объекта, подлежащего контролю, есть кортеж, представленный ниже:

$$\Delta = \langle T, X, Y, Z, F, L \rangle,$$

где T – множество моментов времени, в которые наблюдается объект; X, Y – множества входных и выходных сигналов соответственно; Z – множество состояний объекта; F – оператор переходов, отражающий механизм изменения состояния объекта как реакцию объекта на внутренние и внешние возмущения; L – оператор выходов, описывающий механизм формирования выходного сигнала под воздействием внутренних и внешних возмущений.

Операторы F и L задают собой отображения (1) и (2), соответственно:

$$F: T \times X \times X \times Z \rightarrow Z, \quad (1)$$

$$L: T \times X \times X \times Z \rightarrow Y. \quad (2)$$

Следующим этапом моделирования процедуры контроля состояний робота является постановка и решение задачи классификации, т.е. соотнесения наблюдаемого состояния робота к одному из заданных классов его состояний. В общем виде суть решения этой задачи заключается в отыскании отображения η , представляемого как:

$$\eta: Y \rightarrow E, \quad (3)$$

где E есть множество классов состояний робота.

Задачу контроля состояния робота можно в общем виде представить как объединение отображений (2) и (3) [5]:

$$T \times X \times X \times Z \rightarrow Y \rightarrow E. \quad (4)$$

Выбор состояния, в которое должен перейти робот, остается за пользователем, работающим в CAD-системе. Пользователь задает состояние – система выполняет его указание.

Цель данной статьи состоит в представлении технических средств, позволяющих формировать множества X и Y .

Множества Z, E , отображения F, L, η , в рассматриваемой задаче, как правило, задаются техническим заданием на выполнение технологической процедуры, техническими характеристиками роботизированной системы и человеком, который управляет роботом посредством CAD-системы.

Архитектура системы управления состояниями робота

В данной задаче CAD-система представляет собой среду моделирования-управления, в которой 3-D модели отражают поведение физического устройства.

Представляемая система состоит из двух подсистем. Первая из них включает в себя произвольную робототехническую подсистему, состоящую из функциональных блоков. Вторая подсистема – это desktop-приложение, которое отображает модель управляемого устройства. Каждый блок робототехнической подсистемы может обмениваться информацией с другими составляющими блоками.

Протокол обмена информацией устроен так, что система модулей со своими внутренними адресами развернута на одном транспортном уровне. Внутренний адрес содержит тип устройства и его уникальный номер из числа таких устройств. Межмодульный обмен информацией определяются сеансовым уровнем протокола. Реализация программного обеспечения основана на использовании DLL-библиотеки с общим для всех таких библиотек API. Таким образом, разработчик протокола имеет возможность изменять организацию данных самостоятельно. Схема обмена данными представлена на рис. 1.

Модели реальных устройств загружаются в систему из файлов открытых форматов: OBJ, STL. Структура файла STL содержит в себе треугольники из вершин и готовые нормали, а для моделей формата OBJ необходимо считать нормали по ориентации, заданной тремя индексами вершин.

Для каждого формата написаны шейдеры – программы, выполняемые на видеокарте, при помощи которых формируется конечное изоб-

ражение на экране. В работе фигурируют вершинный (преобразование трёхмерных координат в нормализованные координаты устройства) и фрагментный (преобразование цвета пикселя) шейдеры. Геометрические шейдеры могли быть использованы для расчёта нормалей или перевода граней в рёбра для отображения каркаса модели. Однако, с точки зрения производительности, быстрее посчитать нормали при загрузке модели, а каркас можно оптимизировать при помощи матрицы смежности таким образом, чтобы он не содержал одинаковых ребер.

Фрагментный шейдер основан на упрощённой модели освещения Фонга [6], согласно которой цвет каждого пикселя внутри грани описывается по формулам (5), (6):

$$level = \bar{n} \cdot (\overline{light} - \overline{fragment}) * specular. \quad (5)$$

$$\overline{color} = level * \overline{color_l} + \overline{color_p}. \quad (6)$$

По формуле (5) определяется уровень *level*. Вначале находится скалярное произведение между нормалью грани $\bar{n}$ и вектором от позиции света до пикселя $(\overline{light} - \overline{fragment})$. Далее скалярное произведение умножается на коэффициент отражения материала *specular*, $specular \in [0,1]$.

Для получения конечного цвета нужно по формуле (6) сложить цвет грани $\overline{color_p}$ с цветом освещения, умноженным на уровень *level*. Если грань повёрнута в сторону от источника освещения, то скалярное произведение будет иметь отрицательный знак, что делает грань темнее в итоге.

В программном обеспечении позиция источника света совпадает с позицией сценической камеры, а также количество поглощаемого света ограничено коэффициентом отражения (значение *level* всегда меньше или равно 1). В этом случае отпадает надобность в реализации фонового компонента освещения.

Вершинный же шейдер реализует стандартное вычисление позиции вершины при помощи матриц MVP [7]. Для реализации математической модели робототехнической системы необходимо вычислить матрицу системных преобразований S_n , как произведение мировых матриц M_i всех звеньев модели, предшествующих данному звену (7). Мировая матрица непосредственно умножается на найденную матрицу системных преобразований, как показано в формуле (8):

$$S_n = \prod_{i=0}^{n-1} M_i. \quad (7)$$

$$M_n = S_n * M'_n. \quad (8)$$

Подобные преобразования помогут эмулировать связь звеньев робототехнической системы. При трансформации элемента, более близкого к базе, все присоединённые к нему звенья трансформируются соответствующим образом (рис. 2).

Оператор может загрузить на сцену некоторое количество моделей разных форматов, объединить их в деревья зависимостей. Каждый элемент дерева вычисляет свою матрицу согласно формулам (7) и (8). Элемент дерева представляет собой узел со ссылкой на родительский элемент и списком ссылок на дочерние. Таким образом, у модели может быть только один родитель – в противном случае расчёт мировой матрицы модели не однозначен: было бы не понятно, у какого именно родителя брать матрицу моделей. Из деревьев формируется сборка, представляющая собой законченное устройство.

Для трансформации объектов сцены используются либо клавиатурные события, либо значения из полей ввода окна свойств. При изменении значения переноса или угла поворота модели, все её дочерние узлы перестраиваются по новой системной матрице.

При наличии активного подключения к шлюзу, распределяющему сообщения по физическим узлам робототехнической системы, вместе с трансформацией элемента производится отправка актуальных координат модели. Если для модели задан существующий на стороне робота идентификатор, шлюз перенаправит координаты соответствующему приводу, на что тот сможет среагировать. Реализация обработки сигнала и реакции на него является отдельной задачей, не затрагивающей рассматриваемую систему моделирования и управления. В самом простом случае МПС должна разбить пришедшие данные на углы Эйлера и изменить скважность ШИМ-сигнала для привода в соответствии с его степенями свободы.

Программное обеспечение управления роботом задаёт идентификацию собственных периферийных устройств. Количество идентификаторов не обязательно должно совпадать с количеством моделей в сцене desktop-приложения. Оператор может управлять ограниченным количеством периферийных устройств, а также расширять библиотеку обработки сообщений. Например, для того, чтобы принимать видеосиг-

нал с устройства, оборудованного камерой, пользователь может загрузить динамическую библиотеку. Внутри неё включается перечисление, задающее соответствие между номером типа объекта и его назначением, дополнительные пункты контекстного меню, открываемые окна.

Разработчик библиотеки может задать набор типов датчиков, приводов, накопителей, подходящих для работы с его устройством. Это делает систему подходящей для работы с устройствами из произвольного набора модулей с известным протоколом обмена данными. Чтобы добавить какое-либо новое устройство для мониторинга и управления, необходимо лишь реализовать протокол внутри встраиваемой системы, а после собрать реализацию ча-

сти графической системы в виде динамической библиотеки.

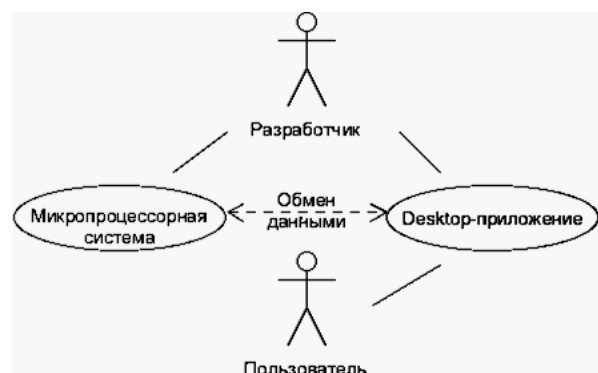


Рис. 1. Схема обмена данными

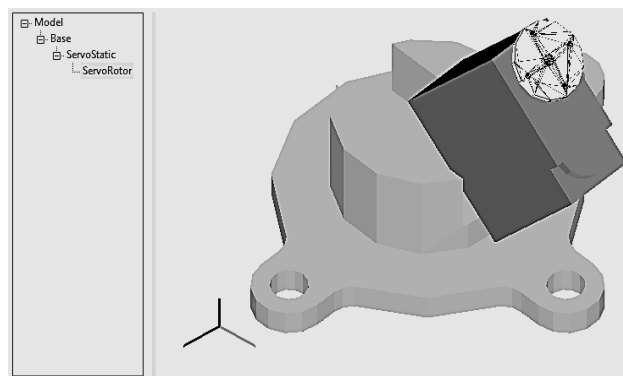
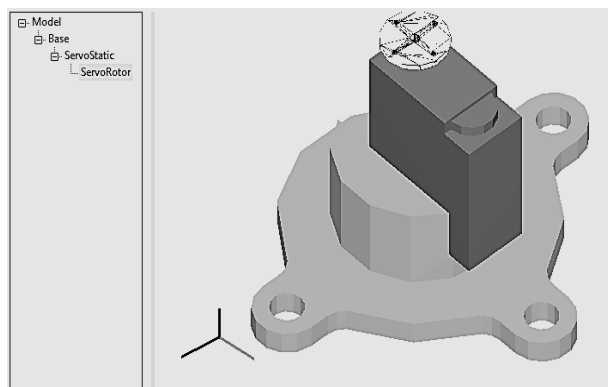


Рис. 2. Трансформация узла внутри окна моделирования с деревом объектов

Подобное архитектурное решение делает систему управления довольно гибкой, поскольку сама по себе система не будет хранить заранее предустановленные конфигурации для ограниченного набора робототехнических систем. Вместо этого, продвинутый конечный пользователь сможет настроить программное обеспечение под своё устройство, используя графические элементы окна и контекстное меню. Обычный же пользователь сможет загрузить готовое расширение.

Система может быть полезна не только для того, чтобы реализовывать управление роботом в реальном времени, но и для того, чтобы осуществлять тестирование протоколов обмена данными, получая визуальный отклик на какие-либо манипуляции с робототехнической системой.

Реализации режима непосредственного цифрового управления роботом

Представленная система может быть востребована для реализации режима непосред-

ственного цифрового управления (НЦУ). В таких системах сигнал от управляющего вычислительного комплекса передается посредством определенных преобразователей к исполнительным устройствам. Системы НЦУ характеризуются отсутствием аппаратной избыточности. В них широко используется возможность изменения алгоритмов управления контурами посредством изменения программного кода. Подобные системы отличаются гибкостью и могут совершенствоваться без изменений аппаратной составляющей, что не представляется возможным при использовании других механизмов регулирования. Таким образом, в системах с НЦУ разработка программного кода может являться альтернативой монтажным работам на действующем объекте. Функционирование системы НЦУ можно представить схемой на рис. 3.

Для эффективной работы систем НЦУ необходимо наличие моделей внешней среды, полных и подробных моделей рабочей зоны. В соответствии с назначением системы человеку-оператору может потребоваться информация о

текущем угле курса движения определенного объекта, о крене или наклоне объекта, о текущем положении робота; об обнаруженных проходимых и непроходимых участках среды, о выделенных типовых объектах, о различных сечениях и проекциях рабочей зоны. Очень актуальны видеоизображения среды в реальном времени, для чего необходима видеокамера. Подобная информация позволяет детально рассмотреть и проанализировать рабочую зону и ее фрагменты.

В представляемой системе на основе анализа информации, полученной из внешней среды, человек-оператор принимает решение о корректировке положения робота. Для этого ему достаточно скорректировать модель на экране компьютера путем трансформации узлов, например, так, как показано на рис. 2. Робот вслед за человеком-оператором реализует предписанные действия.

Среда моделирования предоставляет возможность оператору в режиме диалога загружать модели на сцену. Загруженный файл отобразится в виде модели на экране компьютера. Для оценки пространственного положения детали пользователь может воспользоваться управлением камерой. Помочь сориентироваться в пространстве должны координатные оси мирового пространства. Для каждого от-

дельного элемента модели имеется возможность настройки его свойств. При наличии нескольких моделей на сцене, оператор может объединить их в сборки путем перетаскивания узлов в дереве модели. Каждый дочерний узел связан с родительским и повторяет его трансформации.

Для подключения своего собственного робота к представленной системе, необходимо, согласно инструкциям программиста, реализовать методы обмена и обработки данных между микропроцессорной системой, встроенной в робота, и приложением.

При использовании алгоритмов компьютерного зрения у робота появляется возможность моделирования трёхмерных объектов вокруг себя. Подобные технологии используются в геоинформационных системах. Спроектированная система может упростить процесс восстановления геометрии по серии снимков, предоставляя для каждого из них дополнительную информацию. Человек-оператор в случае непосредственного цифрового управления будет контролировать объём восстановленной трёхмерной поверхности и итеративно повторять процесс восстановления, если получены некорректные результаты для какой-то области пространства.



Рис. 3. Схема функционирования системы НЦУ

Заключение

В статье показана актуальность и эффективность использования робототехнических систем на современных автоматизированных предприятиях. Проведена формализация про-

цедур контроля роботов-манипуляторов. Выделены основные множества, которые формализуют разработанные технические средства для управления роботом-манипулятором.

Для управления роботом используется система проектирования, посредством которой

решаются задачи обратной кинематики для определения смещения приводов, чтобы задать положение "руки" в координатном пространстве. В статье рассматривается реализация режима непосредственного цифрового управления. Для управления предварительно программируют систему – зашивают в микроконтроллер, на базе которого реализован робот, скетч. Робот-манипулятор в последствие сможет выполнять самостоятельно заложенный алгоритм действий.

Система проектирования позволяет пользователю из готовых моделей приводов/датчиков/неподвижных частей системы создавать сборки. Когда же программа с настроенной сборкой подключается к реальной системе, то происходит обмен информацией, посредством которого осуществляется управление физическим устройством через его модель.

Результаты исследования разработанной системы показали широкие возможности ее расширяемости.

Литература

1. Ядровская М.В., Гурин И.В. Исследование актуальности робототехнических технологий // *Advanced Engineering Research*. 2022. Т. 22. № 4. С. 353-364.
2. Galin R., Meshcheryakov R. Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace. In: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) *Interactive Collaborative Robotics // ICR 2019. Lecture Notes in Computer Science*. 2019. Vol. 11659. Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_7.
3. Байкин В. А., Стецюк А. Н. Формализация технологических процедур контроля жизненного цикла сложной инженерно-технической системы // *Программные системы и вычислительные методы*. 2016. №1(10). Сс. 52-58. DOI: 10.7256/2305-6061.2015.1.14407
4. Петрухнова Г.В., Болдырев И. Р. Многофункциональная система сбора данных для контроля состояния технических средств // *Вестник Воронежского государственного университета*. 2021. Т. 17. № 6. С. 56 – 61.
5. Петрухнова Г.В., Болдырев И. Р., Усачев М.Г. Структура многофункциональной системы для контроля состояния технических средств // *Вестник Воронежского государственного университета*. 2022. Т. 18. № 6. С. 39-45.
6. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications* // Springer, 2022. 925 с.
7. LearnOpenGL – Coordinate Systems. URL: <https://learnopengl.com/Getting-started/Coordinate-Systems>

Поступила 01.06.2023; принята к публикации 15.08.2023

Информация об авторах

Петрухнова Галина Викторовна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: gvpetruhnova@mail.ru

Трубецкой Виктор Александрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: viktortrubetskoi@yandex.ru

Точилиин Александр Сергеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: alexgerggot@gmail.com

DESIGN OF CONTROL SYSTEMS FOR ROBOTIC SYSTEMS BY MEANS OF A CAD SYSTEM

G.V. Petrukhнова, V.A. Trubetskoy, A.S. Tochilin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the development and use of robotic systems are relevant, effective and justified. Modern data collection, storage and analysis tools are required to monitor the state of robots. Competent implementation of control procedures for robotic systems is one of the main conditions for ensuring the efficiency and reliability of their functioning. This article discusses a semi-autonomous robot controlled by a CAD system. The purpose of the article is to present the architecture of system for controlling a robot manipulator. In this task, the CAD system is a simulation-control environment in which three-dimensional models reflect the behavior of a physical device. The presented system includes an arbitrary robotic subsystem consisting of functional blocks, as well as a desktop application that displays a model of a controlled device. Each unit of the robotic subsystem can exchange information with other elements of the subsystem. The information exchange protocol is designed so that the system of modules with their internal addresses is deployed at the transport level. The internal address contains the device type and its unique number from among such devices. The intermodule exchange of information is determined by the session level of the protocol. The software implementation is based on the use of a DLL library with an API common to all such libraries. The protocol stack assumes the presence of several independent modules, and the data is distributed between them by the server. For an external client, there is only one entry point to the system – the server. Models of real devices are loaded into the system from files of open formats: OBJ, STL. Shaders are written for each format. The library developer can specify a set of types of sensors, drives, drives suitable for working with his device. This makes the system suitable for working with devices from an arbitrary set of modules with a known communication protocol. To add any new device for monitoring and control, it is only necessary to implement the protocol inside the embedded system, and then assemble the implementation of the part of the graphical system in the form of a dynamic library. Examples of practical use of the presented system are considered

Key words: robotics systems, OSI model, three-dimensional modeling, CAD system, shader, data exchange protocol, desktop application, Phong lighting model

References

1. Yadrovskaya M.V., Gurin I.V. "Study of the relevance of robotic technologies", *Advanced Engineering Research*, 2022, vol. 22, no 4, pp. 353-364.
2. Galin R., Meshcheryakov R. "Review on Human–Robot Interaction During Collaboration in a Shared Workspace", in: Ronzhin A., Rigoll G., Meshcheryakov R. (eds) "Interactive Collaborative Robotics", *ICR 2019. Lecture Notes in Computer Science*, 2019, vol 11659, Springer, Cham. DOI: 10.1007/978-3-030-26118-4_7.
3. Baykin V.A., Stetsyuk A.N. "Formalization of technological procedures for monitoring the life cycle of a complex engineering system", *Software systems and computational methods (Programmnyye sistemy i vychislitel'nyye metody)*, 2016, no. 1 (10), pp. 52-58, DOI: 10.7256/2305.
4. Petrukhnova G.V., Boldyrev I.R. "Multifunctional data acquisition system for monitoring the state of technical means", *The Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 6, pp. 56 – 61.
5. Petrukhnova G.V., Boldyrev I.R., Usachev M.G. "The structure of a multifunctional system for monitoring the state of technical means", *The Bulletin of Voronezh State University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2022. vol. 18, no. 6, pp. 39-45
6. Szeliski R. "Computer Vision: Algorithms and Applications", Springer, 2022, 925 p.
7. "LearnOpenGL – Coordinate Systems" available at: <https://learnopengl.com/Getting-started/Coordinate-Systems>

Submitted 01.06.2023; revised 15.08.2023

Information about the authors

Galina V. Petrukhnova - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: gvpetruhnova@mail.ru

Viktor A. Trubetskoy - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: viktortrubetskoi@yandex.ru

Alexander S. Tochilin - Undergraduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: alexgerggot@gmail.com

ПРИМЕНЕНИЕ МОДЕЛИ КОНВЕЙЕРНОЙ ОБРАБОТКИ В ЗАДАЧАХ ЛОГИСТИКИ

И.И. Супрунов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: рассматривается задача модификации модели и алгоритма аддитивной последовательной (конвейерной) обработки движущегося протяженного объекта с целью применения в некоторых задачах логистики. Алгоритм конвейерной обработки в первоначальной версии связан с задачей принудительного охлаждения полосы горячей прокатки и содержит три модуля. Эти модули соответствуют режимам пассивного охлаждения полосы до входа в активную зону, принудительного охлаждения в активной зоне и пассивного охлаждения после выхода из активной зоны до момента смотки. Наиболее важной частью алгоритма является модуль расчета режимов работы душирующих установок в активной зоне. Этот модуль может быть адаптирован для применения в некоторых задачах логистики, связанных с составлением графиков доставки (или получения) грузов при наличии последовательности транспортных средств и последовательности терминалов. В задаче доставки (или получения) грузов заданы емкости транспортных средств и мощности терминалов. Мощность терминала понимается как количество условных единиц груза, которые можно разгрузить (или получить) одновременно в данном терминале. Каждое транспортное средство осуществляет разгрузку (или погрузку) последовательно в нескольких терминалах, при этом выбор соответствующих активных терминалов из общей последовательности всех терминалов (составление путевого листа) определяется модифицированной версией алгоритма конвейерной обработки

Ключевые слова: конвейерная обработка, терминалы, логистика

Введение

В цикле работ [1]-[3] рассматривалась задача моделирования процесса принудительного охлаждения полосы горячей прокатки на отводящем рольганге посредством душирующих установок, была предложена дискретная модель последовательной (конвейерной) обработки протяженного объекта. Технологические аспекты данной задачи изложены во многих работах по теории прокатки (см., например, [4]-[6]).

В дискретной модели последовательной обработки рассматривалась одномерная задача охлаждения (то есть полоса рассматривалась как протяженный одномерный объект) и, как было отмечено, эта модель может быть адаптирована для некоторых задач логистики. Например, в контексте задачи организации перевозок (см., например, [7],[8]) протяженный объект может быть представлен в виде последовательности транспортных средств, вектор входных данных протяженного объекта (в модели охлаждения это температурный профиль полосы прокатки) – как вектор грузоподъемностей последовательности транспортных средств, управляющие узлы (душирующие установки) – как терминалы разгрузки или получения единиц груза.

В данной статье терминология, модель и алгоритмы, разработанные и для задачи охлаждения полосы прокатки, адаптируются для задачи перевозки грузов.

Модель и алгоритмы последовательной (конвейерной) обработки

Дискретная модель обработки движущегося протяженного объекта основана на понятиях окрестностной структуры и окрестностной системы (см., например, [9]). Протяженный объект характеризуется входным вектором (профилем), целью является достижение заданного выходного профиля.

Рассматривались две версии модели, связанные с координатами Лагранжа и Эйлера. Модель в координатах Эйлера, как правило, удобнее, она имеет более компактную окрестностную структуру и, соответственно, более компактную окрестностную систему.

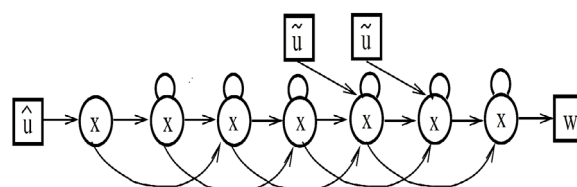


Рис. 1. Окрестностная структура модели Эйлера,
 $n_1 = n_2 = n_3 = 2$

Пример окрестностной структуры для модели Эйлера в случае $n_1 = n_2 = n_3 = 2$ (два узла в каждой из трех зон) изображен на рис. 1.

Соответствующая данному примеру динамическая окрестностная система приведена в статье [2]. Заметим, что модель учитывает наличие самодействия объекта: состояние узла в следующий момент времени зависит от текущего состояния этого узла и двух его соседей. В координатах Лагранжа это соответствует схеме (фрагменту окрестностной структуры) вида (рис. 2):

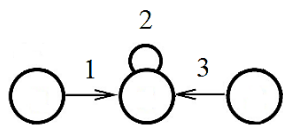


Рис. 2. Самодействия в координатах Лагранжа

В координатах Эйлера эта схема преобразуется в схему, представленную на рис. 3, чем и объясняется сложная структура дуг орграфа на рис. 1.

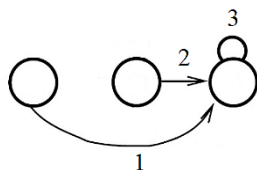


Рис. 3. Самодействия в координатах Эйлера

В случае задачи охлаждения полосы прокатки важной особенностью общей модели является наличие двух зон пассивного охлаждения, до входа в активную зону одностипных душирующих установок и после выхода из активной зоны до момента смотки.

В логистической версии модели участки пассивного охлаждения полосы не имеют аналогов и могут быть исключены из рассмотрения. С другой стороны, в зоне обработки одностипные управляющие узлы (душирующие установки) заменяются различающимися по условной емкости (или по мощности) узлами (терминалами).

Алгоритм генерирования релейного режима работы для душирующих установок в активной зоне конвейера был описан в статье [2]. В статье [3] были предложены две модификации основного алгоритма, оптимизирующие расход ресурсов, и рассмотрены численные примеры.

Адаптация модели к задаче организации перевозок

В работах [1]-[3] в качестве основного применения модели последовательной обработки рассматривалась задача охлаждения полосы и потому терминология была в значительной степени связана именно с этой задачей. В контексте задачи организации перевозок мы будем использовать следующие термины и обозначения.

Агенты и емкости. Узлы (дискретные фрагменты) движущегося протяженного объекта интерпретируются как последовательность транспортных средств, осуществляющих грузоперевозку некоторой продукции. Далее для краткости мы будем использовать для транспортных средств термин *агенты* или, подробнее, *транспортные агенты*. Каждый из агентов имеет определенную максимальную емкость, а именно максимальное количество перевозимых агентом условных единиц продукции. Реально используемую в конкретной задаче емкость агента мы называем номинальной емкостью, она всегда меньше либо равна максимальной.

Терминалы, мощности и ресурсы. Устройства обработки интерпретируются как последовательность терминалов. Каждый из терминалов имеет определенную мощность, а именно, количество условных единиц продукции, принимаемых или отгружаемых в данном терминале одновременно. Максимальный ресурс терминала – это максимально возможное количество соответствующих ему единиц (квантов) мощности. Текущий ресурс терминала – это количество использованных (при получении или отгрузке) единиц мощности.

Задачи доставки и получения. Можно рассматривать две задачи: агенты доставляют продукцию в терминалы или агенты получают продукцию в терминалах. Обе задачи аналогичны задаче охлаждения полосы прокатки (в активной зоне) в случае, если мощности всех терминалов одинаковы и, кроме того, в задаче доставки целью является полная разгрузка каждого агента.

Входной и выходной профили. В задаче доставки груза входной профиль является вектором емкостей агентов и целевой выходной профиль – нулевым вектором. В задаче получения грузов векторы меняются местами: входной профиль является нулевым вектором, целевой выходной профиль является вектором емкостей агентов. В задаче доставки возможен

вариант, когда в качестве целевого вектора рассматривается вектор ресурсов терминалов.

Взаимодействие агентов и терминалов (разгрузка или погрузка) происходит одномоментно, без последующих задержек в терминалах, а именно, после доставки (или получения) продукции в количестве, равном мощности терминала, агент с оставшимся (или накопленным) грузом направляется к следующему терминалу.

Путевой код (путевой лист) агента. Набор активных терминалов для данного агента определяется путевым листом или путевым кодом агента. Код агента является вектором из нулей и единиц (двоичным числом), при этом сумма мощностей указанных в коде активных терминалов должна быть равна емкости агента.

Алгоритм обработки. Целью алгоритма обработки является генерирование путевых кодов (путевых листов) агентов по заданному входному профилю в случае доставки продукции в терминалы или по заданному выходному профилю в случае получения продукции в терминалах.

Как уже было отмечено во введении, имеются следующие важные отличия описанной логистической версии модели обработки от версии, рассмотренной в работах [1]-[3]. В логистической интерпретации отсутствуют пассивные зоны конвейера и отсутствует самодействие объекта. С другой стороны, устройства обработки (терминалы) могут иметь разные мощности, что должно быть учтено в соответствующей модификации алгоритма обработки.

В логистической версии модель фактически становится комбинаторной, поскольку существенные для динамической модели вычисления, связанные с пассивными зонами, не используются. Это позволяет исключить из обозначений время и упростить их по сравнению с обозначениями в статьях [1]-[3].

Пусть N - количество агентов и K - количество терминалов. Векторы максимальных и номинальных емкостей агентов, мощностей терминалов, максимальных и текущих ресурсов терминалов обозначим

$$\begin{aligned} A_{max} &= [A_1, \dots, A_N], \quad A_{nom} = [a_1, \dots, a_N], \\ M &= [m_1, \dots, m_K], \quad R_{max} = [R_1, \dots, R_K], \\ R &= [r_1, \dots, r_K]. \end{aligned}$$

Задаче охлаждения полосы, рассмотренной в [1]-[3], соответствует вектор $M = [1, \dots, 1]$.

Путевой код i -го агента (двоичный вектор) обозначим

$$C_i = [c_1, \dots, c_K], \quad c_i = \{0, 1\}.$$

Условие возможности достижения целевого выходного профиля (нулевого в задаче доставки или профиля номинальных емкостей в задаче получения) имеет вид

$$m_1 + \dots + m_K \geq a_i, \quad i = 1, \dots, N.$$

Возможные обобщения. В описанной выше логистической интерпретации продукция предполагается однотипной и потому емкости агентов и мощности терминалов являются скалярными величинами. Можно рассмотреть более общую задачу перевозки одновременно нескольких видов продукции. В этом случае на уровне постановки соответствующей задачи организации перевозок достаточно перейти от скаляров к векторам. Алгоритм генерирования путевых кодов при этом, конечно, значительно усложняется.

Циклический алгоритм генерирования путевых кодов

Рассмотрим, для определенности, задачу доставки. Из трех версий алгоритма обработки, описанных в [3], в задаче организации перевозок наиболее интересна и полезна циклическая версия, однако для ее адаптации требуется существенная переработка. Циклический алгоритм позволяет сделать равномерным заполнение терминалов доставляемой продукцией. В двойственной задаче получения продукции этому соответствует равномерный по всем терминалам расход ресурсов. Дадим неформальное описание модифицированного циклического алгоритма. Мы будем предполагать, что ограничения на максимальные ресурсы терминалов отсутствуют.

Рассмотрим на плоскости Oxy окружность L длины $|L| = m_1 + \dots + m_K$ с центром в начале координат. Последовательные дуги длины $m_1, \dots, m_K$, отложенные от точки P оси Ox (точки пересечения окружности L с осью Ox) в направлении против часовой стрелки, будут соответствовать последовательности терминалов.

Далее рассмотрим путь S длины $|S| = A_1 + \dots + A_N$ от точки P в направлении против часовой стрелки. Этот путь состоит из

последовательности дуг длины $A_1, \dots, A_N$ (максимальные емкости агентов). Точки деления окружности L и пути S на соответствующие дуги назовем реперными точками на L и на S .

Если реперные точки на L и S совпадают, то путевой код каждого агента определяется дугами терминалов, из которых состоит дуга агента. Заметим, что это условие всегда выполнено в задаче охлаждения полосы, поскольку $M = [1, \dots, 1]$ и температурный профиль считается целочисленным.

Если реперные точки не совпадают, то нужно последовательно уменьшать емкости агентов, сдвигая очередную реперную точку пути S по часовой стрелке до первого совпадения с реперной точкой на L .

В результате мы получаем последовательность номинальных (для данной задачи) емкостей $A_{nom} = [a_1, \dots, a_N]$ и укороченный путь S_{nom} длины $a_1 + \dots + a_N$, реперные точки которого совпадают с реперными точками на L и потому путевой код каждого агента определяется дугами терминалов, из которых состоит дуга агента.

Заметим, что последовательность перечисленных в путевом листе активных терминалов ($c_j = 1$), генерируемая данным алгоритмом, состоит либо из нескольких идущих подряд терминалов мощности

$$m_i, \dots, m_{i+p},$$

либо из двух участков мощности

$$m_1, \dots, m_p \text{ и } m_q, \dots, m_k,$$

примыкающих к первому и к последнему терминалам. Кроме того, в векторе

$$R = [r_1, \dots, r_k]$$

текущих ресурсов терминалов (в случае доставки грузов это вектор текущей загруженности терминалов) значения компонент различаются не более чем на единицу, то есть заполнение терминалов происходит максимально равномерным образом. Напомним, что в данном описании алгоритма мы предполагаем, что ограничения на максимальные ресурсы терминалов отсутствуют. Для учета ограничений в алгоритме нужно дополнительно уменьшать длину окружности L всякий раз в момент заполнения одного из терминалов.

Заключение

Целью работы является адаптация построенной в [1]–[3] модели конвейерной обработки движущегося протяженного объекта к задачам логистики. В связи с изменением основного объекта потребовалась радикальная переработка основного алгоритма и, кроме того, полное изменение обозначений и терминологии, используемых в модели. Получены следующие результаты, отличающиеся научной новизной.

1. Введены понятия векторов максимальной и номинальной емкости транспортных агентов, векторов мощностей терминалов, векторов максимальных и текущих ресурсов терминалов, понятие путевого кода агента.

2. Разработан алгоритм генерирования путевых кодов агентов, основанный на циклическом представлении векторов мощностей терминалов и максимальных емкостей агентов с последующим уменьшением емкостей агентов до некоторых номинальных значений. Указаны возможные направления дальнейшего обобщения алгоритма в контексте логистических задач.

Литература

1. Шмырин А.М., Мишачев Н.М., Супрунов И.И. Окрестностное моделирование конвейерной обработки стохастического потока данных // Системы управления и информационные технологии. 2021. № 2(84). С. 19–22.
2. Мишачев Н.М., Шмырин А.М., Супрунов И.И. Прямая и обратная задачи для пассивных зон конвейерной обработки протяженного объекта // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 5. С. 78–84.
3. Супрунов И.И. Алгоритмы конвейерной обработки движущегося протяженного объекта на основе окрестностных структур // Вестник Липецкого государственного технического университета. 2022. № 3(49). С. 35–40.
4. Filipczyk W., Fredrick W., Chang Fu-Hsiang. Advanced control of coiling temperature in China steel's hot mill. // 12th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. 2007. Vol. 40. Is. 11. Pp. 421–426.
5. Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table / U. Muhin, S. Belskij, E. Makarov, T. Koynov // Frattura ed Integrita Strutturale. 2016. Vol. 10. Is. 37. Pp. 305–311.
6. Method of calculating the cooling of steel strips on the collecting roller table / G.S. Senichev, G.A. Medvedev, S.A. Denisov, A.G. Medvedev // Steel. 2 (2007). Pp. 77–78.
7. Бельский А.С. Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования. М.: Мир, 1992. 582 с.
8. Олейникова С.А., Дятчина А.В. Разработка специального математического обеспечения системы управления потоком поступающих заявок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 2. С. 33–37.

9. Мишачев Н.М., Шмырин А.М. Окрестностные структуры и метаструктурная идентификация // Таврический

вестник информатики и математики. 2017. Т. 37. Вып. 4. С. 87-95.

Поступила 31.05.2023; принята к публикации 14.08.2023

Информация об авторах

Супрунов Игорь Иванович – старший преподаватель кафедры высшей математики, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, д. 30), e-mail: i.i.suprunov@yandex.ru

APPLICATION OF CONVEYOR PROCESSING MODEL IN LOGISTICS PROBLEMS

I.I. Suprunov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: the problem of modifying the model and algorithm of additive sequential (conveyor) processing of a moving extended object is considered for the purpose of application in some problems of logistics. The conveyor processing algorithm in the initial version is associated with the problem of forced cooling of the hot strip and contains three modules. These modules correspond to the modes of passive cooling of the strip before entering the core, forced cooling in the core, and passive cooling after leaving the core until the moment of winding. The most important part of the algorithm is the module for calculating the operating modes of shower installations in the core. This module can be adapted for use in some logistics tasks related to scheduling the delivery (or receipt) of goods in the presence of a sequence of vehicles and a sequence of terminals. In the problem of delivery (or receipt) of goods, the capacities of vehicles and the capacities of terminals are specified. The capacity of the terminal is understood as the number of conventional units of cargo that can be unloaded (or received) at the same time in this terminal. Each vehicle performs unloading (or loading) sequentially in several terminals, while the selection of the corresponding active terminals from the total sequence of all terminals (drawing up a waybill) is determined by a modified version of the pipeline processing algorithm

Key words: conveyor processing, terminals, logistics

References

1. Shmyrin A.M., Mishachev N.M., Suprunov I.I. "Neighborhood modeling of conveyor processing of stochastic data flow", *Control Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnyye tekhnologii)*, 2021, no. 2 (84), pp. 19-22.
2. Mishachev N.M., Shmyrin A.M., Suprunov I.I. "Direct and inverse problems for passive zones of conveyor processing of an extended object", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 5, pp. 78-84.
3. Suprunov I.I. "Neighborhood structures for a model of conveyor processing of an extended object", *The Bulletin of Lipetsk State Technical University (Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, no. 1 (42), pp. 22-27.
4. Filipczyk W., Fredrick W., Chang Fu-Hsiang. "Advanced control of coiling temperature in China steel's hot mill", *12th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing*, 2007, vol. 40, iss. 11, pp. 421-426.
5. Muhin U., Belskij S., Makarov E., Koynov T. "Simulation of accelerated strip cooling on the hot rolling mill run-out roller table", *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2016, vol. 10, iss. 37, pp. 305-311.
6. Senichev, G.S., Medvedev, G.A., Denisov, S.A., Medvedev, A.G. "Method of calculating the cooling of steel strips on the collecting roller table", *Steel*, 2007, no. 2, pp. 77-78.
7. Belenky A.S. "Research of operations in transport systems: ideas and schemes of planning optimization methods (Issledovaniye operatsiy v transportnykh sistemakh: idei i skhemy metodov optimizatsii planirovaniya)", Moscow, Mir, 1992, 582 p.
8. Oleinikova S.A., Dyatchina A.V. "Development of special mathematical software for the flow control system for incoming applications", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 2, pp. 33-37.
9. Mishachev N.M., Shmyrin A.M., "Neighborhood Structures and Metastructural Identification", *Taurida Journal of Computer Science Theory and Mathematics (Tavricheskiy vestnik informatiki i matematiki)*, 2017, vol. 37, no. 4, pp. 87-95.

Submitted 31.05.2023; revised 14.08.2023

Information about the authors

Igor I. Suprunov - Senior Lecturer, Department of Higher Mathematics, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), e-mail: i.i.suprunov@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ПРОБЛЕМНО-ОРИЕНТИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ОПТИМИЗАЦИОННОЙ ЗАДАЧИ УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ ПОСТУПАЮЩИХ ЗАЯВОК

А.В. Дятчина, С.А. Олейникова, Т.Н. Недикова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: освещается разработка методов и проблемно-ориентированных программ для задачи определения наилучшего соответствия между потоком поступающих заявок и специалистами, которые могут их выполнить. В классическом варианте эта задача является задачей о назначениях. Принципиальным отличием рассматриваемой задачи от известного варианта являются использование нескольких произвольных критериев, отражающих качество выбранного решения, наличие расписания специалистов по обслуживанию заявок, пришедших ранее, а также временные ограничения на выполнение работ. В качестве подхода для разработки алгоритма был выбран один из комбинаторных методов дискретной оптимизации – метод имитации отжига. Данный метод целесообразно использовать для сложных NP-полных задач дискретной оптимизации, к которым относится исследуемая задача. В работе особое внимание уделено разработке проблемно-ориентированной системы, в основе которой лежит практическая реализация описанного алгоритма. Разработана структура данной системы, спроектирована база данных, представлены основные формы приложения. Кроме того, в статье приведены результаты работы предложенного алгоритма на тестовых данных. Разработанный алгоритм и проблемно-ориентированная система могут использоваться на любых предприятиях и организациях, в которых требуется решать задачу распределения потока входящих заявок по специалистам с точки зрения множества критериев

Ключевые слова: оптимизационная задача, проблемно-ориентированная система, многокритериальная оптимизация, метод имитации отжига, задача о назначениях

Введение

В современных производственных, корпоративных и обслуживающих системах часто встречаются задачи управления потоком поступающих заявок (проектных задач) путем их оптимального распределения по исполнителям (разработчикам). Такие задачи относятся к классу задач о назначениях. Их классический вариант и ряд разновидностей достаточно глубоко исследованы, и известны методы их решения. Для решения классической задачи о назначениях разработан специальный метод, который называется венгерским [1, 2].

В рамках данного исследования будет рассмотрен вариант представления разработки проблемно-ориентированной системы (ПОС), предназначенной для решения задачи, обладающей следующими особенностями:

1. Наличие нескольких критериев, различных по степени важности,
2. Наличие временных ограничений,
3. Наличие расписания занятости выполнением заявок, поступивших ранее.

Эти ограничения создают дополнительные сложности в решении модифицированной задачи о назначениях, которую с учетом всех осо-

бенностей можно сформулировать следующим образом. Допустим, что имеется некоторое множество специалистов. На вход системы поступает множество задач. Также имеется множество критериев, описывающих эффективность выполнения каждой из задач каждым из специалистов. И каждый такой критерий описан с помощью соответствующей матрицы. Кроме того, существует расписание с указанием загруженности специалистов заявками, которые были получены раньше. Необходимо каждой задаче назначить соответствующего специалиста с точки зрения оптимизации всех выбранных критериев с учетом имеющегося расписания и временных ограничений.

1. Теоретический анализ

Подробное описание формализованной оптимизационной задачи и алгоритма, учитывающего данные особенности, приводилось в [3]. Ее можно сформулировать следующим образом. Пусть имеется поток проектных задач (заявок), каждая из которых может быть выполнена одним из N специалистов. Без ограничения общности предполагаем, что данные задачи поступают одновременно. Пусть к моменту поступления задач у каждого из специали-

стов имеется расписание, показывающего его загрузку в каждый момент времени t :

$$Sch_i(t) = \begin{cases} 1, & \text{если спец. } i \text{ занят в момент } t; \\ 0, & \text{в противном случае} \end{cases} \quad (1)$$

Предполагается, что каждый специалист i , $i = 1, \dots, N$ выполняет данную задачу j , $j = 1, \dots, M$ в течение времени t_{ij} .

Пусть имеются критерии $C^1, C^2, \dots, C^L$, определяющие степень эффективности выполнения каждой из проектных задач каждым из исполнителем. В простейшем (классическом) случае эти критерии будут описаны в матричном виде, строки которой содержит исполнителей; столбцы – работы, а на пересечении будут представлены числовые величины критерия. В более сложном случае критерии будут иметь функциональный вид, не зависящий напрямую от исполнителей и/или работ. Например, для решения задачи управления целесообразно обеспечить равномерную загрузку всех исполнителей всеми задачами в течение данного периода. Такой критерий будет описываться уже не матрицей, а функцией.

Необходимо разработать алгоритм решения многокритериальной оптимизационной задачи управления потоком поступающих заявок путем их распределения по исполнителям.

Предложим математическое описание задачи, выполненное в [3]. В качестве итогового критерия будет использоваться свертка.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K \alpha_l \tilde{c}_{ij}^l x_{ij} \rightarrow \min. \quad (2)$$

Здесь $\tilde{c}_{ij}^l$ – значения матрицы c_{ij}^l , приведенные к так называемой единой балльной шкале.

В качестве значений α_l выступают веса критериев. Предполагается, что изначально критерии будут проранжированы лицом, принимающим решения.

В качестве ограничений рассмотрим необходимость выполнения всех задач в поставленные сроки. Для этого сначала определим возможное время начала выполнения задачи j у специалиста i .

$$t_{\text{нач}}(i, j) = \min(t^*: Sch_i(t) = 0, t^* \leq t \leq t^* + t_{ij}) \quad (3)$$

Тогда временные ограничения на директивный срок завершения работы можно описать следующим образом:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} (t_{\text{нач}}(i, j) + t_{ij}) \leq t_{j\text{-дир}}. \quad (4)$$

Акцентируем внимание, что данная задача является развитием задачи о назначениях. В классическом варианте требуется распределить N задач по N специалистам с точки зрения некоторого критерия [1, 2].

Существуют различные разновидности данной задачи. В частности, в [4] представлен подход к решению многокритериальной задачи о назначениях, а также задаче с разным числом исполнителей и заданий.

Отличием исследуемой задачи от существующих аналогов является возможность ее решения в динамике, что определяется наличием существующего расписания исполнителей. Кроме того, введено множество разнообразных критериев, отражающих целесообразность закрепления данной задачи за данным исполнителем.

2. Практическая часть

Предложим алгоритм решения поставленной задачи. В основу положим метод имитации отжига, являющийся одним из наиболее эффективных алгоритмов комбинаторной оптимизации [5, 6].

Основная идея данного алгоритма заключается в последовательном перемещении по пространству состояний таким образом, чтобы каждая новая точка претендовала бы на то, чтобы улучшить с точки зрения цели новое решение. В общем виде алгоритм имеет следующую структуру [6]:

Шаг 1. Определить начальное решение.

Шаг 2. Скорректировать согласно некоторому алгоритму данное решение и проверить целевую функцию на новом варианте.

Шаг 3. Если претендент на новое решение (результат коррекции) улучшает значение целевой функции, то в качестве эталона выбрать результат коррекции, в противном случае выбрать данный результат с вероятностью, зависящей от номера итерации и степени «ухудшения» целевой функции относительно предыдущего решения.

Алгоритм заканчивает свою работу в том случае, когда в течение нескольких этапов нет улучшения целевой функции.

Под решением будем понимать массив $x = (x_1, \dots, x_n)$, каждый элемент которого содержит идентификатор задачи, которая будет закреплена за исполнителем x_i , $i = 1, \dots, N$.

В качестве целевой функции F без ограничения общности, рассмотрим свертку критериев, представленную в (2).

Для данной задачи алгоритм будет иметь следующий вид:

Шаг 1. Предварительная работа алгоритма.

1.1. Цикл

Нц

Распределить случайным образом работы по специалистам (массив ES)

Кц (До тех пор, пока не будут выполнены ограничения)

1.2. Если эталонного решения не найдено (например, цикл проработал 100 раз впустую),

то задача не имеет решений

Иначе переходим к шагу 2.

Шаг 2.

$T = T_{нач}$

В цикле (по i пока $T \geq T_{кон}$)

Нц

2.1. Цикл

Нц

Выбрать случайным образом двух специалистов

Поменять между ними работы

Записать результат в массив TS

Кц (пока не получим решения удовлетворяющего всем ограничениям)

2.2. Если $F(TS) < F(ES)$ // нашли решение лучше

то $ES = TS$

иначе $P(F) = \exp(-F/t_i)$ // определить вероятность замены ES на TS ,

где t_i - текущий шаг

2.3. с вероятностью P $ES = TS$

2.4. $t_i = t_i - Temp(t_i)$ // понижаем температуру с помощью функции $Temp()$

Кц

выдаем в качестве ответа ES – новое решение.

Для практического решения задачи и реализации описанного выше алгоритма разработан программный комплекс на языке C#. В структуру комплекса входят: база данных и вычислительный блок, содержащий различные модули, необходимые для решения многокритериальной оптимизационной задачи управления потоком поступающих заявок. Структура проблемно-ориентированной системы представлена следующим образом (рис. 1).

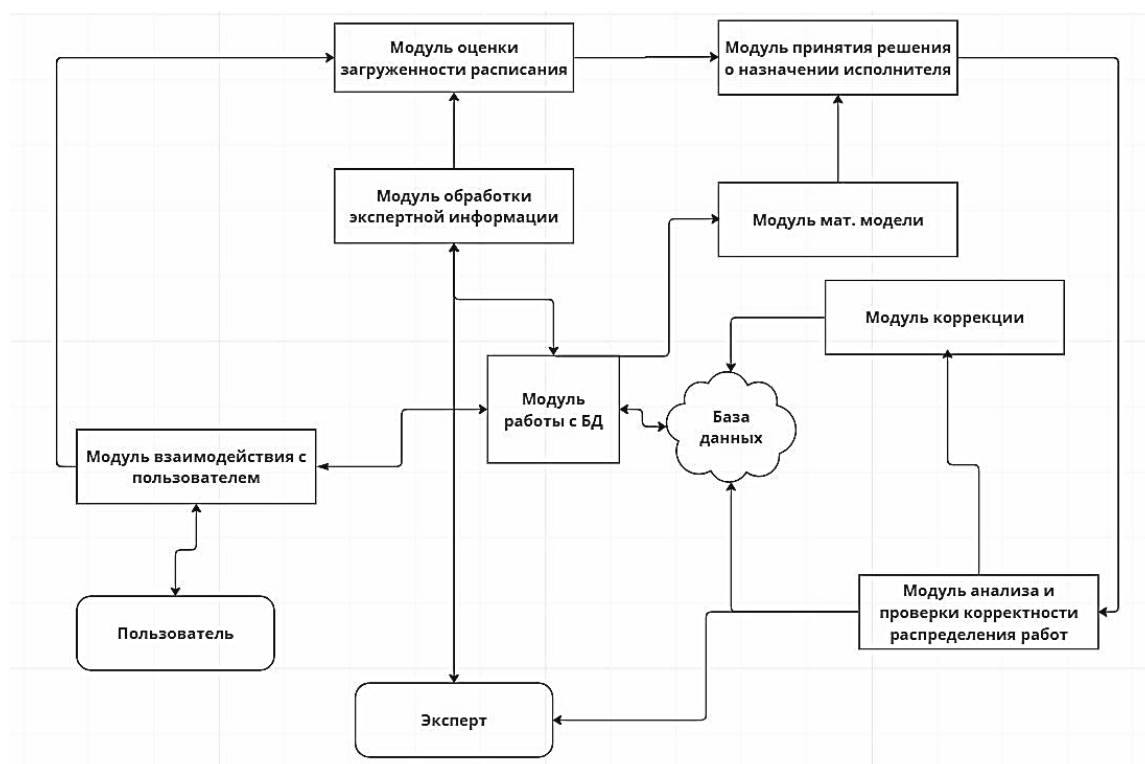


Рис. 1. Структура проблемно-ориентированной системы

В базе данных хранятся необходимые сведения обо всех работах, специалистах, критериях и других сущностях, которые требуется для решения поставленной задачи. Ее структура приведена на рис. 2.

Рассмотрим пример расчетов. Работу алгоритма протестируем на учебных данных.

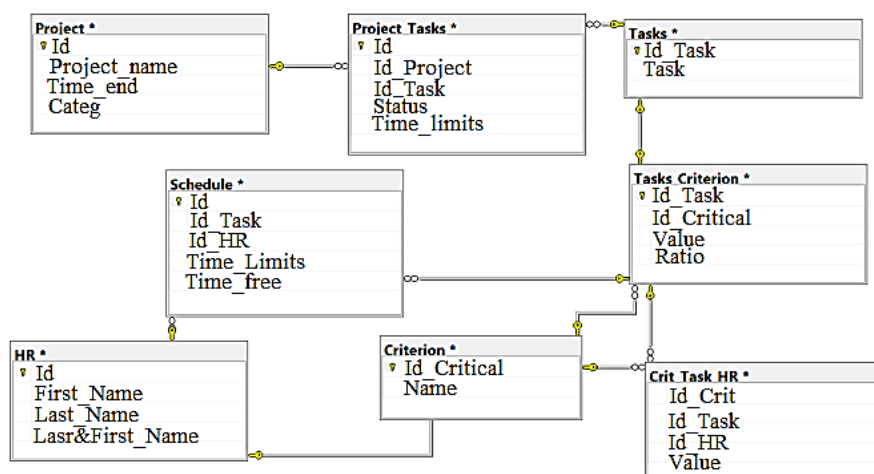


Рис. 2. Структура базы данных

В табл. 1 представлен фрагмент исходных данных, содержащий время выполнения каждой из работ каждым из сотрудников. В данной матрице по строкам отложены работы, по столбцам – специалисты. Каждая ячейка содержит временное значение, которое данный специалист тратит на выполнение данной работы.

Таблица 1

Матрица значений длительности выполнения работ исполнителями

	Раб.1	Раб.2	Раб.3	Раб.4	Раб.5
Исп.1	2	20	6	2	4
Исп.2	5	15	5	3	3
Исп.3	1	24	7	4	5
Исп.4	4	18	9	1	2
Исп.5	3	16	10	2	4
Исп.6	1	18	6	4	3
Исп.7	6	23	8	3	4

В табл. 2 приведен пример временных ограничений, которые действуют на время вы-

полнения работ и сужают поле вариативности назначения работ исполнителям.

Таблица 2

Временные ограничения

Раб.1	Раб.2	Раб.3	Раб.4	Раб.5
3	20	7	3	3

Без ограничения общности, система тестировалась на трех критериях.

В системе имеется возможность добавить или выбрать сотрудника, просмотреть о нем основные данные и заполнить экспертный раздел - данные по проделанным работам.

Также есть возможность просмотреть каждую задачу и выставить для нее приоритетные критерии исполнения, которые повлияют на основные вычисления при итоговом распределении проектных заявок (задач) по исполнителям (рис. 3). Следующая страница ИС позволяет выбрать задачи и исполнителей для дальнейшего распределения (рис. 4).

Рис. 3. Вид страницы «Задачи и критерии»

ИС СУП ПЗ

Сотрудники Задачи и Критерии **Вычисления**

Выбор сотрудников для расчета

- ☐ 1 Теслова Анна
- ☐ 2 Киселев Дмитрий
- ☐ 3 Фирсов Александр
- ☐ 4 Габинян Давид
- ☐ 5 Сагабиев Станислав
- ☐ 6 Пошкарева Диана
- ☐ 7 Шемякина Олеся

Выбор задач для расчета

- ☐ 1 Создание БД
- ☐ 2 Настройка интеграции смежных систем
- ☐ 3 Ревью кода стажеров
- ☐ 4 Подготовка стендапов
- ☐ 5 Планирование митингов

Рассчитать

Рис. 4. Вид страницы «Вычисления»

Перед тем как перейти к результату работы проблемно-ориентированной системы, обратимся к результатам свертки критериев представленной в виде матрицы в табл. 3.

Таблица 3

Результат свертки критериев

	Раб.1	Раб.2	Раб.3	Раб.4	Раб.5
Исп.1	56,37	55,67	62,42	63,5	59,87
Исп.2	59,48	66,11	66,48	58,61	55,84
Исп.3	59,17	59,71	66,44	60,06	62,08
Исп.4	61,18	67,59	64,98	56,4	55,12
Исп.5	64,25	38,97	64,25	56,77	53,84
Исп.6	64,98	63,69	64,42	59,71	61,72
Исп.7	53,52	62,05	61,48	60,63	55,84

Каждая ячейка данной таблицы содержит обобщенный результат, который показывает предпочтительность выполнения данной задачи данным специалистом с точки зрения всех (в данном примере – трех) критериев.

На рис. 5 представлен результат итогового распределения 5 работ по 7 исполнителям с учетом их занятости предыдущими заданиями (отражено в сущности Schedule) и временных ограничений методом имитации отжига.

Таким образом, разработано проблемно-ориентированный комплекс, предназначенный для решения оптимизационной задачи о назначениях с множеством критериев и временными ограничениями.

ИС СУП ПЗ - Расчет распределения задач

Минимальное значение для первой задачей 55,14
 Минимальное значение для второй задачей 43,29
 Минимальное значение для третьей задачей 63,64
 Минимальное значение для четвертой задачей 56,67
 Минимальное значение для пятой задачей 54,92

Итоговое распределение задач:

Для первой задачи выбран разработчик номер - 1
 Для второй задачи выбран разработчик номер - 5
 Для третьей задачи выбран разработчик номер - 6
 Для четвертой задачи выбран разработчик номер - 4
 Для пятой задачи выбран разработчик номер - 2

Рис. 5. Итоговое распределение работ

Выводы

Целью данной работы являлась разработка проблемно-ориентированной системы распределения поступающих задач по исполнителям с учетом множества критериев важности и временных ограничений. Получены следующие результаты, отличающиеся новизной.

1. Разработан алгоритм решения задачи распределения задач по исполнителям с точки зрения множества критериев, занятости специалистов решением задач, поступивших ранее, и временных ограничений. В качестве основы выбран метод имитации отжига.

2. Предложен предварительный вариант искомой ПОС, учитывающий особенности и ограничения, описанные выше.

3. Проведено тестирование работы данного алгоритма на различных исходных данных для оценки качества его работы и обоснованию его эффективности.

Следующим этапом будет являться последовательное тестирование разработанной си-

стемы на множестве данных, а также дополнение ее наличием расписания специалистов, учитывающим работы, которые пришли ранее.

Литература

1. Беленький А.С. Исследование операций в транспортных системах: идеи и схемы методов оптимизации планирования. М.: Мир, 1992. 582 с.
2. Вагнер Г. Основы исследования операций. Т. 1. Пер. с англ. М.: Мир, 1972. 336 с.
3. Олейникова С.А., Дятчина А.В. Разработка специального математического обеспечения системы управления потоком поступающих заявок // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 19. № 2. 2023. С.33-37.
4. Леякова Л.В., Харитонов А.Г., Чернышева Г.Д. Прикладные задачи о назначениях // Вестник ВГУ. Серия: Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 2. С. 22 -27.
5. Батищев Д.И. Генетические алгоритмы решения экстремальных задач: учебное пособие. Воронеж: ВГТУ, 1995. 65 с.
6. Пападимитриу Х., Стайглиц К. Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. М.: Мир, 1984. 512 с.

Поступила 13.06.2023; принята к публикации 15.08.2023

Информация об авторах

Дятчина Анастасия Владимировна – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: thenochnaya@mail.ru

Олейникова Светлана Александровна – д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2313>

Недикова Татьяна Николаевна – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных и вычислительных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nedikova.tatyana@mail.ru, тел. +79036508606, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9915-4242>

DEVELOPMENT OF A PROBLEM-ORIENTED SYSTEM FOR SOLVING OPTIMIZATION TASK OF MANAGING THE FLOW INCOMING APPLICATIONS

A.V. Dyatchina, S.A. Oleinikova, T.N. Nedikova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Annotation: the work is devoted to the development of methods and problem-oriented programs for the task of determining the best match between the flow of incoming applications and specialists who can fulfill them. In the classic version, this task is a task about assignments. The fundamental difference between the considered task and the known option is the use of several arbitrary criteria reflecting the quality of the chosen solution, the availability of a schedule of specialists servicing applications that came earlier, as well as time constraints on the performance of work. One of the combinatorial methods of discrete optimization, the method of simulated annealing, was chosen as an approach for developing the algorithm. It is advisable to use this method for complex NP-complete discrete optimization problems, to which the problem under study belongs. Special attention is paid to the development of a problem-oriented system, which is based on the practical implementation of the described algorithm. The structure of this system is developed, the database is designed, the main forms of the application are presented. In addition, the article presents the results of the proposed algorithm on test data. The developed algorithm and the problem-oriented system can be used at any enterprises and organizations in which it is required to solve the problem of distributing the flow of incoming applications to specialists from the point of view of a variety of criteria

Key words: optimization problem, problem-oriented system, multi-criteria optimization, annealing simulation method, assignment problem

References

1. Belenky A.S. "Research of operations in transport systems: ideas and schemes of planning optimization methods" ("Issledovaniye operatsiy v transportnykh sistemakh: idei i skhemy metodov optimizatsii planirovaniya"), Moscow, Mir, 1992, 582 p.
2. Wagner G. "Fundamentals of operations research" ("Osnovy issledovaniya operatsiy"), vol. 1, trans. from Eng, Moscow, Mir, 1972, 336 p.
3. Oleynikova S.A., Dyatchina A.V. "Development of special mathematical support for the flow control system of incoming applications", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 2, pp.33-37.
4. Lelyakova L.V., Kharitonova A.G., Chernysheva G.D. "Applied tasks on assignments", *The Bulletin of the Voronezh State University (Vestnik voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta)*, ser. System Analysis and Information Technologies, 2017, no. 2, pp. 22 -27.
5. Batishchev D.I. "Genetic algorithms for solving extreme problems" ("Geneticheskiye algoritmy resheniya ekstremal'nykh zadach"), Textbook, Voronezh, VSTU, 1995, 65 p.
6. Papadimitriou X., Steiglitz K. "Combinatorial optimization. Algorithms and complexity", Moscow, Mir, 1984, 512 p.

Submitted 13.06.2023; revised 15.08.2023

Information about the authors

Anastasiya V. Dyatchina - Postgraduate student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: thenochnaya@mail.ru

Svetlana A. Oleynikova – Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2313>

Tatyana N. Nedikova – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nedikova.tatyana@mail.ru, +79036508606, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9915-4242>

РАЗРАБОТКА ПРОТОТИПА ПРОГРАММНО-АППАРАТНОГО КОМПЛЕКСА СИНХРОННО-ВЕКТОРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ НА БАЗЕ GPS-СИНХРОНИЗИРОВАННОГО АНАЛОГО-ЦИФРОВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

В.А. Казбанов, М.С. Курицкий, А.Н. Алещенко, В.М. Анискевич

Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта, г. Калининград, Россия

Аннотация: рассматривается проблема нехватки доступных аппаратных и программных средств цифрового мониторинга в режиме реального времени состояния различных параметров сети, субъектов генерации и передачи электроэнергии (таких как мощность, сдвиг фаз, частота и прочее). Проанализировано, что для эффективного реагирования на различного рода искажения и аварии в линии передачи необходима синхронизация полученных из разных частей сети измерений, учитывая, что данные по этой сети передаются с огромной скоростью, а сама сеть имеет большую протяжённость. В исследовании изучается эффективный метод решения описанных проблем, заключающийся в создании и внедрении устройств на базе технологий синхронно-векторных измерений, использующих синхронизацию времени глобальными позиционирующими системами. Обращается внимание на то, что зарубежные аналоги таких устройств являются дорогостоящими, обладают закрытыми конструкционными и программными сведениями. В работе представлены результаты разработки авторами прототипа программно-аппаратного комплекса синхронно-векторных измерений на базе GPS-синхронизированного АЦП, который является недорогой, но перспективной и открытой альтернативой коммерческим предложениям. Предлагается собственное программное обеспечение, полностью реализующее процессы получения измерений, их обработки и отображения результата конечному пользователю на странице веб-сервера с доступом как по локальной, так и из внешней сети

Ключевые слова: синхронно-векторные измерения, электроэнергетика, цифровая обработка сигналов, микроконтроллеры, GPS/ГЛОНАСС, программно-аппаратный комплекс, системы диагностики электросетевого оборудования

Введение

Современная энергетика в настоящее время сталкивается с целым рядом серьёзных проблем. Ввиду активной электрификации различных человеческих сфер деятельности потребность в энергоресурсах нарастает с каждым годом [1]. При этом количественно ежегодные потери электроэнергии до сих пор остаются на довольно высоком уровне [2]. С другой стороны, необходимо отметить современную тенденцию по переходу к «зелёной энергетике» и возобновляемым энергоресурсам [3]. Такой подход, конечно, положительно сказывается на экологии, однако источники «зелёной» энергии имеют более низкую эффективность.

В конечном счёте, совмещая падение генерируемых мощностей с повышением потребляемых, получаем острую необходимость в контроле и минимизации любых нежелательных потерь на пути от производителя электроэнергии к её потребителю. Можно заключить, что современная энергетика действительно нуждается в средствах управления генерируемой и передаваемой электроэнергией, а также в программно-аппаратных мощностях для непосредственного мониторинга этой электроэнергии [4,

5]. Кроме того, если рассматриваемая сеть имеет большую протяжённость, возникает проблема синхронизации полученных измерений. Ведь для принятия критических решений о перераспределении генерируемых мощностей необходима высокая точность сведений о состоянии сети в реальном времени.

Все эти факторы создают новые проблемы при эксплуатации, планировании и защите распределительных сетей и подстанций, а также при управлении ими. В попытке минимизировать эти риски и исключить потери современная промышленность всё более активно занимается внедрением так называемых интеллектуальных сетей и цифровых подстанций на объекты генерации и передачи электроэнергии [4]. Основной целью внедрения цифровых подстанций является автоматизация электросетей. Получаемые в реальном времени сведения о состоянии сети позволяют в автоматическом режиме планировать генерацию электроэнергии, осуществлять контроль переходных процессов, отключать или восстанавливать систему в случае аварии, прогнозировать дальнейшее потребление мощностей.

Основу цифровых подстанций составляют устройства на базе синхронно-векторных измерений (УСВИ), где используется синхронизация времени глобальными позиционирующими системами, такими как GPS или ГЛОНАСС.

Такие устройства быстро становятся стандартной частью оборудования, используемого на передающих подстанциях с целью анализа неисправностей, и уже много лет пользуются популярностью в литературе как краеугольный камень многих концепций защиты и управления в режиме реального времени [6, 7].

Сама задача синхронизации, вообще говоря, актуальна для многих приложений, включая системы промышленного назначения в телекоммуникациях, банковском секторе, военном деле, нефтегазовой и транспортно-логистической отраслях, где используется обработка данных в реальном времени. Авторами, однако, было принято решение рассматривать разработку и применение УСВИ именно через призму проблем в энергетике в связи с наибольшим спросом подобных отечественных решений в этой отрасли.

1. Метод синхронно-векторных измерений

1.1. Устройство фазовых измерений PMU

Синхронно-векторные измерения (СВИ) (англ. Synchrophasor Measurements) — это технология множественных одновременных измерений одного или нескольких параметров протяжённой системы посредством анализа разности частот, фаз, напряжений и токов в разных её участках. Ярким примером области применения такой технологии являются электрические подстанции и линии электропередач между ними. Синхронизация в таких системах осуществляется путём координирования с глобальными позиционирующими системами (GPS, ГЛОНАСС и тому подобное). Специфику синхронно-векторных измерений исчерпывающе описывают такие международные стандарты, как IEEE 1588 и IEEE C37.118.1 [8, 9].

В основе СВИ лежит цифровое устройство фазовых измерений — PMU (Phasor Measurement Unit), способное оценить с высокой точностью синхрофазу, частоту и первую производную частоты по времени измеряемых напряжений и токов. **Синхрофаза или синхровектор** — это амплитуда и угол сигнала синусоидальной формы (тока или напряжения), измеренного в конкретный момент времени.

Сигнал поступает в PMU сразу с преобразователя напряжения и тока. Далее производится его дискретизация. Время дискретизации сигнала является постоянным и базируется на точном времени от геопозиционирующих систем, работающих с микросекундной точностью. Для дискретизации сигнала после его

фильтрации используется АЦП (аналого-цифровой преобразователь). Полученные данные формируются в специальный цифровой пакет, к которому прикрепляется временная метка, и далее отправляются в концентраторы фазовых данных PDC (Phasor Data Concentrators). PDC представляют собой специальные накопительные устройства, используемые для хранения данных в режиме оффлайн, а также дальнейшей их отправки для анализа состояния системы в реальном времени.

На рис. 1 изображена структурная блок-схема PMU [10], отражающая процесс захвата входных сигналов с последующим их преобразованием в синхрофазу. Точная временная метка координируется сигналом со спутника, а её тактирующий сигнал 1PPS используется для фазовой автоподстройки частоты захвата входных сигналов. В течение секунды происходит накопление показаний и одновременно отправка по локальной сети и цифровая обработка измерений за предыдущую секунду.



Рис. 1. Блок-схема устройства фазовых измерений (PMU) [10]

Проще говоря, PMU производит выборку сигналов напряжения и тока синхронно с сигналом времени, вещаемым со спутника, что позволяет сравнивать вычисленные параметры формы сигнала в одном месте с параметрами из других мест в широкой географической области. Таким образом, на основе полученных данных возможно обнаружение и дальнейшее исследование различных переходных процессов во всей сети одновременно.

1.2. Методы синхронизации точного времени

Синхронизация времени в промышленных сетях необходима для согласования работы устройств и приложений, осуществляющих обработку данных в режиме реального времени. Синхронизация также требуется в системах мониторинга и управления с целью протоколирования возникающих событий и своевременного реагирования.

Существует несколько методов синхронизации времени [11]. В **одностороннем методе** ведущие часы (Master) отправляют информацию о времени на ведомые часы (Slave). Ведомые используют полученные данные, учитывая задержку на передачу информации, для синхронизации своего времени. Задержка может быть измерена или рассчитана. Такой метод может быть использован только в тех системах, где есть возможность передачи данных, и путь от ведущих часов к ведомым не изменяется. В противном случае при синхронизации будет некорректно рассчитываться задержка. При использовании одностороннего метода следует учесть, что в любой системе могут возникать помехи и шумы, которые влияют на время передачи информации, однако, так как связь односторонняя, отследить такие колебания в задержке невозможно.

В **двустороннем методе** между ведущими и ведомыми часами создаётся двусторонняя связь. Необходимость в такой конструкции возникает для корректного определения задержки на передачу данных при синхронизации по сети. Ведущие и ведомые часы обмениваются сообщениями с метками времени, после чего рассчитывается задержка, которая учитывается в алгоритмах синхронизации.

В зависимости от решаемых задач могут потребоваться разные уровни точности синхронизации времени. В табл. 1 приведена точность некоторых методов синхронизации времени стандарта IEEE 1588 [8].

Из таблицы можно сделать вывод, что наиболее точным и наиболее подходящим методом синхронизации в протяженных сетях является GPS (ГЛОНАСС). В проведённом исследовании использовались три метода синхронизации, последовательно преобразуемых друг в друга: GPS → IRIG-B → 1PPS.

GPS (Global Positioning System) – это глобальная система позиционирования, синхронизация времени в которой осуществляется в момент определения местонахождения устройства, оснащенного GPS-приемником. Для этого устройство ловит сигнал со спутников, установленных на околоземной орбите. Каждый из

спутников имеет атомные часы, за счет чего система GPS обеспечивает хорошую точность. Минусом данного метода является обязательное наличие GPS-антенны, сигнал у которой может быть нестабильным.

Таблица 1

Точность различных методов синхронизации времени стандарта IEEE 1588

	Точность	Метод синхронизации	Сеть
GPS	< 1 мкс	Односторонний	Беспроводная
1PPS	< 1 мкс	Односторонний	Отдельная проводная
IRIG-B	10 мкс – 1 мс	Односторонний	Отдельная проводная
NTP	0,5 – 100 мс	Двусторонний	Интернет
SNTP	1 – 50 мс	Двусторонний	Локальная
PTP	< 1 мкс	Двусторонний	Локальная

IRIG-B (Inter-Range Instrumentation Group Timecodes) – информация о дате и времени передаётся вместе с импульсным сигналом синхронизации. Коды семейства IRIG используют выделенную сеть для передачи информации. Сеть может быть построена на оптическом волокне, витой паре или коаксиальном кабеле.

1PPS (1 pulse per second) – сигнал, не содержащий непосредственно метки времени. Ведущее устройство посылает один импульс в секунду по отдельной сети (по оптоволокну, витой паре или коаксиальному кабелю). Ведомые часы используют этот импульс только для синхронизации начала каждой секунды. Устройства не могут получить из такого сигнала информацию о дате и времени, поэтому такой протокол чаще всего используют в паре с другими, например с NTP.

2. Разработка прототипа УСВИ

2.1. Общая структурная схема устройства

Основными блоками системы синхронно-векторных измерений, как уже отмечалось ранее, являются подсистема синхронизации времени по GPS/ГЛОНАСС, блоки векторных измерений PMU, концентратор данных векторных измерений PDC (Phasor Data Concentrator), а также коммуникационное оборудование и программное обеспечение (ПО) для анализа и визуализации полученных данных.

Фундаментом такой системы является синхронизированный по времени аналого-цифровой преобразователь (АЦП), каждый отсчет которо-

го снабжен меткой глобального времени, что позволяет сравнивать вычисленные параметры сигналов в одном месте с параметрами сигналов из других мест в широком географическом пространстве. Упрощённая структурная схема разработанного авторами прототипа программно-аппаратного комплекса изображена на рис. 2.

На вход схемы подаётся нормализованный измеряемый аналоговый сигнал в виде напряжения, изменяющегося в пределах 0–3,3 В. Далее по сигналу PPS запускается последовательность оцифровки полученного сигнала при помощи АЦП. Каждое дискретное значение записывается в память контроллера, формируя в ней блоки (страницы) с показаниями с обоих входных каналов за несколько последних секунд. Каждому блоку присваивается метка времени. По мере необходимости верхний уровень запрашивает последнюю сформированную страницу с измерениями из памяти контроллера. Передача данных осуществляется через последовательный порт по USB.

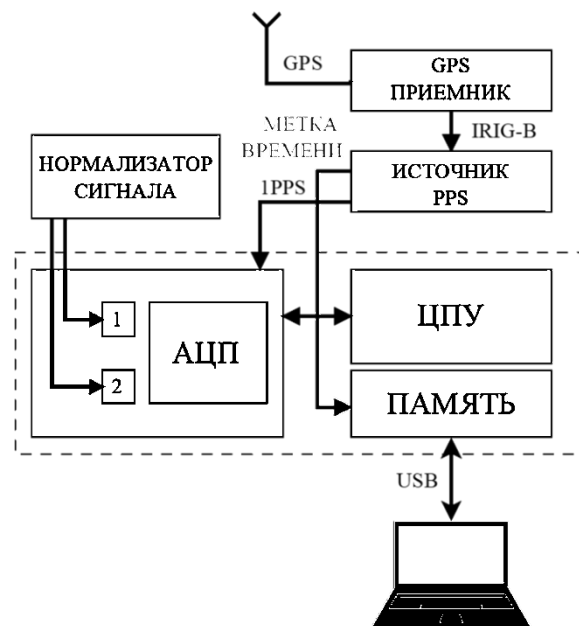


Рис. 2. Упрощенная структурная схема GPS-синхронизированного АЦП

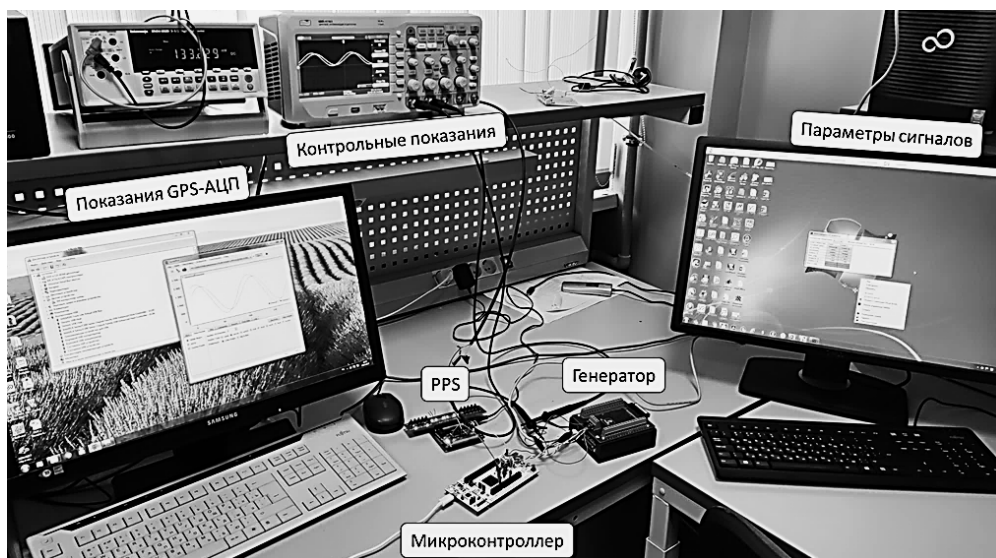


Рис. 3. Лабораторная установка «Программно-аппаратный комплекс СВИ»

Стоит отметить, что выделенные на рис. 2 нормализатор измеряемого сигнала, источник PPS и GPS-приёмник не являются частью микроконтроллера, а их задачи выполняют отдельные устройства. Границы микроконтроллера обозначены пунктирной линией.

Нормализатор сигнала необходим для преобразования входного сигнала в колебания напряжения в рабочих пределах используемого АЦП. В качестве источника нормализованного сигнала в разработанном прототипе используется цифровой генератор сигналов Zet210 от компании ZetLab (рис. 3, в центре). Генератор создаёт два синусоидальных сигнала с частотой

50 Гц, смещённых по фазе друг относительно друга на некоторое значение. Амплитуда генерируемых сигналов находится в пределах 0–2 В. Управление генератором происходит через компьютер в приложении ZetLab (рис. 3, справа). Для снятия контрольных показаний на выходе генератора используется осциллограф (рис. 3, сверху).

Для формирования сигнала точного времени в формате IRIG-B в прототипе используется часть оборудования компании «Prosoft Systems», а именно – судовая GPS-антенна и источник сигнала синхронизации ИСС-1.3 (на рис. 3 не значатся). Сформированный сигнал

далее поступает на программируемую логическую интегральную схему (ПЛИС) FPGA ALTERA MAXII (рис. 3, в центре), где происходит извлечение временной метки и выдача импульса 1PPS (Pulse Per Second — импульс в секунду).

Наконец, в качестве микроконтроллера в прототипе используется плата STM32 линейки Nucleo-144 Discovery с микроконтроллером STM32F767Zi (рис. 3, снизу). На одной плате имеется всё необходимое для разработки, включая точный высокочастотный АЦП, а также модуль отладчика и программатора ST-Link. Возможность отладки программного обеспечения в реальном времени значительно упрощает процесс разработки, позволяя просматривать состояние процессорного ядра, памяти и регистров периферии с рабочего компьютера. Данным контроллером также поддерживается передача данных по последовательному порту через USART (по USB).

Данные с GPS-АЦП транслируются на другом мониторе (рис. 3, слева), где осуществляется приём и обработка снятых показаний.

2.2. Алгоритм формирования и отправки блоков измерений

Процесс формирования блока (страницы) с оцифрованными входными сигналами начинается по сигналу 1PPS, формируемому в ПЛИС. Получаемые в течение секунды измерения необходимо накапливать в памяти микроконтроллера. Каждый блок содержит $256 \cdot 50 \cdot 2 = 25600$ строк (на каждый из двух каналов с учетом частоты входного сигнала в 50 Гц по 256 измерений на каждый период волны синусоиды). Количество страниц (блоков) всегда фиксировано. По ежесекундному импульсу происходит ротация активного блока, в который непрерывно с указанной частотой производятся записи измерений с АЦП. Такой алгоритм является компромиссом, позволяющим уместить несколько сформированных и одно формируемое измерение в ограниченном объеме памяти.

Каждое дискретное значение напряжения занимает 12 бит, однако плотная упаковка измерений требует дополнительных циклов процессора на сдвиг и соединение битов в слова, кратные восьми. Целесообразным (с учетом дополнительных затрат памяти) является выделение по 16 бит (2 байта) на каждое дискретное значение напряжения. Таким образом, получаем количество бит в одной странице:

$$256 \cdot 50 \cdot 2 \cdot 16 = 409600 \text{ бит.}$$

Передача такого числа бит даже на максимально поддерживаемой частоте передачи (256000 bps) займёт 1,6 секунды. Если выполнять блокирующую передачу с использованием ядра процессора, получается лаг в измерениях АЦП, то есть пропуск более одной секунды измерений, что является недопустимым для такого рода устройств. Во избежание такой задержки задача передачи данных по серийному порту была переложена на модуль DMA (Direct Memory Access — прямой доступ к памяти), не блокирующий работу процессора во время своей работы. DMA взаимодействует только с выделенным для него участком памяти.

В качестве рабочей для DMA выделяется область памяти из резервного блока. В момент получения запроса на передачу блока данных с верхнего уровня происходит подмена ячеек резервного и одного из рабочих блоков. Рабочий блок с данными помещается на место резервного, и с него в асинхронном режиме начинается передача данных по серийному каналу USART. Поскольку за одну секунду формируется блок из $256 \cdot 50 \cdot 2$ измерений, АЦП работает с частотой $256 \cdot 50 = 12800$ Гц. За каждый такт таймера происходит два последовательных измерения с двух входных каналов по очереди.

В случае увеличения числа входных каналов будет увеличиваться и их отставание от момента подачи сигнала 1PPS. Однако в этом случае отставание соизмеримо с несколькими тактами процессорного ядра и зависит от режима измерений самого АЦП. В случае самой минимальной длительности измерения в 3 цикла лаг между двумя каналами в идеальном случае составит:

$$\frac{3 \text{ цик}}{256 \text{ МГц}} \approx 85 \cdot 10^{-6} \text{ с} = 85 \text{ мкс.}$$

Учитывая затраты в циклах на прочие операции по чтению/записи значений в регистры/память, такого рода задержка является пренебрежимо малой.

2.3. Программное обеспечение

В качестве языка программирования для микроконтроллера был выбран язык Rust. Это современный аналог языка C, мультипарадигменный высокоуровневый компилируемый язык программирования со статической типизацией, гарантирующий безопасность работы с памятью и не имеющий сборщика мусора.

В качестве среды разработки и отладки ПО для микроконтроллера был выбран современный инструмент Intellij IDEA от чешской

компании JetBrains. Для прошивки программы микроконтроллера STM32F767ZI используется официальный драйвер для программатора St-Link V2-1.

Для задания параметров генерируемых сигналов используется базовая версия ПО от компании-разработчика генератора ZET210 – ZetLab Base. Для приёма измеренных показаний по серийному порту с микроконтроллера (через USB) и отправки команды для начала передачи на этапе отладки используется программа SerialPlot.

Приёмная часть установки находится под управлением OS Ubuntu (на базе ядра Linux). Такое техническое решение способствует исчезновению проблем с драйверами ST-Link и значительному приросту производительности компьютера.

2.4. Обработка результатов измерений

По запросу пользователя программа

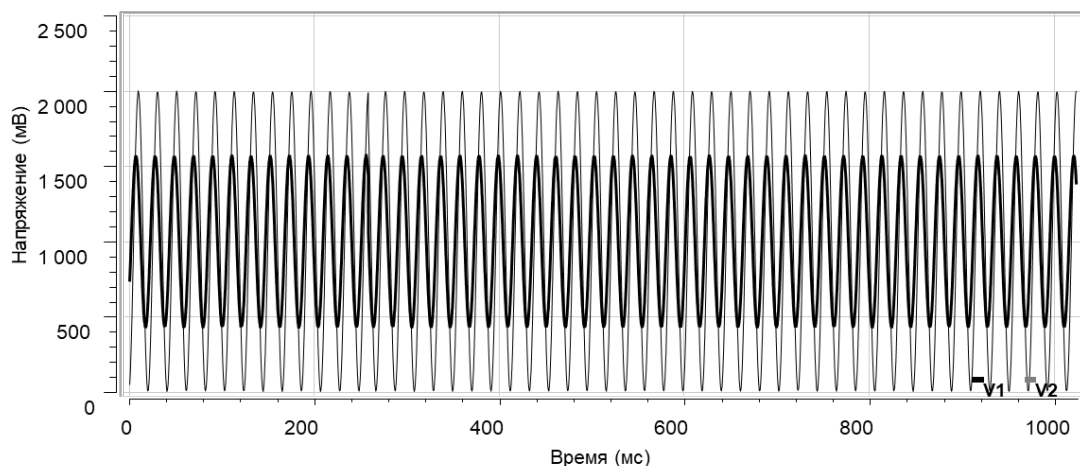


Рис. 4. Показания с GPS-АЦП за одну секунду (SerialPlot)

SerialPlot поддерживает экспорт исходных данных для построения в формате CSV. Проанализировав исходные данные в формате CSV средствами Matlab или Octave, можно получить Фурье-образ оцифрованного сигнала (рис. 5), а также представить фазу и амплитуду входных сигналов в векторном виде (рис. 6).

Один из входных сигналов на рис. 6 выбран в качестве эталонного, а его фаза зафиксирована в нуле. Также на этом рисунке отчетливо видно, что разница фаз между сигналами на двух входных каналах составляет 45° . Показания в точности совпадают с параметрами генерируемого сигнала, заданными в окне настроек ZetLab.

SerialPlot отправляет по серийному порту команду на микроконтроллер для передачи блока данных за последнюю секунду. Полученные показания (рис. 4) интерпретируются по заданному алгоритму таким образом, чтобы извлечь из байтовой последовательности показания различных каналов с заданным размером слова, числом каналов, размером буфера, градацией осей OX и OY и так далее. В экспериментальной установке использовался размер буфера на 12800 отсчетов, в два канала, с порядком байт от младшего к старшему, по два байта на отсчет. На рис. 4 также отчетливо видны 50 периодов синусоиды в секунду, то есть заданная в настройках генератора частота в 50 Гц. Стоит ещё раз отметить, что весь интервал оси времени на рис. 4 равен ровно одной секунде, так как снятие показаний происходит в интервале между двумя сигналами 1PPS с заданной частотой дискретизации. Иными словами, на одну секунду приходится 12800 дискретных значений напряжения с точностью 12 бит.

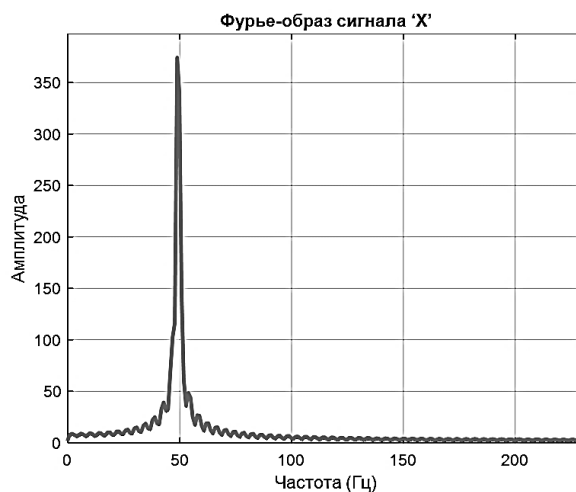


Рис. 5. Фурье-образ одного из входных сигналов с отчетливо наблюдаемым пиком на частоте 50 Гц

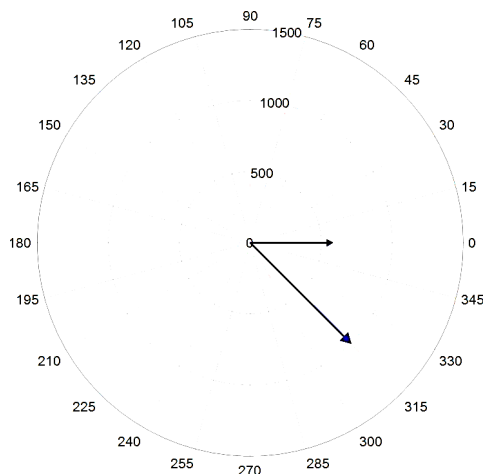


Рис. 6. Фаза и амплитуда входных сигналов в векторном виде

Способ обработки измерений в программной среде Matlab, однако, имеет некоторые неудобства, так как заставляет производить множество манипуляций в несвязанных между собой программах для извлечения, последующей конвертации и обработки полученных измерений. Ввиду этого в рамках разработки программно-аппаратного комплекса СВИ было разработано также собственное ПО, полностью реализующее процессы получения измерений, их обработки и отображения результата конечному пользователю (рис. 7).

Все промежуточные этапы обработки между конечным пользователем и драйвером последовательного порта были заменены веб-сервером, осуществляющим процесс коммуникации с микроконтроллером.

По команде пользователя сервер запрашивает показания, занимается выгрузкой буфера с этими показаниями из подключенного по последовательному каналу микроконтроллера, а затем их обрабатывает, генерируя Фурье-спектры и образы входных сигналов в векторном виде с заданными фазой и амплитудой (рис. 8). Частотные спектры создаются при помощи быстрого преобразования Фурье комплексной переменной. Фаза и амплитуда комплексной величины соответствуют фазе сигнала и его амплитуде в вольтах.

Для отображения графиков на стороне браузера используется JS-библиотека с открытым кодом – Plotly. Для отображения элементов управления (кнопок, списков) используется открытый фреймворк Bootstrap 5.

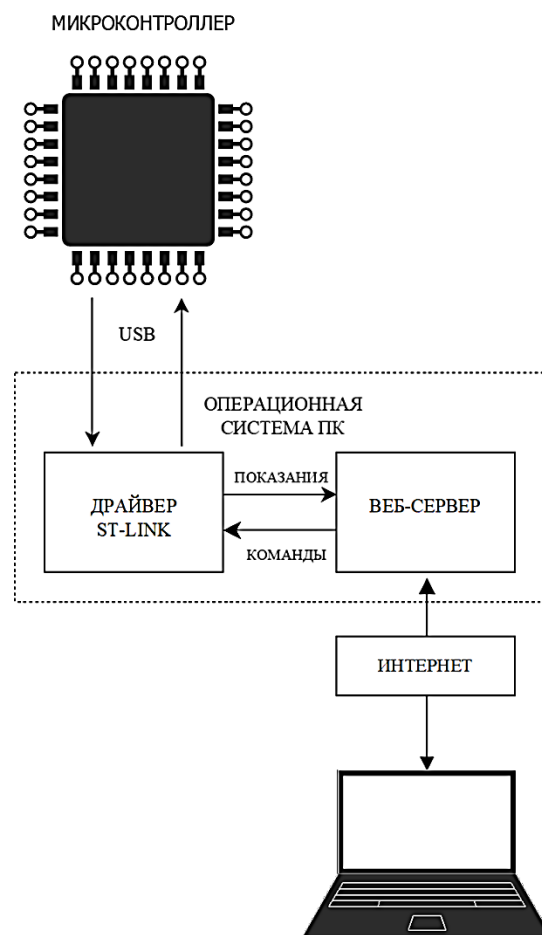


Рис. 7. Структурная схема автоматизированной системы обработки измерений с возможностью удаленного доступа

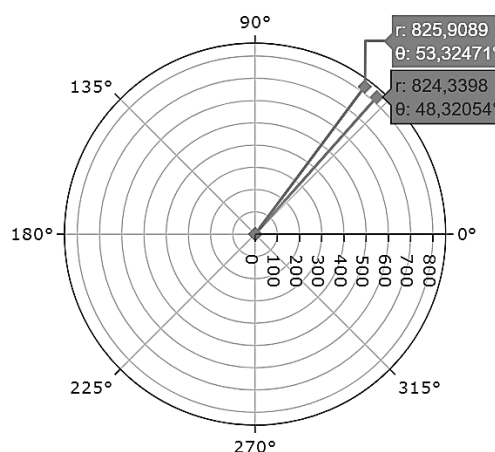


Рис. 8. Векторный вид входных сигналов с разностью фаз в 5 градусов (показания с веб-сервера)

Доступ к веб-серверу осуществляется из локальной сети (включая компьютер, на котором выполняется бинарный файл веб-сервера). Кроме того, оператору предоставляется возможность удаленного доступа к серверу с любого портативного устройства (телефона или

планшета), имеющего в своей операционной системе браузер. Загружается html-страница с интерактивными диаграммами оцифрованных входных сигналов и их основных характеристик: амплитуды, фазы и частоты.

Стоит отметить, что частотные спектры входных сигналов отображаются на веб-странице сервера не просто для интерактивного представления параметров полученного сигнала. Они выполняют важнейшую задачу по обнаружению и мониторингу помех и искажений в сети, так как в случае возникновения различ-

ного рода искажений сигнала в его спектре появляются явно заметные гармоники.

Рассмотрим в качестве примера два сигнала, параметры которых задаются в настройках генератора. Пусть один сигнал будет «нормальным» – синусоидальным, а другой «искажённым» – меандром (рис. 9). В спектре второго сигнала (рис. 10), полученном в результате быстрого преобразования Фурье, будут отчётливо различаться гармоники (справа от основного пика), свидетельствующие об «искажённой» прямоугольной форме этого сигнала.

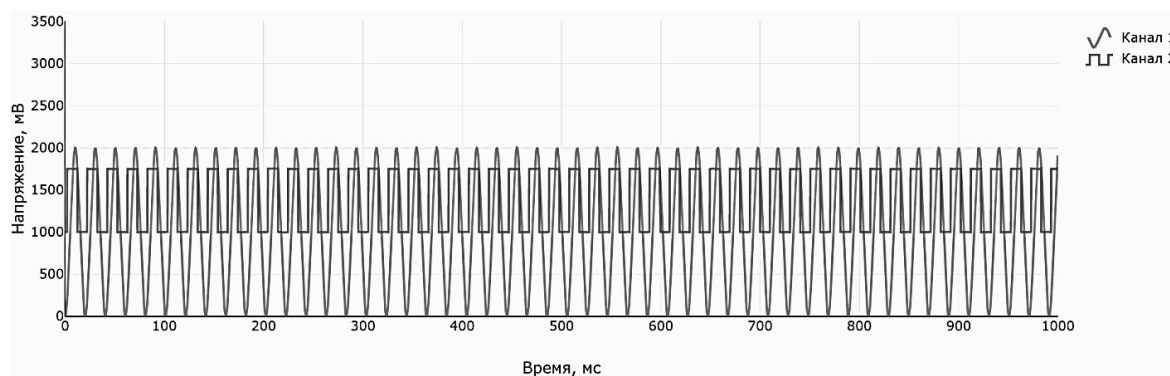


Рис. 9. Пример входных сигналов. Синус и меандр. Частота 50 Гц (показания с веб-сервера)

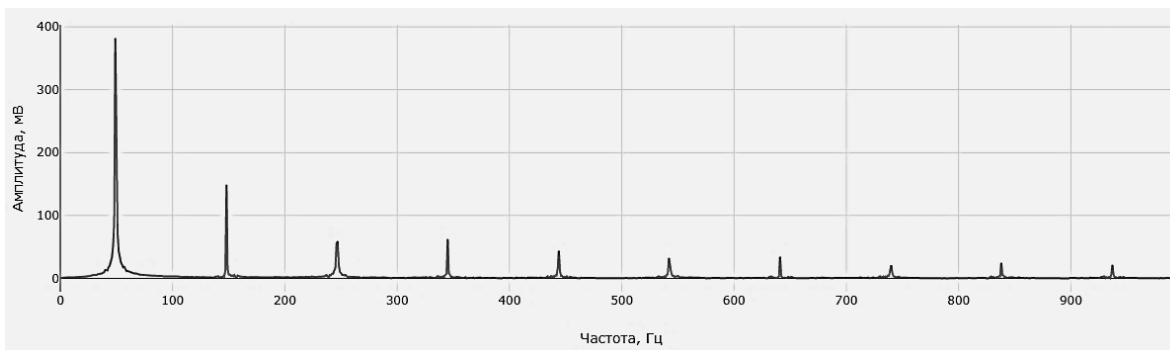


Рис. 10. Спектр второго сигнала с отчётливо различимыми гармониками (показания с веб-сервера)

Обзор аналогичных решений и перспективы исследования

Устройства синхронизированных векторных измерений обеспечивают постоянный мониторинг электрических величин по всей энергосистеме в режиме реального времени с целью предотвращения развития аварийных ситуаций. Они используются для распределения систем управления, проверки модели системы, мониторинга запаса устойчивости, контроля напряжения и фазовых углов в узлах энергосистемы, а также визуализации динамических характеристик системы. Приложения PMU, конечно, сталкиваются и со многими проблемами в си-

стемах распределения, такими как недостаточная точность векторных измерений и отсутствие сетевой инфраструктуры связи, которая может поддерживать большое количество датчиков и исполнительных механизмов с различными технологиями [4]. Однако несмотря на это, устройства синхронизированных векторных измерений с каждым годом подвергаются всё более активным процессам внедрения и модернизации, составляют основу новейших цифровых подстанций, систем защиты и управления.

Поскольку рынок аппаратных и программных решений для синхронно-векторных измерений является нишевым, на нём доминируют современные гиганты измерительной электроники,

такие как Siemens (Wide Area Monitoring system SIGUARD PDP [12]), Valiant (Synchrophasor Measurement Unit VCL-PMU-30 [13]) и Electro Industries (Nexus 1450 [14]). Такие импортные аппаратные решения относятся к категории дорогостоящих (порядка \$10000) и требуют специальной профессиональной подготовки к эксплуатации, а также наличие соответствующего ПО. Более того, конструкционные и программные сведения в данной области в большинстве своём являются закрытыми и носят конфиденциальный характер. Существуют, конечно, и так называемые решения с «открытыми источниками» [15], однако доступ к содержанию таковых решений не является в полной мере открытым, бесплатным и не описывает в деталях процесс создания устройств СВИ. В таких материалах СВИ рассматривают только с математической, либо сугубо алгоритмической точки зрения, упуская самую важную составляющую – непосредственное устройство GPS-синхронизированного АЦП, его структуру, аппаратные требования и прочие детали реализации. «Закрытый» характер аппаратного и программного обеспечения этих устройств делает их ограниченно применимыми для научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ.

Все промышленные аналоги УСВИ отличаются высокой тактовой частотой работы встроенных микропроцессоров (порядка 1 – 3 ГГц), а также имеют высокоточные 16-битные АЦП (в разработанном прототипе точность оцифровки составляет 12 бит). Неотъемлемой частью любого коммерческого решения также является высокая совместимость с различными протоколами и каналами связи. Например, для получения точного времени в устройствах от Valiant можно использовать на выбор порты GigE Ethernet, 1PPS, IRIG-B или же внешнюю GPS-антенну. УСВИ от Electro Industries имеет встроенный веб-сервер с отображением показаний в реальном времени на базе технологий HTML5. Также эти аналоги в базовой комплектации поддерживают снятие показаний с трёхфазных источников питания (3 канала для напряжений и 3 для токов). Разработанный авторами прототип способен измерять пока лишь только два канала напряжения.

Авторами планируется глубокая модернизация программно-аппаратного комплекса. На данный момент наиболее избыточной частью стенда является установка от Prosoft Systems, у которой задействуется лишь один модуль, необходимый для получения точного времени в формате IRIG-B. Авторами проведётся замена громоздкого стороннего комплекса обычной

GPS/ГЛОНАСС антенной и ещё одним микроконтроллером, производящим преобразование сообщений стандарта NMEA (используемого в GPS-приёмниках) в стандарты IRIG-B и 1PPS. Кроме того, проведётся замена отладочного микроконтроллера STM32F767ZI на аналог из младшей, более дешевой, но не менее производительной линейки – STM32F411CE. Также несмотря на дороговизну и наличие отладочного режима, скорость передачи данных по встроенному эмулятору последовательного порта в используемом сейчас микроконтроллере ограничена до 256 кбит/с. В следующей версии прототипа планируется использовать внешний преобразователь USART в USB для увеличения максимальной скорости передачи уже до 3 Мбит/с, в следствии чего появится возможность увеличить максимальное количество считываемых каналов с 2 до 24. Конечной целью данного этапа проводимой работы является сборка всей установки на одной печатной плате, создание пластикового корпуса средствами 3D-печати, а также добавление возможности наблюдения за формой сигнала в режиме реального времени на веб-сервере.

Заключение

Авторам в процессе этого научного исследования удалось разработать и сконструировать полноценный, работоспособный и дешёвый в изготовлении (себестоимость комплектующих меньше 10 тыс. руб.) прототип программно-аппаратного комплекса синхронно-векторных измерений с полностью собственным программным обеспечением и аппаратными комплектующими, которые легко могут быть заменены аналогичными отечественными продуктами (микроконтроллерами, ГЛОНАСС-антеннами).

Аппаратная часть разработанного комплекса включает в себя GPS-синхронизированный АЦП на базе микроконтроллера, а программная часть — непосредственно программирование микроконтроллера, а также веб-сервер для оперативной обработки снятых показаний.

Применение комплекса, конечно, пока ограничено малым числом входных каналов. Тем не менее, это никоим образом не мешает использовать подобного рода устройство в однофазных сетях небольших хозяйств, например, в небольшой котельной или насосной станции. Стоит также учесть, что этап преобразования входных сигналов к векторному виду вовсе не является обязательным, и устройство можно использовать в качестве обычного GPS-синхронизированного АЦП для снятия сигнала

лов прочего (негармонического) вида: температуры, влажности и тому подобного.

В связи с высокой востребованностью такого рода оборудования государственными компаниями в секторе энергетики становится очевидной необходимость дальнейшей модернизации программно-аппаратного комплекса для применения уже в промышленных масштабах.

Литература

1. «Электробаланс и потребление электроэнергии в Российской Федерации с 2005-2021гг». Федеральная служба государственной статистики: официальный сайт. URL: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (дата обращения: 12.02.2023).
2. «Показатели энергетической эффективности субъектов электроэнергетики. Показатели по итогам деятельности за 2021 год». Министерство энергетики РФ: официальный сайт. URL: <https://minenergo.gov.ru/node/22764> (дата обращения: 12.02.2023).
3. Oettinger G. Energy Roadmap 2050. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012. 20 p.
4. A comprehensive survey on phasor measurement unit applications in distribution systems / M. Hojabri, U. Derch, A. Paraemmanouli, P. Bosshart // *Energies*. 2019. Vol. 12. № 23. Pp. 1–23.
5. Phadke A., Thorp J. Synchronized phasor measurements and their applications. Second Edition. Springer International Publishing: Power Electronics and Power Systems, 2017. 285 p.
6. Synchrophasor-based power system protection and control applications / E.O. Schweitzer, D. Whitehead, G. Zweigle, K.G. Ravikumar // *Modern Electric Power Systems*. 2010. P. 1–10.
7. Lavery D., Best R.J., Morrow D.J. Loss-of-mains protection system by application of phasor measurement unit technology with experimentally assessed threshold settings /

D. M. Lavery // *IET Generation, Transmission and Distribution*. 2015. Vol. 9. № 2. Pp. 146–153.

8. IEEE Std 1588™ – 2008, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, IEEE Instrumentation and Measurement Society. 2008.

9. IEEE Std C37.118.1™ – 2011, IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Power and Energy Society. 2011.

10. GPS-disciplined analog-to-digital converter for phasor measurement applications / X. Zhao [et al.] // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*. 2017. Vol. 66. № 9. P. 2349–2357.

11. «Синхронизация точного времени. Стандарт IEEE 1588». Официальный дистрибьютер Мохэ Инс. в России, компания Ниеншанц-Автоматика: официальный сайт. URL: https://moxa.ru/tehnologii/power_systems/sinhronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/ (дата обращения: 12.02.2023).

12. «Phasor Measurement Unit (PMU)». Siemens: официальный сайт. URL: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/general-protection/phasor-measurement-unit-pmu.html> (дата обращения: 14.02.2023).

13. «VCL-PMU-30, Phasor Measurement Unit (PMU)». Valiant Communications: официальный сайт. URL: <https://valiantcom.com/pmu/phasor-measurement-unit.html> (дата обращения: 14.02.2023).

14. «Nexus 1450 Cyber Secure Power Quality Meter with Multiport Communication». Electro Industries/GaugeTech Inc.: официальный сайт. URL: <https://www.electroind.com/products/nexus-1450-cyber-secure-power-quality-meter-with-multiport-communication/> (дата обращения: 14.02.2023).

15. Lavery D., Hastings J., Zhao X. An open-source analogue to digital converter for power system measurements with time synchronisation // 2017 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC). 2017. Pp. 1–5.

Поступила 27.04.2023; принята к публикации 07.08.2023

Информация об авторах

Казбанов Виктор Алексеевич – магистрант 1-го года обучения Высшей школы междисциплинарных исследований и инжиниринга образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (236041, Россия, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), e-mail: kazbanov2000@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7790-2489>

Курицкий Михаил Сергеевич – магистрант 1-го года обучения Высшей школы междисциплинарных исследований и инжиниринга образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (236041, Россия, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), e-mail: MiKuritskii@stud.kantiana.ru, Mix-Mux@yandex.ru, тел. +7-921-109-88-21, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4125-4678>

Алешченко Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, доцент образовательно-научного кластера «Институт высоких технологий», Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (Россия, 236041, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), e-mail: AAleshchenko@kantiana.ru

Анискевич Вячеслав Михайлович – заведующий лабораторией конструкторского бюро, Балтийский федеральный университет имени Иммануила Канта (236041, Россия, г. Калининград, ул. А. Невского, 14), e-mail: anis-1vm@rambler.ru

DEVELOPING A PROTOTYPE OF SOFTWARE-HARDWARE SYSTEM FOR SYNCHROPHASOR MEASUREMENTS BASED ON GPS-DISCIPLINED ANALOG-TO-DIGITAL CONVERTER

V.A. Kazbanov, M.S. Kuritskiy, A.N. Aleshchenko, V.M. Aniskevich

Immanuel Kant Baltic Federal University, Kaliningrad, Russia

Abstract: this article addresses the issue of a lack of software-hardware solutions for real-time digital monitoring of various grid parameters, its generation and transmission subjects (power, phase shift, frequency, etc.). It has been analyzed that an effective response to a various distortions and failures of the grid a synchronization needed when measuring its parameters across different areas, considering that data transfer rates are fast and the grid itself is widespread. The study describes an effective method for solving such problems by developing and introducing new devices based on the synchrophasor measurement technology, that use time synchronization from Global Positioning Systems. It should be noted that foreign analogues of such devices are expensive, and their constructional details are closed. The result of this work is a complete prototype of a software-hardware complex for synchrophasor measurements based on GPS-disciplined ADC, which is a cheap, yet perspective and open analogue to many commercial solutions. A software, built from scratch, completely implements the processes of acquiring, processing and displaying measurement results to the end user on a webpage with an access from a local or a global network

Key words: synchrophasor measurements, electrical energy industry, digital signal processing, microcontrollers, GPS/GLONASS, software-hardware system, grid equipment diagnostic systems

References

1. «Electric balance and electricity consumption in the Russian Federation in 2005-2021», Federal State Statistics Service: official website, available at: https://rosstat.gov.ru/enterprise_industrial (accessed 12.02.2023).
2. «Indicators of energy efficiency of electric power industry entities. Performance indicators for 2021». Ministry of Energy of the Russian Federation: official website, available at: <https://minenergo.gov.ru/node/22764> (accessed 12.02.2023).
3. Oettinger G. "Energy Roadmap 2050", Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2012, 20 p.
4. Hojabri M., Derch U., Papaemmanouli A., Bosshart P. "A comprehensive survey on phasor measurement unit applications in distribution systems", *Energies*, 2019, vol. 12, no. 23, pp. 1–23.
5. Phadke A., Thorp J. "Synchronized phasor measurements and their applications. Second Edition", Springer International Publishing: Power Electronics and Power Systems, 2017, 285 p.
6. Schweitzer E.O., Whitehead D., Zweigle G., Ravikumar K.G. "Synchrophasor-based power system protection and control applications", *Modern Electric Power Systems*, 2010, pp. 1–10.
7. Lavery D.M., Best R.J., Morrow D.J. "Loss-of-mains protection system by application of phasor measurement unit technology with experimentally assessed threshold settings", *IET Generation, Transmission and Distribution*, 2015, vol. 9, no. 2, pp. 146–153.
8. IEEE Std 1588™ – 2008, IEEE Standard for a Precision Clock Synchronization Protocol for Networked Measurement and Control Systems, IEEE Instrumentation and Measurement Society, 2008.
9. IEEE Std C37.118.1™ – 2011, IEEE Standard for Synchrophasor Measurements for Power Systems, IEEE Power and Energy Society, 2011.
10. X. Zhao "GPS-disciplined analog-to-digital converter for phasor measurement applications", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2017, vol. 66, no. 9, pp. 2349–2357.
11. «Time synchronization. IEEE 1588 Standard», Official distributor of Moxa Inc. in Russia, Nienschanz-Automatica company: official website, available at: https://moxa.ru/tehnologii/power_systems/sinchronizaciya-tochnogo-vremeni-standart-ieee-1588/ (accessed: 12.02.2023).
12. «Phasor Measurement Unit (PMU)», Siemens: official website, available at: <https://www.siemens.com/global/en/products/energy/energy-automation-and-smart-grid/protection-relays-and-control/general-protection/phasor-measurement-unit-pmu.html> (accessed: 14.02.2023).
13. «VCL-PMU-30, Phasor Measurement Unit (PMU)», Valiant Communications: official website, available at: <https://valiantcom.com/pmu/phasor-measurement-unit.html> (accessed: 14.02.2023).
14. «Nexus 1450 Cyber Secure Power Quality Meter with Multiport Communication», Electro Industries/GaugeTech Inc.: official website, available at: <https://www.electroind.com/products/nexus-1450-cyber-secure-power-quality-meter-with-multiport-communication/> (accessed: 14.02.2023).
15. Lavery D., Hastings J., Zhao X. "An open-source analogue to digital converter for power system measurements with time synchronization", *IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2017, pp. 1–5.

Submitted 27.04.2023; revised 07.08.2023

Information about the authors

Viktor A. Kazbanov – 1st year master's student, Graduate School of Interdisciplinary Research and Engineering, educational and scientific cluster "Institute of High Technologies", Immanuel Kant Baltic Federal University (14 A. Nevskogo str., Kaliningrad 236041, Russia), e-mail: kazbanov2000@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7790-2489>

Michael S. Kuritskiy – 1st year master student, Graduate School of Interdisciplinary Research and Engineering, educational and scientific cluster "Institute of High Technologies", Immanuel Kant Baltic Federal University (14 A. Nevskogo str., Kaliningrad 236041, Russia), e-mail: MiKuritskii@stud.kantiana.ru, Mix-Mux@yandex.ru, tel.: +7-921-109-88-21, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4125-4678>

Alexey N. Aleshchenko – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Graduate School of Interdisciplinary Research and Engineering, educational and scientific cluster "Institute of High Technologies", Immanuel Kant Baltic Federal University (14 A. Nevskogo str., Kaliningrad 236041, Russia), e-mail: AAleshchenko@kantiana.ru

Vyacheslav M. Anishevich – Head of the development laboratory, Immanuel Kant Baltic Federal University (14 A. Nevskogo str., Kaliningrad 236041, Russia), e-mail: anis-lvm@rambler.ru

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ КОЛЕБАНИЙ ИНСТРУМЕНТА УДАРНОГО УСТРОЙСТВА ПРИ АСИММЕТРИЧНЫХ НАГРУЗКАХ

А.М. Слиденко

АО «Научно-исследовательский институт лопастных машин», г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается модель инструмента ударного устройства в форме стержня постоянного поперечного сечения при наличии несимметричных импульсных нагрузок. Предполагаются независимыми поперечные и продольные колебания инструмента при импульсных внешних нагрузках. Рассматриваются нагрузка на инструмент со стороны обрабатываемой породы и дополнительная нагрузка в результате воздействия других неопределенных факторов. При расчете поперечных колебаний инструмент рассматривается как консольная балка с жестким креплением на одном конце. Расчетная схема продольных колебаний представлена стержнем с упругим и диссипативным сопротивлением на торце со стороны взаимодействия с бойком. Импульсная нагрузка моделируется определением начальной скорости на малом участке инструмента и кратковременно действующей силой на заданном участке инструмента. Сформулирована начально-краевая задача с неоднородными волновыми уравнениями второго и четвертого порядков, правая часть которых моделирует кратковременно действующую силу на определенном участке инструмента. Решение начально-краевой задачи находится методом конечных разностей и методом Фурье при наличии только жесткого сопротивления в продольном направлении. Метод Фурье позволяет выбрать рациональные параметры разностной схемы. Выбрана смешанная разностная схема с весовыми коэффициентами. Решение разностных задач на каждом временном слое находится трехточечным и пятиточечным методами прогонки. Показана эквивалентность определения импульсной нагрузки двумя различными методами. Метод Фурье и метод конечных разностей реализованы в общей компьютерной программе. Программа позволяет определять различные формы и частоты колебаний в продольном и поперечном направлениях и распределение напряжений в сечениях инструмента

Ключевые слова: ударное устройство, инструмент, волновые уравнения, консольная балка, поперечные колебания, продольные колебания, метод Фурье, краевые условия, импульсная нагрузка, разностная схема, методы прогонки

Введение

Исследование математических моделей продольных колебаний инструмента ударного устройства при его взаимодействии с рабочей средой проводилось рядом авторов [1-6]. В этих работах предпочтение отдавалось в основном аналитическим методам решения начально-краевых задач. Рассматривались импульсные продольные нагрузки со стороны бойка [3-6] и также со стороны обрабатываемой породы [1, 2, 7]. Импульсные нагрузки со стороны обрабатываемой породы моделировались начальным распределением скорости по длине инструмента. Изучались в основном продольные нагрузки, которые приводили к продольным колебаниям инструмента. При взаимодействии инструмента с обрабатываемой средой, как правило, возникают также поперечные импульсные нагрузки, которые приводят к поперечным колебаниям инструмента. В работах [8-10] проводились исследования поперечных колебаний балки при различных

поперечных нагрузках и способах крепления. Сформулированные начально-краевые задачи решались методами Фурье.

Следует отметить, аналогичные задачи актуальны для многих технических устройств. Например, валы роторных машин подвержены радиальным и осевым импульсным нагрузкам, поэтому динамические расчеты являются актуальными при проектировании и оптимизации устройств данного типа [11, 12].

В работе [10] применялся разностный метод решения начально-краевой задачи, описывающей поперечные колебания балки с шарнирным креплением. Совместное исследование поперечных и продольных колебаний инструмента ударного устройства позволяет получить более полную картину о деформациях и напряжениях, возникающих в поперечных сечениях инструмента. Большое значение имеет учет внешних нагрузок, которые могут носить импульсный, случайный характер.

Цель работы заключается в построении математической модели, учитывающей несимметричную импульсную нагрузку на инструмент и проведении численного анализа решений сформулированных начально-

краевых задач методом Фурье и методом конечных разностей.

Перечислим основные решаемые задачи:

1) постановка начально-краевой задачи с неоднородными уравнениями поперечных и продольных колебаний инструмента круглого поперечного сечения при жестком креплении в поперечном направлении с учетом упругого и диссипативного сопротивления в продольном направлении;

2) решение начально-краевой задачи методом Фурье;

3) выбор схемы и параметров метода конечных разностей;

4) реализация решения начально-краевой задачи методом конечных разностей;

5) сравнение методов моделирования импульсного воздействия на инструмент со стороны обрабатываемой породы и других возможных факторов.

1. Постановка начально-краевой задачи

Упрощенная конструктивная схема элементов ударного устройства и расчетная схема нагрузки со стороны обрабатываемой породы представлены на рис. 1.

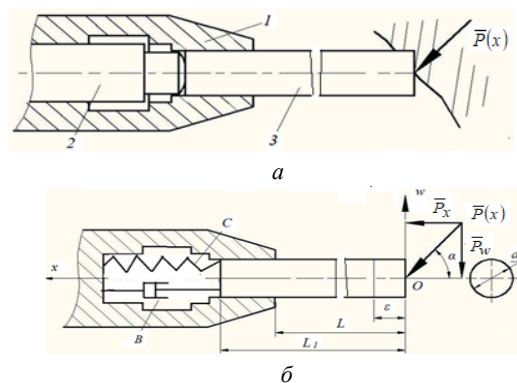


Рис. 1. Схема нагрузки на инструмент ударного устройства; а) конструктивная схема инструментальной части ударного устройства: 1 – корпус, 2 – боек, 3 – инструмент, $\bar{P}(x)$ – реакция отдачи; б) расчетная схема нагрузки: $\bar{P}_x$, $\bar{P}_w$ – составляющие реакции отдачи, C , B – приведенные жесткость и диссипация составляющих ударного устройства; ε , L , L_I , d – размеры соответственно краевого участка, консольной части, длины инструмента и диаметр поперечного сечения

Расчетная схема представляет стержень с постоянным круглым поперечным сечением, который нагружается начальным импульсом или распределением начального перемещения.

Предполагается также возможность приложения импульсной нагрузки, вызванной другими внешними случайными факторами. Такая нагрузка может быть приложена в любом сечении инструмента и моделируется функциями в правых частях волновых уравнений.

Предполагается жесткое крепление стержня только на одном конце в поперечном направлении при упругом и диссипативном сопротивлении в продольном направлении.

Колебания стержня описываются неоднородными дифференциальными уравнениями четвертого и второго порядков с частными производными:

$$EJ \frac{\partial^4 w(t, x)}{\partial x^4} + \rho S \frac{\partial^2 w(t, x)}{\partial t^2} = g(t, x), \quad x \in (0, L), \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial t^2} = a_x^2 \frac{\partial^2 u(t, x)}{\partial x^2} + \frac{1}{\rho S} \Phi(t, x) \quad x \in (0, L_1), t \in (0, \theta), \quad (2)$$

где E – модуль упругости материала инструмента, $J = \pi d^4 / 64$ – момент инерции поперечного сечения, ρ – плотность материала инструмента, S – площадь поперечного сечения, $a_x = \sqrt{E \cdot \rho^{-1}}$, $w(t, x)$ – поперечное перемещение сечения инструмента x в момент времени t , $u(t, x)$ – продольное перемещение сечения x инструмента, $g(t, x)$ и $\Phi(t, x)$ – распределение внешних поперечных и продольных сил. Принятый вид крепления балки определяет тип краевых условий. При консольном жестком креплении краевые условия для поперечных перемещений имеют вид

$$w(t, L) = 0, \quad \frac{\partial w(t, L)}{\partial x} = 0, \quad (3)$$

$$\frac{\partial^2 w(t, 0)}{\partial x^2} = 0, \quad \frac{\partial^3 w(t, 0)}{\partial x^3} = 0. \quad (4)$$

Для продольных перемещений краевые условия принимаются в виде

$$ES \frac{\partial u}{\partial x}(t, L_1) = -C \cdot u(t, L_1) - B \cdot \frac{\partial u}{\partial t}(t, L_1), \quad (5)$$

$$ES \frac{\partial u}{\partial x}(t, 0) = 0. \quad (6)$$

Начальные условия характеризуют начальную нагрузку в продольном и поперечном направлениях:

$$u(0, x) = f_1(x), \quad \frac{\partial u}{\partial t}(0, x) = F_1(x), \quad x \in [0, L_1], \quad (7)$$

$$w(0, x) = f_2(x), \quad \frac{\partial w}{\partial t}(0, x) = F_2(x), \quad x \in [0, L], \quad (8)$$

$$f_1(x) = m_1(1 - x/L_1), \quad F_1(x) = \begin{cases} \frac{P_x}{\rho S \varepsilon}, & \text{если } 0 \leq x \leq \varepsilon, \\ 0, & \text{если } \varepsilon < x \leq L_1. \end{cases} \quad (9)$$

$$f_2(x) = m_2(1 - x/L)^2, \quad F_2(x) = \begin{cases} \frac{P_w}{\rho S \varepsilon}, & \text{если } 0 \leq x \leq \varepsilon, \\ 0, & \text{если } \varepsilon < x \leq L. \end{cases} \quad (10)$$

где $P_x = |\bar{P}_x|$, $P_w = |\bar{P}_w|$, $P(x) = |\bar{P}(x)|$, тогда $P_x = P(x)\cos\alpha$, $P_w = P(x)\sin\alpha$. Постоянные m_1 и m_2 определяют величины наибольших начальных перемещений. Условия (3) означают отсутствие в сечении $x = L$ поперечного перемещения и поворота. Условия (4) выражают факт отсутствия сопротивлений поперечному перемещению и изгибу в сечении $x = 0$. Условие (5) выражает равенство сил на левом торце в продольном направлении, условие (6) – отсутствие напряжений после контакта инструмента с обрабатываемой породой. Функции $f_1(x)$ и $f_2(x)$ задают начальное распределение продольных и поперечных перемещений сечений стержня по длине, функции $F_1(x)$ и $F_2(x)$ задают распределение продольной и поперечной скоростей сечений стержня по длине в начальный момент времени. Распределением начальной скорости на конечном малом участке длины ε (рис.1) моделируется ударный импульс [1, 2]. Функция $g(t, x)$ моделирует кратковременную внешнюю поперечную нагрузку и определяется формулами

$$g(t, x) = H(t, \Delta t) \cdot g_0(x, y, \delta), \quad (11)$$

где

$$H(t, \Delta t) = \begin{cases} 1, & \text{если } 0 \leq t \leq \Delta t, \\ 0, & \text{если } t > \Delta t, \end{cases} \quad (12)$$

$$g_0(x, y, \delta) = \begin{cases} p_0, & \text{если } y - \delta \leq x \leq y + \delta, \\ 0, & \text{если } x < y - \delta \text{ или } x > y + \delta. \end{cases} \quad (13)$$

Аналогично определяется функция $\Phi(t, x)$, которая моделирует внешнюю продольную импульсную нагрузку:

$$\Phi(t, x) = H_1(t, t_1, t_2) \cdot \varphi(x, y, \varepsilon). \quad (14)$$

Графики функций, определяющих продольную импульсную нагрузку (14), представлены на рис. 2.

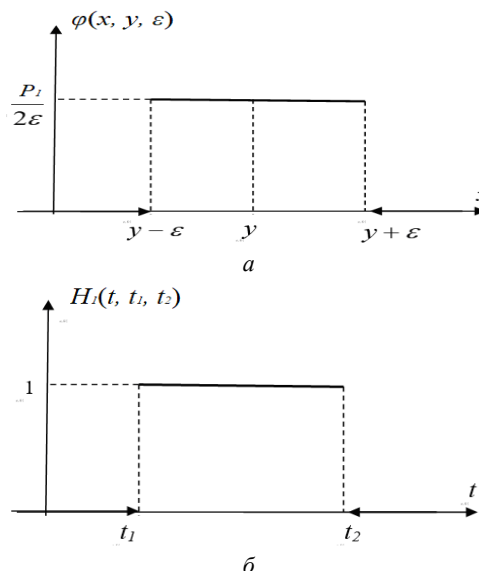


Рис. 2. Графики функций, определяющих внешнюю продольную нагрузку

Для получения решения начально-краевой задачи методом Фурье на заданном промежутке времени $[0, \theta]$, рассматривались отдельно две начальные задачи на промежутках $[0, \Delta t]$ и $[\Delta t, \theta]$ ($t_1 = 0$, $t_2 = \Delta t$), с обеспечением условия непрерывности перемещений и скорости перемещений. На втором промежутке решалась задача, начальными условиями которой являлись значения решений первой задачи на конце первого промежутка.

2. Метод конечных разностей и алгоритм исследования

Приведем аппроксимацию начально-краевой задачи методом конечных разностей. Приняты обозначения разностных отношений:

$$\Delta \Delta w = \frac{w_{i+2} - 4w_{i+1} + 6w_i - 4w_{i-1} + w_{i-2}}{h^4}, \quad i = 2, \dots, N-2,$$

$$\Delta u = \frac{u_{i+1} - 2u_i + u_{i-1}}{h^2}, \quad i = 1, \dots, N-1.$$

Уравнение (1) аппроксимируется разностной схемой с весовыми коэффициентами

$$\frac{w_i^{n+1} - 2w_i^n + w_i^{n-1}}{\tau^2} + \sigma D \Delta \Delta w_i^{n+1} + (1 - 2\sigma) D \Delta \Delta w_i^n + \sigma D \Delta \Delta w_i^{n-1} = \frac{1}{\rho S} g(t_n, x_i), \quad (15)$$

где $D = EJ/\rho S$, τ , h – параметры сеточной области, σ – весовой коэффициент, $w_i^n = w(t_n, x_i)$, $u_i^n = u(t_n, x_i)$ – значения сеточных функций.

Решение разностной задачи находится методом пятиточечной прогонки [13] с учетом краевых условий, алгоритм метода реализован в системе Mathcad [14].

Смешанная разностная схема с весовыми коэффициентами для волнового уравнения (2) принята в виде

$$(u_i^{n+1} - 2u_i^n + u_i^{n-1})\tau^{-2} = a^2 (\sigma \Delta u_i^{n+1} + (1 - 2\sigma) \Delta u_i^n + \sigma \Delta u_i^{n-1}) + (\rho S)^{-1} \Phi(t_n, x_i). \quad (16)$$

Аппроксимация краевых условий применялась в виде:

$$u_1^{n+1} - u_0^{n+1} = 0, \quad (17)$$

$$ES \frac{u_N^{n+1} - u_{N-1}^{n+1}}{h} = -Cu_N^{n+1} - B \frac{u_N^{n+1} - u_N^n}{\tau}. \quad (18)$$

На каждом временном слое решение системы (16)-(18) находится методом трехточечной прогонки.

Общий алгоритм исследования в системе Mathcad представлен на рис. 3.

Отметим, сравнение решений, полученных методом Фурье и разностным методом, позволяет в автоматическом режиме выбирать рациональные параметры разностной схемы (σ, h, τ), которые обеспечивают приемлемую точность разностного метода. С другой стороны близкие решения, полученные двумя методами, являются обоснованием корректности применения метода Фурье.

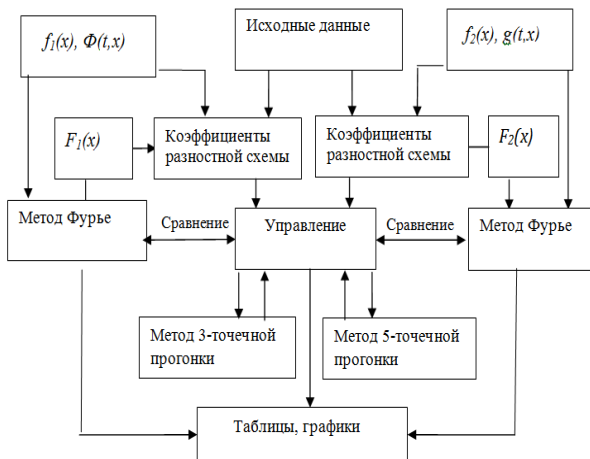


Рис. 3. Общий алгоритм исследования в системе Mathcad

3. Решение задач методом Фурье

Получено решение начально-краевой задачи методом Фурье для продольных колебаний при наличии только жесткого сопротивления ($B = 0$) и внешней нагрузки.

Решение на промежутке действия продольной силы представлено в виде ряда

$$u_1(t, x) = \sum_{k=1}^{\infty} T_k^d(t) \cdot \cos\left(\frac{\lambda_k}{a} x\right) = \sum_{k=1}^{\infty} \frac{2p_1 \cos\left(\frac{\lambda_k y}{a}\right) (1 - \cos(\lambda_k t)) \cos\left(\frac{\lambda_k}{a} x\right)}{\rho S \lambda_k^2 \left(L + \frac{a}{2\lambda_k} \sin\left(\frac{2\lambda_k}{a} L_1\right) \right)}. \quad (19)$$

На промежутке отсутствия внешней силы решение имеет вид

$$u_2(t, x) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_1^k \cos \lambda_k t + A_2^k \sin \lambda_k t \right) \cos\left(\frac{\lambda_k}{a} x\right), \quad (20)$$

где

$$A_1^k = \frac{\lambda_k T_k^d(t_2) \cos(\lambda_k t_2) - \frac{dT_k^d(t_2)}{dt} \sin(\lambda_k t_2)}{\lambda_k}, \quad (21)$$

$$A_2^k = \frac{\lambda_k T_k^d(t_2) \sin(\lambda_k t_2) + \frac{dT_k^d(t_2)}{dt} \cos(\lambda_k t_2)}{\lambda_k}. \quad (22)$$

Частное решение неоднородного уравнения представлено в форме интеграла Дюамеля:

$$T_k^d(t) = \frac{1}{\lambda_k} \int_0^t g_k(\tau) \cdot \sin(\lambda_k(t - \tau)) d\tau. \quad (23)$$

При заданных распределениях начальной скорости и перемещения, когда отсутствует внешняя импульсная нагрузка, решение представлено в виде ряда

$$u(t, x) = \sum_{k=1}^{\infty} \left(A_k \cos\left(a_x \frac{\mu_k}{L_1} t\right) + B_k \sin\left(a_x \frac{\mu_k}{L_1} t\right) \right) \cos\left(\frac{\mu_k}{L_1} x\right), \quad (24)$$

где

$$A_k = \frac{4\mu_k}{L_1(2\mu_k + \sin 2\mu_k)} \int_0^L f_1(x) \cos \frac{\mu_k}{L_1} x dx,$$

$$B_k = \frac{4}{a_x(2\mu_k + \sin 2\mu_k)} \int_0^L F_1(x) \cos \frac{\mu_k}{L_1} x dx,$$

μ_k – собственные значения краевой задачи, которые находятся численным решением уравнения

$$ES(L_1 C)^{-1} \mu = ctg \mu$$

с помощью функции *root* в системе Mathcad.

Для поперечных колебаний решение начально-краевой задачи методом Фурье получено в виде:

$$w(t, x) = \begin{cases} w_1(t, x), & 0 \leq t \leq \Delta t, \\ w_2(t, x), & t > \Delta t. \end{cases} \quad (25)$$

где

$$w_1(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(C_n \cos \left(\frac{\lambda_n}{a_y} \right)^2 t + D_n \sin \left(\frac{\lambda_n}{a_y} \right)^2 t + \left(\frac{a_y}{\lambda_n} \right)^4 \beta_n \right) U_n(x), \quad (26)$$

$$w_2(t, x) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(K_n \cos \left(\frac{\lambda_n}{a_y} \right)^2 t + M_n \sin \left(\frac{\lambda_n}{a_y} \right)^2 t \right) U_n(x), \quad (27)$$

где $a_y^4 = \frac{\rho S}{EJ} = \frac{1}{D}$.

Коэффициенты ряда Фурье определяются формулами:

$$C_n = \left(\int_0^L U_n^2(x) dx \right)^{-1} \cdot \int_0^L f_2(x) U_n(x) dx - \beta_n \left(\frac{a}{\lambda_n} \right)^4, \quad (28)$$

$$D_n = a_y^2 \left((\lambda_n)^2 \cdot \int_0^L U_n^2(x) dx \right)^{-1} \int_0^L F_2(x) U_n(x) dx, \quad (29)$$

$$K_n = \left(\int_0^L U_n^2(x) dx \right)^{-1} \cdot \int_0^L f_3(x) U_n(x) dx, \quad (30)$$

$$M_n = a_y^2 \left((\lambda_n)^2 \cdot \int_0^L U_n^2(x) dx \right)^{-1} \int_0^L F_3(x) U_n(x) dx, \quad (31)$$

где

$$f_3(x) = w_1(\Delta t, x), \quad F_3(x) = \frac{\partial w_1}{\partial t}(\Delta t, x), \quad (32)$$

$$U_n(x) = (\sin \lambda_n x + sh \lambda_n x) - \left(\frac{\sin \lambda_n L + sh \lambda_n L}{\cos \lambda_n L + ch \lambda_n L} \right) (\cos \lambda_n x + ch \lambda_n x), \quad (33)$$

$$\beta_n = p_0 \int_0^L U_n(x) \cdot g_0(x, y, \delta) dx \left(\int_0^L U_n^2(x) dx \right)^{-1}. \quad (34)$$

В приведенных формулах λ_n – собственные значения краевой задачи, являющиеся численными решениями уравнения

$$\cos \lambda = -(ch \lambda)^{-1},$$

которые определяются в системе Mathcad с помощью встроенных функций.

4. Результаты вычислительных экспериментов

Вычисления проводились при следующих значениях основных параметров:

$$\rho = 7800 \text{ кг/м}^3, \quad E = 2,1 \cdot 10^5 \text{ МПа}, \quad L = 0,5 \dots 1 \text{ м},$$

$$P(x) = 300 \dots 1000 \text{ Нс}, \quad \alpha = 5 \dots 10 \text{ град},$$

$$\Delta t = 0,005 \dots 0,02 \text{ с}, \quad L_1 = 0,5 \dots 1 \text{ м}, \quad d = 0,05 \dots 0,15 \text{ м},$$

$$\varepsilon = (0,1 \dots 1) L, \quad \theta = 0,01 \dots 0,1 \text{ с}, \quad C = 5 \cdot 10^4 \dots 5 \cdot 10^7 \text{ Н/м},$$

$$B = 0 \dots 7 \cdot 10^3 \text{ Нс/м}, \quad m_{1,2} = 0 \dots 0,001.$$

При использовании ряда Фурье вычислялись коэффициенты для 10-12 членов ряда, увеличение их числа практически не влияло на форму и частоту колебаний.

Рассмотрим сравнение решений, полученных методом Фурье и методом конечных разностей для поперечных колебаний инструмента.

Графики на рис. 4-8 получены при рациональном выборе параметров разностной схемы: $h = 0,001 \dots 0,01 \text{ м}$, $\tau = 10^{-7} \dots 10^{-5} \text{ с}$, $\sigma = 0,5 \dots 0,9$.

Задача рассмотрена при наличии импульсной нагрузки только за счет начального распределения постоянной поперечной скорости $V_0 = F_2(x)$ на длине инструмента ε (рис. 4).

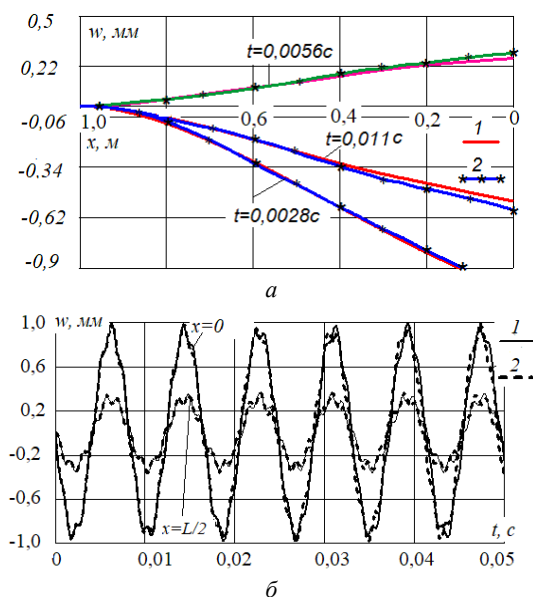


Рис. 4. Сравнение решений: а) форма поперечных перемещений; б) перемещения отдельных сечений инструмента; 1) метод Фурье; 2) разностный метод.

Основные параметры: $L = 0,9$ м; $\varepsilon = 0,3$ м; $\theta = 0,05$ с; $P_w = 26,15$ Нс; $V_0 = -0,781$ м/с; $\alpha = 5$ град

Для получения решения на заданном промежутке времени при наличии кратковременной внешней нагрузки рассмотрены последовательно две начальные задачи.

Решение приведено на рис. 5.

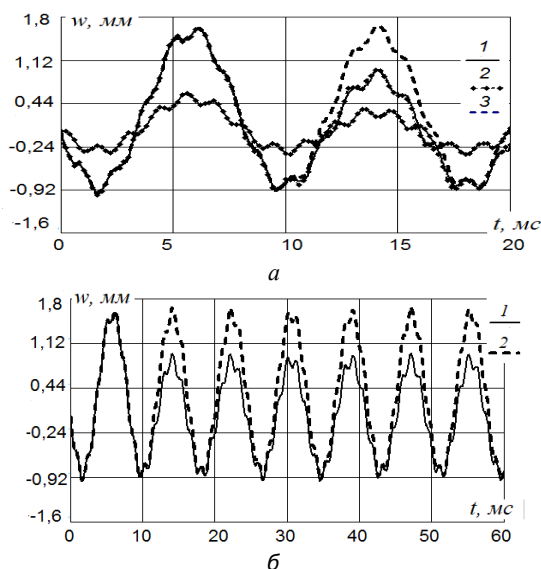


Рис. 5. а) сравнение решений при кратковременной внешней нагрузке: 1) метод Фурье; 2) разностный метод; 3) решение методом Фурье при нагрузке на всем промежутке времени;

б) решение методом Фурье: 1) кратковременная нагрузка; 2) нагрузка на всем промежутке времени;

Параметры: $\Delta t = 10$ мс, $p_0 = 30$ кН/м, $L = 0,9$ м, $\theta = 0,02$ с, $y_1 = 0,1$ м; $V_0 = -2,34$ м/с

Практическое совпадение кривых на рис. 4, и рис. 5, а свидетельствует о корректности применяемых алгоритмов разностного метода и метода Фурье.

На рис. 6 представлены продольные колебания стержня при наличии нагрузки за счет начального распределения скорости. Продольные колебания можно разделить на низкочастотные (~ 100 Гц) и высокочастотные (~ 2500 Гц).

В продольном направлении значение начальной скорости определялось по формуле (9). То есть функция $F(x)$ принимала постоянное значение, равное 0,5 м/с на участке $\varepsilon = 0,1$ м и равнялась нулю вне участка.

Следует отметить, параметры разностного метода находятся в более узком диапазоне по сравнению с разностным методом для поперечных колебаний. Подробно этот диапазон и типы разностных схем численно оценивались в работах [2, 7]. Ограничение шага по времени связано с большим значением параметра $a_x = 5189$ м/с в волновом уравнении. Наличие высокочастотных колебаний приводят к быстрому росту погрешности решения с увеличением временного промежутка.

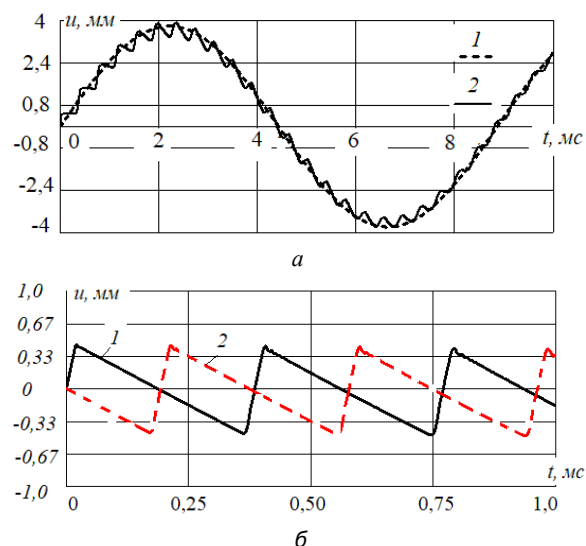


Рис. 6. а) выделение переносных и относительных продольных колебаний левого торца стержня: $L_l = 1$ м;

$P = 298,9$ Нс; $C = 5,6 \cdot 10^7$ Н/м; $B = 6,6 \cdot 10^3$ Нс/м;

1) $\varepsilon = 1$ м, 2) $\varepsilon = 0,1$ м;

б) выделение высокочастотных колебаний: 1) $x = 0$, 2) $x = L_l$

Высокочастотные колебания (относительно средней линии низкочастотных колебаний) отделяются от низкочастотных по формуле

$$\bar{u}_i^n(\varepsilon) = u_i^n(\varepsilon) - u_i^n(\varepsilon_1), \quad n = 0, \dots, N_1; \quad i = 0, \dots, N_2.$$

Формула представляет разность решений при малом значении $\varepsilon = 0.1 \cdot L_1$ м, и при большом значении $\varepsilon_1 = L_1$ м. Малое значение имитирует начальную импульсную нагрузку на торец инструмента, большое значение – передачу начального импульса всей массе стержня. Такое решение получается для начально-краевой задачи с начальным условием

$$u(0, x) = F_1(x, \varepsilon) - F_1(x, \varepsilon_1).$$

Следует отметить, такое решение можно получить, если отбросить первое слагаемое ряда Фурье.

Отделение высокочастотных колебаний позволяет определить распределение нормальных напряжений по длине инструмента. На рис. 7, а представлены результаты вычисления напряжений в заданном сечении в зависимости от времени по различным формулам:

$$\sigma_1 = E \frac{u_{10}^n(\varepsilon) - u_{10}^n(\varepsilon_1) - (u_0^n(\varepsilon) - u_0^n(\varepsilon_1))}{10h}, \quad (35)$$

$$\sigma_2 = E \frac{u_{10}^n(\varepsilon) - u_0^n(\varepsilon)}{10h}, \quad (36)$$

$$\sigma_3 = E \frac{u_{10}^n(\varepsilon_1) - u_0^n(\varepsilon_1)}{10h}. \quad (37)$$

Результаты вычислений показали, что формулы (35) и (36) дают практически одинаковые результаты, вычисленные по формуле (37) напряжения равны нулю, что свидетельствует о неприменимости этой формулы.

На рис. 7, б показано затухание низкочастотных продольных колебаний левого торца инструмента вследствие наличия диссипативного сопротивления.

Представляет интерес сравнение результатов при моделировании импульсной нагрузки двумя способами: определением начальной скорости ($u_\varepsilon(t, x)$) и заданием кратковременной силы, распределенной на малом участке стержня ($u_S(t, x)$).

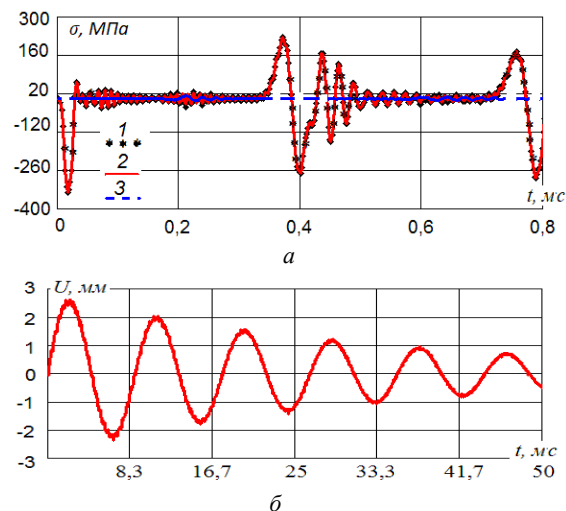


Рис. 7. а) напряжения в сечениях, близких к контактному торцу инструмента: 1) формула (35), 2) формула (36), 3) формула (37)

б) влияние диссипативного элемента на процесс продольных колебаний; основные параметры: $B = 6600$ Нс/м, $C = 5,6 \cdot 10^7$ Н/м, $Px = 299$ Нс, $L_I = 1$ м

На рис. 8 приведены высокочастотные продольные колебания (5000 Гц). На рис. 8, а решения получены методом Фурье при двух способах моделирования импульсной нагрузки (кратковременное действие силы на малом участке стержня и начальное распределение скорости). На рис. 8, б приведены решения методом Фурье и методом конечных разностей при кратковременном действии внешней силы.

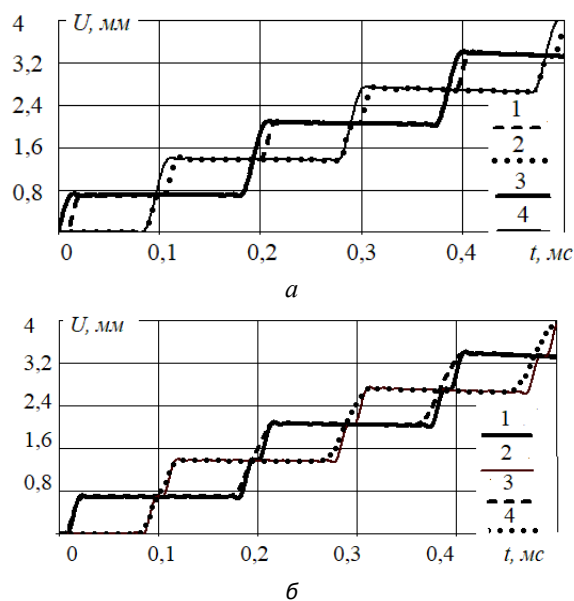


Рис. 8. Сравнение высокочастотных колебаний: а) решения методом Фурье при двух видах импульсной нагрузки: 1) $u_S(t, 0)$, 2) $u_S(t, L_1)$, 3) $u_\varepsilon(t, 0)$, 4) $u_\varepsilon(t, L_1)$;

б) решения методом Фурье 1) $u_S(t, 0)$, 2) $u_S(t, L)$ и разностным методом: 3) u_0^n , 4) u_N^n

Отметим достаточно хорошее совпадение графиков при рациональном подборе основных параметров. Приведем эти значения: $L_1 = 0,5 \text{ м}$, $\varepsilon = 0,05 \text{ м}$, $t_1 = 0$, $t_2 = 9,636 \text{ мкс}$, $P_x = 400 \text{ Нс}$, $P_1 = 4,151 \cdot 10^7 \text{ Н}$, $B = 0$, $C = 5,6 \cdot 10^7 \text{ Н/м}$.

Аналогичные результаты получены и для низкочастотных колебаний.

Отметим увеличение погрешности разностного метода при увеличении временного промежутка. Погрешность можно уменьшить за счет уменьшения шага по времени, однако это приведет к требованию увеличения ресурсов вычислительной системы. Можно считать, что для проектировочных расчетов полученная погрешность является приемлемой.

Заключение

1. Предложена модель продольно-поперечных колебаний инструмента ударного устройства в результате реакции со стороны обрабатываемой породы и других случайных факторов. Модель представлена независимой системой неоднородных дифференциальных уравнений второго и четвертого порядков в частных производных с краевыми и начальными условиями.

2. Для решения начально-краевых задач предложен метод Фурье и метод конечных разностей. Сравнение решений позволило выбрать смешанные разностные схемы с весовыми коэффициентами и их параметры.

3. Применение различных параметров распределения начальной скорости при продольной составляющей ударного импульса позволило выделить высокочастотные составляющие продольных и поперечных колебаний инструмента и таким образом определить нормальные напряжения в поперечном сечении инструмента в зависимости от времени.

4. Проведено сравнение колебаний инструмента при различных способах моделирования ударного импульса. Показана равнозначность определения ударного импульса

начальным распределением поперечной и продольной составляющей скорости и кратковременно действующей на малом участке стержня внешней силой.

Литература

1. Араманович И.Г., Левин В.И. Уравнения математической физики. М.: Наука, 1969. 288с.
2. Слиденко А.М., Слиденко В.М. Исследование дискретно-непрерывной адаптивной модели ударного устройства// Математическое моделирование. 27:1. 2015. С. 54-64.
3. Иванов А.П. Динамика систем с механическими соударениями. М.: Международная программа образования, 1997. 336 с.
4. Манжосов В. К., Слепухин В.В. Моделирование продольного удара в стержневых системах неоднородной структуры. Ульяновск: УлГТУ, 2011. 208 с.
5. Манжосов В.К. Модели продольного удара: монография. Ульяновск: УлГТУ, 2006. 160 с.
6. Манжосов В. К., Новиков Д.А. Моделирование переходных процессов и предельных циклов движения виброударных систем с разрывными характеристиками: монография. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 236 с.
7. Слиденко А.М., Слиденко В.М. Исследование модели ударного устройства стержневого типа разностным методом // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 16. № 5. 2020. С. 73-80.
8. Доев В.С. Поперечные колебания балок: учебное пособие. М.: КНОРУС, 2016. 412 с.
9. Никитина Т. Ю. Динамика поперечных колебаний вертикально зашпеленной балки.// Вестник государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. № 3(22), 2013. С. 79-88.
10. Слиденко А.М. Исследование поперечных колебаний балки численно-аналитическими методами// Насосы. Турбины. Системы. Научно-технический журнал. 2(39), 2021. С. 47-55.
11. Кошляков Н.С., Глинер Э.Б., Смирнов М.М. Уравнения в частных производных математической физики. М.: Высшая школа, 1970. 712 с.
12. Галаев В.И., Кулешов Ю.В. Аналитический метод выбора расчетной динамической модели и собственные частоты колебаний обрабатывающей системы роторных машин // Вестник ТГТУ. 2009. Т. 15. № 1. С. 191-198.
13. Самарский А.А., Николаев Е.С. Методы решения сеточных уравнений. М.: Наука, 1978. 592 с.
14. Охорзин В. А. Прикладная математика в системе MATCAD: учеб. пособие. 2-е изд., исп. и доп. СПб.: Издательство «Лань», 2008. 352 с.

Поступила 28.04.2023; принята к публикации 02.08.2023

Информация об авторах

Слиденко Александр Михайлович – канд. физ.-мат. наук, инженер, АО «Научно-исследовательский институт лопастных машин» (394019, Россия, г. Воронеж, ул. Газовая, д. 2а), тел. 8(905) 053-74-07, e-mail: alexandr.slidenko@yandex.ru

STUDY OF IMPACT DEVICE TOOL OSCILLATIONS UNDER ASYMMETRIC LOADS

A.M. Slidenko

JSC «Scientific Research Institute of Blade Machines», Voronezh, Russia

Abstract: a model of an impact device tool in the form of a constant cross section rod in the presence of asymmetric impulse loads is considered. The transverse and longitudinal oscillations of the tool are assumed to be independent under impulsive external loads. The load on the tool from the processed rock and additional load as a result of other uncertain factors are considered. The tool is considered as a cantilever beam with a rigid mount at one end when calculating transverse oscillations. The design model of longitudinal oscillations is represented by a rod with elastic and dissipative resistance at the end from the side of interaction with the striker. The impulse load is modeled by determining the initial speed in a small section of the tool and the short-term acting force in a given section of the tool. An initial-boundary value problem is formulated with inhomogeneous wave equations of the second and fourth orders, the right part of which models an instantaneous force on a certain part of the tool. The solution of the initial boundary value problem is found by the finite difference method and the Fourier method in the presence of only rigid resistance in the longitudinal direction. The Fourier method allows choosing rational parameters of the difference scheme. A difference scheme with weight coefficients is chosen. The solution of difference problems on each time layer is found by three-point and five-point sweep methods. The equivalence of determining the impulse load by two different methods is shown. The Fourier method and the finite difference method are implemented in a common computer program. The program allows you to determine various forms and frequencies of oscillations in the longitudinal and transverse directions and the distribution of stresses in the tool sections

Key words: impact device, tool, wave equations, cantilever beam, transverse oscillations, longitudinal oscillations, the Fourier method, boundary conditions, impulse load, difference scheme, sweep methods

References

1. Aramanovich I.G., Levin V.I. "Equations of mathematical physics" ("Uravneniya matematicheskoy fiziki"), Moscow, Nauka, 1969, 288 p.
2. Slidenko A.M., Slidenko V.M. "The study of a discrete-continuous model of an adaptive impact device", *Mathematical modeling (Matematicheskoye modelirovaniye)*, 2015, 27:1, pp. 54–64
3. Ivanov A.P. "System dynamics with mechanical collisions" ("Dinamika sistem s mekhanicheskimi soudareniyami"), Moscow, Mezhdunarodnaya programma obrazovaniya, 1997, 336 p.
4. Manzhosov V.K., Slepukhin V.V. "The modeling of longitudinal impact in frameworks of heterogeneous structure" ("Modelirovaniye prodol'nogo udara v sterzhnevyykh sistemakh neodnorodnoy struktury"), Ulyanovsk, UIGTU, 2011, 208 p.
5. Manzhosov V.K. "Longitudinal impact models: monograph" ("Modeli prodol'nogo udara: monografiya"), Ulyanovsk, UIGTU, 2006, 160p.
6. Manzhosov V.K., Novikov D.A. "Modeling of transient motions and limit cycles of vibro-shock systems with discontinuous characteristics: monograph" ("Modelirovaniye perekhodnykh protsessov i predel'nykh tsiklov dvizheniya vibroudarnyykh sistem s razryvnymi kharakteristikami: monografiya"), Ulyanovsk: UI.GTU, 2015, 236 p.
7. Slidenko A.M., Slidenko V.M. "The research of impact device model of the rod type by difference method", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5, pp. 73-80.
8. Doev V.S. "Transverse oscillations of the beams: textbook" ("Poperechnyye kolebaniya balok: uchebnoye posobiye"), Moscow, KNORUS, 2016, 412 p.
9. Nikitina T.Y. "Dynamics of transverse oscillations of a vertically clamped beam", *The Bulletin of The Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping (Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova)*, 2013, no. 3 (22), pp. 79-88.
10. Slidenko A.M. "Investigation of transverse beam vibrations by numerical and analytical methods", *Pumps. Turbines. Systems. Scientific and Technical Journal (Nasosy. Turbiny. Sistemy. Nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2021, no. 2 (39), pp. 47-55.
11. Koshlyakov N.S., Gliner E.B., Smirnov M.M. "Equations in partial derivatives of mathematical physics" ("Uravneniya v chastnykh proizvodnykh matematicheskoy fiziki"), Moscow, Vysshaya shkola, 1970, 712 p.
12. Galaev V.I., Kuleshov Yu.V. "Analytical method for choosing a computational dynamic model and natural oscillation frequencies of the rotary machine rolling system", *The Bulletin of TSTU (Vestnik TGTU)*, 2009, vol. 15, no. 1, pp. 191-198.
13. Samarskiy A.A., Nikolaev E.S. "Methods of solving grid equations" ("Metody resheniya setochnykh uravneniy"), Moscow, 1978, Nauka, 592 p.
14. Ohorzin V.A. "Applied Mathematics in the MATHCAD System: textbook" ("Prikladnaya matematika v sisteme MATHCAD: ucheb. Posobiye"), St. Petersburg, Lan, 2008, 352 p.

Submitted 28.04.2023; revised 02.08.2023

Information about the authors

Alexander M. Slidenko – Cand. Sc. (Physical and Mathematical), engineer, JSC «Scientific Research Institute of Blade Machines», (2a Gazovaya str., Voronezh 394019, Russia), e-mail: alexandr.slidenko@yandex.ru, tel.: +7 (905) 053-74-07

**ФУНКЦИОНАЛ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ РАЗРАБОТКИ И УПРАВЛЕНИЯ
ПРОИЗВОДСТВОМ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ РЕЛЕ****Д.Н. Трубицын, А.В. Коськин****Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия**

Аннотация: рассматривается вариант автоматизированной системы управления производством (АСУП), объединяющий возможности систем электронного документооборота (СЭД), систем автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП). Определены основные функции и множества документов, используемых для автоматизированного управления производством на этапах разработки технического задания (ТЗ), эскизного проекта, конструкторского проекта, изготовления опытного образца и серийного производства. Исходя из задач, стоящих перед различными подразделениями производства, предложен режим доступа к различным видам производственных документов с учетом необходимости визирования документов различными производственными отделами. Проанализирована возможность автоматического формирования некоторых документов в том случае, если вся необходимая информация для их выпуска есть в прочих электронных документах, входящих в предложенную систему документооборота. Рассмотрен обмен документами между различными отделами в процессе выполнения работы. Представлены необходимые вспомогательные функции данной системы, такие как хранение резервных копий документов и конвертирование документов в широко распространенные форматы. Рассмотрены возможность объединения системы с системой АСУ ТП и необходимость функционала, обеспечивающего конвертирование документов в файлы, подходящие для системы АСУ ТП. В заключение сделан вывод о том, что данная система позволит сократить трудозатраты и уменьшить время, необходимое на разработку и изготовление продукции, за счет автоматизации выпуска отдельных документов, а также сокращения времени необходимого на обмен документами. Кроме того, интеграция с АСУ ТП позволит значительно повысить автоматизацию производства, практически исключив человека из непосредственного управления производством

Ключевые слова: АСУП, СЭД, САПР, АСУ ТП твердотельные реле, функции и документы АСУ

Введение

В настоящее время важную роль при реализации различных бизнес-процессов играют системы электронного документооборота (СЭД). Производство продукции любого вида предполагает наличие рабочей конструкторской, технологической, эксплуатационной и прочих видов документации, которая используется на всех этапах жизненного цикла изделия. Использование СЭД может обеспечить своевременную передачу новых версий документов всем участникам производства, хранение, контроль версий и многое другое [1].

Кроме того, объединение систем СЭД, систем автоматизированного проектирования (САПР) и автоматизированных систем управления технологическим процессом (АСУ ТП), может обеспечить формирование производственных файлов и инструкций, для управления АСУ ТП, что позволит значительно повысить автоматизацию производства, и скорость передачи вновь разработанных изделий в серийное производство.

В данной статье рассматривается возможность применения СЭД, САПР и АСУ ТП при производстве твердотельных реле.

**Функционал АСУП на этапе разработки
технического задания**

В статье [2] рассматривались вопросы недостатков существующих систем электронного документооборота и автоматизированного проектирования, используемых при разработке и организации производства твердотельных реле. В данной статье рассмотрим, какой функционал потребуется автоматизированной системе разработки и управления производством твердотельных реле для обеспечения максимального удобства и автоматизации процесса разработки и выпуска твердотельных реле.

Процесс создания нового типа реле, организации его массового производства, выпуска и реализации будет выглядеть следующим образом.

Разработка технического задания. Анализ требований и задач, стоящих перед вновь разрабатываемым устройством. На данном этапе производится анализ требований отдельных крупных заказчиков, и рынка в целом, затем экономическое обоснование разработки, для определения параметров нового реле.

Пример

Предприятию А требуется твердотельное реле с одной контактной группой, управляющим напряжением 5 В и током управления не

более 1 мА, для коммутации цепи током до 5 А и напряжением не более 20 В.

Предприятию Б требуется твердотельное реле с двумя контактными группами, управляющим напряжением 6 В и током управления не более 10 мА, для коммутации цепи током до 1 А и напряжением не более 30 В.

Анализ рынка показывает, что востребованы твердотельные реле с управляющим напряжением 5 В и 3,3 В и током управления не более 1 мА для сопряжения с широко распространенными контроллерами, для управления напряжением до 60 В, и токами до 100 А.

Исходя из этих запросов, получим требования к новому реле – управляющее напряжение – диапазон 3,3...6 В, управляющий ток не более 1 мА, коммутируемое напряжение до 60 В, коммутируемый ток до 100 А. Однако, твердотельное реле для переключения тока 100 А будет крайне дорогим, при этом большая часть потенциальных покупателей работает в диапазоне до 10 А. Таким образом получим реле с характеристиками – диапазон 3,3...6 В, управляющий ток не более 1 мА, коммутируемое напряжение до 60 В, коммутируемый ток до 10 А.

Исходя из этого на этапе разработки ТЗ потребуется работа с запросами крупных организаций, отделом анализа рынка, и экономическим отделом, выполняющим экономический анализ разработки. Финальным документом будет являться ТЗ, однако, оно по мере разработки изделия может впоследствии корректироваться.

Функционал АСУП на этапе эскизного проекта, разработки конструкторской документации и изготовления опытного образца

Следующим этапом будет разработка эскизного проекта изделия. На данном этапе разрабатывается структурная схема изделия, определяется перечень основных документов, разрабатываемых на следующем этапе проектирования, определяется перечень испытаний, которые должен проходить опытный образец изделия, и перечень испытаний, которые будет проходить изделие при серийном производстве.

Далее следует этап разработки конструкторской документации. На данном этапе разрабатываются конструкторские документы для изготовления изделия, программы и методики испытаний для опытных образцов и т.д. В разработке могут участвовать несколько отделов или несколько инженеров в отделе. Для хранения их документов потребуется электронный

архив, с общим доступом для участвующих инженеров. Соответственно, потребуется также архив технологических документов для изготовления опытной партии изделий. В процессе разработки документы должны проверяться технологом, метрологом и утверждаться главным инженером. Проверки и утверждения должны быть без возможности редактирования документа в целом, но с возможностью отметки о проверке в соответствующих графах.

Потребуется закупить комплектующие с целью изготовления опытной партии изделий. Для этого в программе должна быть предусмотрена возможность передачи запроса на закупку комплектующих от конструкторского отдела в отдел снабжения. Приобретенные материалы и комплектующие, должны пройти входной контроль при поступлении на предприятие, а затем, поступить на склад материалов. Соответственно, программе потребуется ведомость комплектующих, хранящихся на складе, и архив входного контроля ОТК, в котором будут храниться сведения о результатах входного контроля материалов и комплектующих, и, если потребуется, рекламации, отправленные поставщикам, при наличии брака в поставленной продукции.

Непосредственно для изготовления опытной партии монтажно-техническому участку (МСУ) потребуется доступ к архиву конструкторской и технологической документации (версиям документов для производства), также МСУ должен иметь возможность получать необходимые комплектующие и материалы по запросу со склада. У самого МСУ, в свою очередь, должен быть архив, в котором будут храниться маршрутные листы, с возможностью простановки отметок начальника МСУ, и представителя ОТК, о выполнении технологических операций. Кроме того, необходим журнал с перечнем выпущенных изделий, с данными о присвоенных заводских номерах. После финальной операции, опытные образцы должны поступить на склад изготовленных изделий, в отдельную секцию для опытных образцов. Соответственно в программе потребуется база данных изготовленных опытных образцов изделий.

Далее опытные образцы изделий должны пройти перечень испытаний, согласно инструкциям, разработанным инженерным отделом. Соответственно, испытательная лаборатория должна иметь доступ к этим инструкциям (версиям для проведения испытаний). Сама же испытательная лаборатория должна иметь архив протоколов испытаний, к которому сможет обращаться конструкторский отдел, и по результатам ис-

пытаний проводить корректировки конструкторской документации. После успешного прохождения всех испытаний, конструкторской документации должна быть присвоена литера «О» или «О1» и документы должны поступить в архив для серийного производства. Кроме того, конструкторской должна быть выпущена сопроводительная документация. Для твердотельных реле это datasheet, в котором описываются основные параметры изделия, режимы работы, типовые схемы включения, предельные эксплуатационные ограничения, а также, в некоторых случаях – графики результатов испытаний устройства в различных условиях и режимах. Аналогично происходит и с технологическими документами.

Функционал АСУП на этапе серийного производства

Далее следует организация серийного производства. Исходными данными для его организации должен быть план производства изделий, с указанием наименований количества и сроков выпуска партий. При этом работники цеха, организующего выпуск продукции, должны иметь доступ к конструкторским и технологическим документам на серийное производство. В то же время программа (в идеале автоматически) при поступлении плана на выпуск партии изделий, должна рассчитывать количество необходимых материалов и комплектующих, и передавать его в отдел снабжения. Готовая продукция должна проходить испытания под контролем ОТК и затем передаваться на склад готовой продукции, соответственно потребуются ведение перечня изготовленных изделий.

Далее со склада изделия должны забираться отделом поставки, с соответствующими отметками в перечне хранящихся на складе изделий.

Дополнительно к перечисленным документам, могут потребоваться вспомогательные документы, для внутреннего пользования, которыми могут обмениваться различные отделы. Например, это может быть перечень замечаний, по результатам проверки документа, перечни

материалов и комплектующих, доступных на данный момент для приобретения и т.д. Данные документы могут выпускаться по мере необходимости, любым из отделов и адресоваться, по желанию пользователя, выпустившего документ – в один или несколько отделов, или же конкретно перечисленным сотрудникам. Возможность обмена такими документами, также следует предусмотреть.

Таким образом, автоматизированная система разработки и управления производством твердотельных реле, будет представлять собой архив документов, доступных с различным уровнем ограничения прав доступа.

Уровней доступа к документам потребуются четыре:

Полный доступ к документу, для отдела, разрабатывающего документ, с возможностью добавления, просмотра, редактирования и удаления документов.

Доступ к просмотру документа и простановке отметок, без возможности полного редактирования, например, для отметки, после прохождения метрологического контроля, или отметок о количестве годных и забракованных изделий по результатам проверки ОТК, без возможности редактировать основной текст документа.

Доступ только для просмотра документа. Например, монтажно-сборочный участок должен иметь доступ к РКД для производства, без возможности редактирования.

Документ, формируемый программой. Например – после разработки электрической принципиальной схемы, автоматическое формирование перечня элементов. Соответственно, в нормальном режиме, доступ к редактированию документа не нужен, однако он может потребоваться, при обнаружении программной ошибки, или для редактирования формы и основной надписи документа.

Перечень документов, циркулирующих в предлагаемой системе управления производством твердотельных реле, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Перечень документов, циркулирующих в АСУП производства твердотельных реле

Этап	Документ	Отделы			Автоматическое формирование документа
		Полный доступ	Частичный доступ	Только просмотр	
Разработка ТЗ	Анализ рынка и запросов от потребителей продукции	Экономического анализа, статистики	–	Конструкторский (разработчик ТЗ)	Нет
	Техническое задание	Конструкторский (разработчик ТЗ)	Главный инженер, технолог, метролог, лица согласующие документ	Конструкторский, Технологический	Нет

Продолжение табл. 1

Эскизный проект	Перечень выпускаемых документов, структурные схемы	Конструкторский	Лица, согласующие документы	–	Нет
Конструкторский проект	РКД (кроме автоформируемых)	Конструкторский	Главный инженер, технолог, метролог	Технологический, производство, монтажно-сборочный участок	Нет
	РКД (автоформируемые перечни)	– (В случае необходимости Конструкторский)	Главный инженер, технолог, метролог	Технологический, производство, монтажно-сборочный участок	Да
	Программы и методики испытаний опытных образцов	Конструкторский	Главный инженер, технолог, метролог, лица согласующие документ	Испытательная лаборатория	Нет
	Маршрутные карты и техпроцессы для опытных образцов	Технологический	Лица, согласующие документы	Конструкторский, Производство, Монтажно-сборочный участок	Нет
Изготовление и испытания опытных образцов	Ведомости покупных изделий и материалов	– (В случае необходимости Конструкторский)	Лица, согласующие документы	Отдел снабжения	Да
	План изготовления опытных образцов	Конструкторский	Главный инженер, лица согласующие документ	Отдел снабжения	Нет
	Перечень закупаемых изделий и материалов для изготовления	– (В случае необходимости Отдел снабжения)	–	Отдел снабжения	Да
	Перечень материалов и комплектующих на складе	Склад	ОТК (отметки о прохождении входного контроля)	Отдел снабжения, Склад, Производство, Монтажно-сборочный участок	Нет
	Протоколы входного контроля материалов и комплектующих	ОТК	–	–	Нет
Изготовление и испытания опытных образцов	Маршрутные листы	Технологический	Производство, Монтажно-сборочный участок, ОТК	–	Нет
	Журнал присвоенных заводских/серийных номеров	– (В случае необходимости ОТК)	–	Производство, Монтажно-сборочный участок, ОТК	Да
	Перечень изготовленных образцов	Склад	Испытательная лаборатория, ОТК	Конструкторский, Технологический, Производство, Монтажно-сборочный участок	Нет
	Протоколы испытаний и заключения	Испытательная лаборатория	ОТК, лица согласующие документы	Конструкторский, Технологический, Производство, Сборочный участок	Нет

Окончание табл. 1

Серийное производство	План изготовления продукции	Плановый отдел	Лица согласующие документ	Все	Нет
	Перечень закупаемых изделий и материалов для изготовления	– (В случае необходимости Отдел снабжения)	–	Отдел снабжения	Да
	Перечень материалов и комплектующих на складе	Склад	ОТК (отметки о прохождении входного контроля)	Отдел снабжения, Склад, Производство, Монтажно-сборочный участок	Нет
	Протоколы входного контроля материалов и комплектующих	ОТК	–	–	Нет
	Маршрутные листы	Технологический	Производство, Монтажно-сборочный участок, ОТК	–	Нет
Прочие документы используемые в процессе работы	Журнал присвоенных серийных номеров	– (В случае необходимости ОТК)	–	Производство, Монтажно-сборочный участок, ОТК	Да
	Перечень изготовленных изделий	Склад	Испытательная лаборатория, ОТК	Производство, Монтажно-сборочный участок, отдел сбыта	Да
	Протоколы испытаний и заключения	Испытательная лаборатория	ОТК, лица согласующие документы	Технологический, отдел сбыта	Нет
	Внутренние документы	В соответствии с настройкой	В соответствии с настройкой	В соответствии с настройкой	Нет

Приведенный перечень может дополняться и корректироваться по мере разработки системы.

Вспомогательные функции АСУП

Помимо основных, АСУП должна иметь набор вспомогательных функций, обеспечивающих удобство работы с системой:

- 1) поиск документа по различным запросам. В системе должна быть предусмотрена возможность поиска необходимого документа по названию, дате последней корректировки, проекту и автору документа [3].
- 2) вывод на печать требуемых документов.
- 3) хранение резервных копий документов.
- 4) контроль версий документов и, при необходимости – хранение прошлых версий.
- 5) возможность конвертирования документов в другие форматы.

Интеграция САПР, СЭД и АСУ ТП

Одной из важнейших функций, способных значительно увеличить скорость производства, является создание на предприятии автоматизированной системы управления технологическим процессом [4], и обеспечение ее взаимосвязи с системами автоматизированного проектирования и системой электронного документооборота.

На практике, это может выглядеть следующим образом. Производство организуется в виде конвейерной линии, производственное оборудование которой, обеспечивает (по возможности) автоматическое изготовление твердотельных реле. Вероятнее всего, полностью исключить участие человека, в технологических процессах изготовления не получится, но целесообразно уменьшить количество ручных монтажных операций [5].

Управление конвейером, технологическим оборудованием, анализ данных с различных измерителей параметров технологических операций и расчет оптимальных параметров производства, производит главный компьютер АСУ ТП. Он же вносит необходимые корректировки в процесс производства реле, для корректировки отклонений параметров изготавливаемых деталей и готовой продукции.

В то же время входными данными, для работы главного компьютера АСУ ТП, являются чертежи и технологические карты, созданные в системе САПР, и заявки на производство, данные о наличии материалов и т.д. имеющиеся в системе СЭД.

Для обеспечения взаимосвязи АСУ ТП, САПР и СЭД, в разрабатываемой АСУП, потребуется ввести функцию конвертирования чертежей, схем и т.д. в выходные файлы для производства.

На сегодняшний день, подобный функционал реализован в программе Altium Designer. Программа способна по готовой трассировке платы, создать Gerber файлы, т.е. файлы для загрузки задания в систему автоматизированного производства печатных платы, а также файлы для загрузки в установочный автомат, для автоматической установки и монтажа электронных компонентов.

Подобный функционал, целесообразно использовать и при производстве твердотельных реле. Таким образом, в общей структуре АСУП, потребуется еще база данных, содержащая готовые производственные файлы и инструкции для работы системы АСУ ТП.

Заключение

1. Организация разработки и производства твердотельных реле требует взаимодействия множества специалистов с постоянным обменом информацией между различными отделами. Скорость выполнения работ по разработке, внедрению и производству продукции напрямую зависит от скорости обмена информацией, и автоматизации документооборота и разработки документов.

2. Хотя многие существующие системы ЭДО, АСУП и САПР имеют определенную степень автоматизации работы с документами, тем не менее многие работы по разработке документов можно автоматизировать, при условии обеспечения свободного обмена информацией, между документами, различных отделов производства. Для этого требуется возможность свободного конвертирования форматов различных видов документов, или создание универсальной среды, способной работать со всеми требуемыми форматами файлов.

3. Помимо обмена информацией, система должна обеспечивать доступ к работе с документами с различных рабочих станций производства, с ограничением прав доступа к документам.

4. Кроме всего перечисленного, система должна иметь возможность объединения с системой АСУ ТП производства твердотельных реле.

Предлагаемая АСУП представляет собой сложноорганизованную базу хранения и пере-

дачи документов, с частичной автоматизацией формирования документов. Разработка и внедрение такой системы позволит сократить время на обмен документами между различными отделами производства, и в тоже время упростить работу за счет автоматического формирования взаимосвязанных документов, на основе имеющихся данных. Также за счет возможности автоматического формирования производственных файлов и инструкций, можно сократить время производства и количество производственного персонала, необходимого для работы на технологическом оборудовании.

Идеальным вариантом такой системы, можно считать АСУП, представляющую собой объединение САПР, СЭД и АСУ ТП, позволяющую, по сути, исключить человека из непосредственного производственного процесса. При этом:

- работники отделов снабжения, обеспечивают ввод в систему базовых данных (количество и номенклатура выпускаемых изделий), и осуществляют визирование автоматических запросов на закупку и перемещение материалов и компонентов производства.
- работники конструкторских отделов разрабатывают документы, минимально необходимые, для понимания конструкции изделия, остальные документы формируются автоматически.
- технологические документы формируются автоматически, технологи вносят корректировки при необходимости;
- производство осуществляется в автоматическом режиме, под контролем АСУ ТП. Работники и инженеры производственных цехов, осуществляют контроль, наладку и ремонт оборудования, а также вмешиваются в производственный процесс, при возникновении нештатных или аварийных ситуаций.

Литература

1. Классификация САПР и их функциональное назначение. URL: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19836> (Дата обращения: 01.03.2023).
2. Трубицын Д.Н. Обзор существующих систем электронного документооборота при производстве твердотельных реле // Вестник Воронежского государственного технического университета. Т. 18. № 4. 2022. С. 25-29.
3. Разработка системы электронного документооборота. URL: https://orbrm.ru/articles/razrabotka_sistemy_dokumentooborota/ (Дата обращения: 01.03.2023).
4. Системы САПР. URL: <https://www.tadviser.ru/index.php> (Дата обращения: 02.07.2023).

5. Системы АСУ ТП URL: <https://roi4cio.com/categories/category/asu-tp-avtomatizirovannaja-sistema-upravlenija-tehnologicheskim-processom/> (Дата обращения: 02.07.2023).

Поступила 25.03.2023; принята к публикации 02.08.2023

Информация об авторах

Трубицын Денис Николаевич – аспирант кафедры информационных систем и цифровых технологий, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (302020, Россия, г. Орёл, Наугорское шоссе 29), e-mail: dragonclaw.hook@yandex.ru, тел. +7 (909)-229-4037, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6232-0363>

Коськин Александр Васильев – д-р техн. наук, профессор кафедры информационных систем и цифровых технологий, Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева (302020, Россия, г. Орёл, Наугорское шоссе 29), e-mail: koskin@ostu.ru, тел. +7 (4862)-41-98-15, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3673-9707>

FUNCTIONALITY OF THE AUTOMATED SYSTEM FOR THE DEVELOPMENT AND PRODUCTION CONTROL OF SOLID-STATE RELAYS

D.N. Trubitsyn, A.V. Koskin

Orel State University named after I.S. Turgenev, Orel, Russia

Abstract: a variant of an automated production control system (APCS) is considered. It combines the capabilities of electronic document management systems (EDMS), computer-aided design systems (CAD) and automated process control systems (APCS). The main functions and sets of documents used for automated production management at the stages of development of technical specifications (TOR), draft design, engineering design, prototype manufacturing and serial production are defined. Based on the tasks facing various production departments, a mode of access is proposed to various types of production documents, taking into account the need for documents to be approved by various production departments (technological, metrological, quality control department (QCD) and so on). The possibility of automatic generation of some documents is analyzed, if all the necessary information for their release is in other electronic documents included in the proposed workflow system. Considered the exchange of documents between different departments in the process of doing work. The necessary auxiliary functions of this system are considered, such as storing backup copies of documents and converting documents into widely used formats. The possibility of combining the system with the APCS system, and the need for functionality that ensures the conversion of documents into files suitable for the APCS system are considered. In conclusion, it was concluded that this system will reduce labor costs and reduce the time required for the development and manufacture of products, by automating the issuance of individual documents, as well as reducing the time required for the exchange of documents. In addition, integration with automated process control systems will significantly increase the automation of production, practically excluding a person from the direct management of production

Key words: APCS, EDMS, CAD, APCS solid-state relays, functions and documents of APCS

References

1. "Classification of CAD and their functional purpose", available at: <https://eduherald.ru/ru/article/view?id=19836> (accessed 01.03.2023)
2. Trubitsyn D.N. "Review of existing electronic document management systems in the production of solid state relays", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, vol.18, no. 4, 2022, pp. 25-29.
3. "Development of an electronic document management system", available at: https://orbrm.ru/articles/razrabotka_sistem_ydokumentirovaniya/ (accessed: 03.01.2023).
4. "CAD systems", available at: <https://www.tadviser.ru/index.php> (accessed: 07.02.2023).
5. "APCS systems", available at: <https://roi4cio.com/categories/category/asu-tp-avtomatizirovannaja-sistema-upravlenija-tehnologicheskim-processom/> (accessed: 07.02.2023).

Submitted 25.03.2023; revised 02.08.2023

Information about the authors

Denis N. Trubitsyn – Postgraduate student of the Department of Information Systems and Digital Technologies, Oryol State University named after I.S. Turgenev (29 Naugorskoe shosse, Orel 302020, Russia), e-mail: dragonclaw.hook@yandex.ru, tel. +7 (909)-229-4037, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6232-0363>.

Aleksandr V. Koskin – Dr. Sc. (Technical), Professor of the Department of Information Systems and Digital Technologies, Oryol State University named after I.S. Turgenev (29 Naugorskoe shosse, Orel 302020, Russia), e-mail: koskin@ostu.ru, tel. +7 (4862)-41-98-15, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3673-9707>

РАЗРАБОТКА IP-БЛОКОВ ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЕЙ ДЛЯ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА

А.В. Русанов¹, Л.В. Сопина², А.В. Бунина²¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия²АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия

Аннотация: предложены два сложнофункциональных (СФ/IP) блока операционных усилителей (ОУ), построенных на п-канальной и р-канальной дифференциальных парах. ОУ являются универсальными блоками, на основе которых можно построить множество различных электронных узлов. В настоящее время ОУ получили широкое применение как в виде отдельных чипов, так и в виде IP-блоков в составе более сложных интегральных схем. Разработанные IP-блоки ОУ предназначены для применения в интегральных схемах линейных стабилизаторов напряжения в качестве усилителей ошибки. В стабилизаторах напряжения усилитель ошибки выполняет ключевую роль, сравнивая опорное напряжение с выходным (или частью выходного) напряжением, и управляет проходным элементом для обеспечения этого равенства. Представлены описание электрических схем усилителей, основные электрические характеристики, результаты моделирования, указаны особенности разработки топологии интегральной схемы. ОУ разработаны на базе отечественного технологического процесса с проектными нормами 3 мкм. Разработка схемы и топологии проводилась в специализированной системе автоматизированного проектирования интегральных схем. Для моделирования схемы использовались сертифицированные математические модели полупроводниковых приборов. Разработанные топологии ОУ прошли верификацию, состоящую из проверки соблюдения проектных норм (Design rule check, DRC), восстановления электрической схемы из топологии и сравнения топологии с исходной схемой (Layout vs Schematic, LVS)

Ключевые слова: операционный усилитель, интегральные схемы, микросхема, аналоговые IP-блоки, аналоговые СФ блоки

Введение

ОУ являются универсальными блоками, на основе которых можно построить множество различных электронных узлов. В настоящее время ОУ получили широкое применение, как в виде отдельных микросхем, так и в виде IP-блоков в составе более сложных интегральных схем. Представленные в статье IP-блоки ОУ предназначены для применения в интегральных схемах линейных стабилизаторов напряжения в качестве усилителей ошибки. Усилитель сигнала ошибки сравнивает напряжения на своих входах и если они отличаются (если есть ошибка), то напряжение на выходе усилителя меняется таким образом, чтобы разность напряжений на его входах стала равна нулю, другими словами он стремится скомпенсировать ошибку.

IP-блок ОУ, построенного на п-канальной дифференциальной паре

С помощью сравнительного анализа современных стабилизаторов напряжения [1-9]

(табл. 1) установлены требуемые основные параметры для разработки усилителя ошибки: $A_u \geq 60$ дБ; $\varphi \geq 55^\circ$; и разработана схема ОУ (рис. 1).

Таблица 1
Сравнительный анализ существующих стабилизаторов напряжения

Источник	$U_{вых}$, В	U_{dr} , мВ	$I_{нагр}$, мА	I_n , мкА	φ , °	A_u , дБ	f_1 , МГц
[1]	3.3	0,2	50	544	60	60	-
[2]	-	200	50	-	52	90	-
[3]	-	-	-	-	90	73	0,07
[4]	-	200	200	250	83	64	7,65
[5]	1.3	200	100	38	-	-	-
[6]	-	192	50	51	76	80	-
[7]	1	200	50	-	52	-	-
[8]	1	200	100	23	80	75	0,4
[9]	1	500	100	145	67	84	-

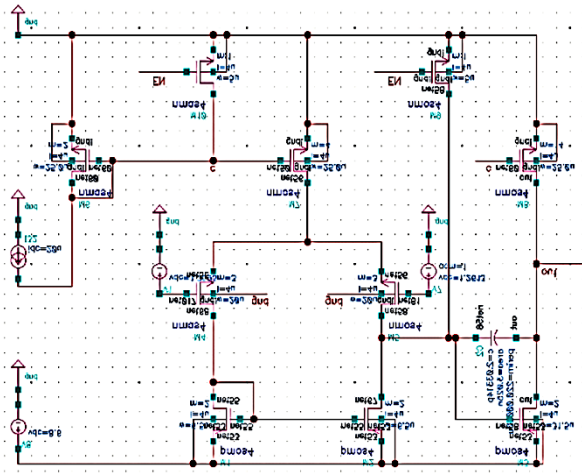


Рис. 1. Схема усилителя ошибки

Схема усилителя ошибки состоит из дифференциального, выходного каскада и цепи компенсации.

Входной каскад состоит из дифференциальной пары идентичных N-канальных транзисторов M4 и M5, затворы которых являются входами операционного усилителя.

Нагрузкой дифференциальной пары является токовое зеркало, собранное на p-канальных транзисторах M1 и M2. Питание каскадов операционного усилителя осуществляется через токовые зеркала на метал-оксид-полупроводник(МОП)-транзисторах M6 – M8.

Путем подбора размеров транзисторов M6-M8 (учитывая соотношения их ширины и длины) были получены заданные значения тока в каждой ветви. В первой ветви протекает ток источника равный 20 мкА. При увеличении ширины транзистора M7 в 3 раза получен ток, равный 60 мкА, в третьей, аналогичным образом ток был увеличен до 140 мкА. Ток в последней ветви выбирается исходя из полученного ранее значения тока затвора проходного элемента.

Транзисторы M8 и M3 образуют выходной каскад. В качестве цепи компенсации выбрали компенсацию Миллера с конденсатором в цепи обратной связи, емкость которого подобрана для обеспечения достаточного запаса по фазе для устойчивости схемы.

N-канальные транзисторы M9 и M10 работают в режиме «ключа», при срабатывании схемы защиты на их затворы подается напряжение, транзисторы открываются и выключают операционный усилитель.

Размеры транзисторов ОУ приведены в табл. 2.

Таблица 2

Размеры транзисторов усилителя ошибки

Транзистор	l, мкм	w, мкм	m
M1-M2	4	6.5	2
M3	4	31.5	2
M4-M5	4	20	3
M6	4	25	2
M7	4	25	4
M8	4	25	14
M9-M10	4	5	1

Амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) усилителя представлены на рис. 2, а полученные параметры сведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры операционного усилителя

Параметры		Значение	Единицы измерения
A_U	Коэффициент усиления	77.2	дБ
PM	Запас по фазе	58.44	°
f_1	Частота единичного усиления	10.17	МГц
Δf_{np}	Полоса пропускания	1,3	кГц
I_{II}	Ток потребления	187	мкА
HxL	Габариты топологии УО	529,5x310	мкм x мкм
PSRR	Коэффициент подавления пульсаций напряжения питания	127	дБ
SR	Скорость нарастания	20,49	В/мкс
t_d	Время установления	38,75	нс

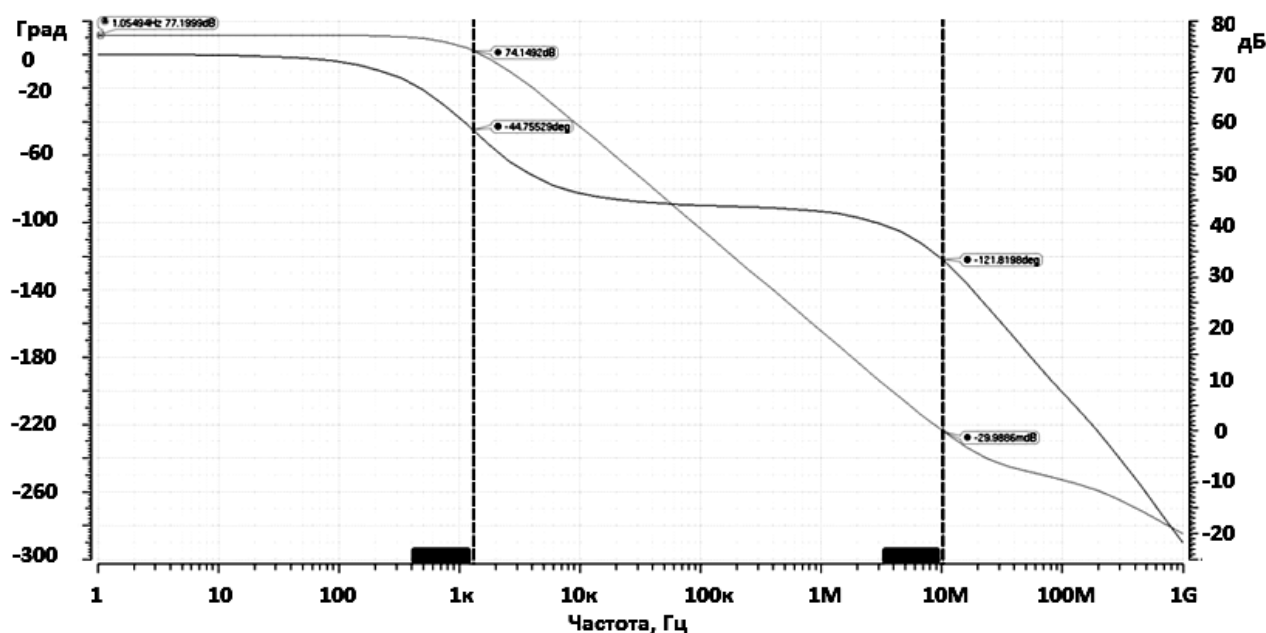


Рис. 2. АЧХ и ФЧХ усилителя ошибки

В ходе процесса производства интегральных схем из-за несовершенства оборудования, погрешностей в ходе проведения технологических операций, а также из-за внутренних и внешних электрических полей в пластине возникает разброс технологических параметров (как правило, параметры кристаллов, расположенных в центре пластины наиболее приближены к ожидаемым). Поэтому даже на одном кристалле, располагаясь на некотором расстоянии друг от друга резисторы, конденсаторы и транзисторы с одинаковыми физическими размерами могут иметь незначительные расхождения в параметрах (например, из-за разности толщины подзатворного диэлектрика, уровня легирования и т. д.).

Для уменьшения отклонения выходных параметров аналоговых блоков применяются специальные приемы топологического проектирования, такие как согласование элементов и их симметричное расположение.

Также в топологии для улучшения согласования используют фиктивные элементы, они применяются при разработке активных элементов и больших блоков.

Главной целью при разработке интегральных микросхем является компактное расположение элементов на минимальной площади кристалла.

На рис. 3 изображено расположение элементов, входящих в блок усилителя ошибки, и

их соединения. Операционный усилитель электрически изолирован от других блоков стабилизатора. Размещение транзисторов выполнено с использованием перекрестных связей, что уменьшает влияние рассогласующих факторов. Также используются фиктивные элементы – транзисторы – для достижения высокой степени согласования.

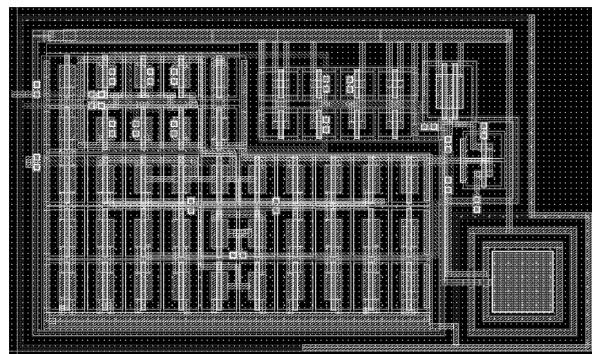


Рис. 3. Топология схемы усилителя

IP-блок ОУ, построенного на р-канальной дифференциальной паре

Описание устройства усилителя ошибки с дифференциальной парой на р-канальных транзисторах. Структурная схема ОУ основана на схеме из источника [10]. Принципиальная схема приведена на рис. 4.

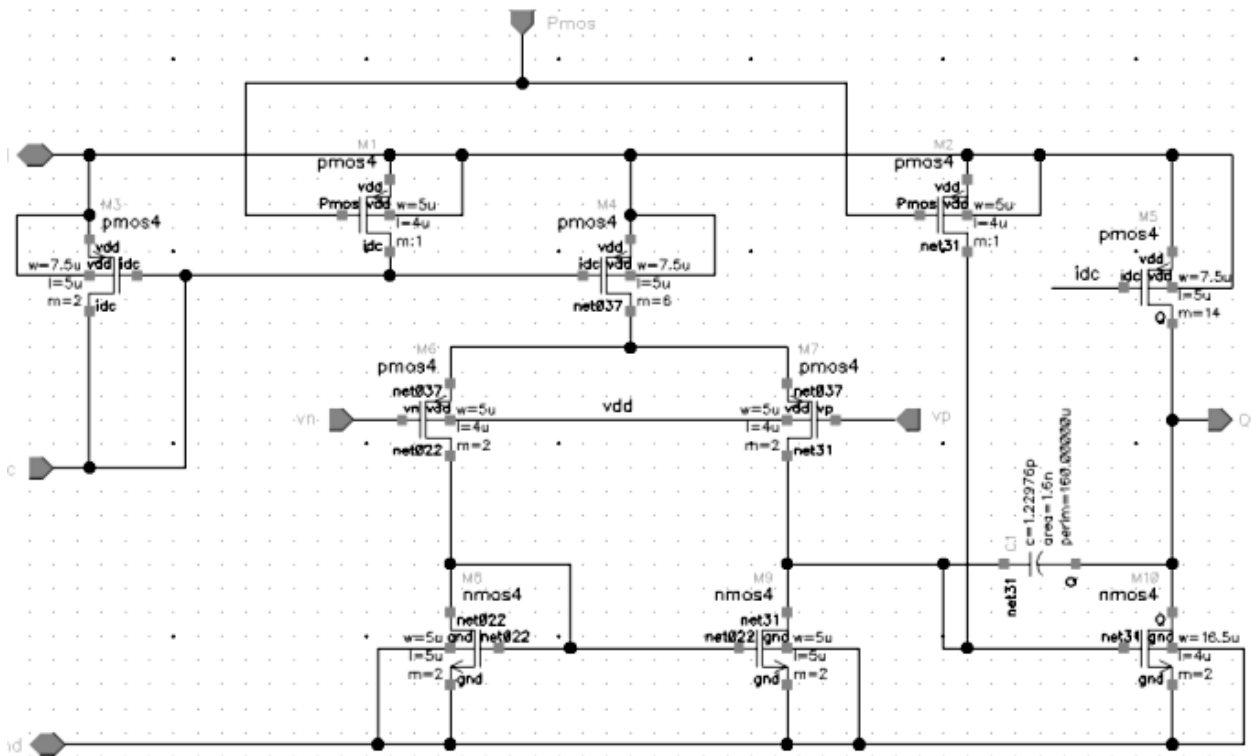


Рис. 4. Принципиальная схема усилителя ошибки

Рассматриваемая схема построена на основе двух каскадов – входного и выходного. Первый состоит из дифференциальной пары МОП-транзисторов р-проводимости M_6 и M_7 . Транзисторы имеют одинаковые размеры. Ток транзисторов задается с помощью токового зеркала, выполненного на транзисторах M_3 и M_4 . Ток источника, равный 20 мкА, преобразовывается в 60 мкА и распределяется между транзисторами дифференциальной пары. Входы операционного усилителя формируются за счет затворов р-канальных транзисторов дифференциальной пары. Нагрузкой для входного каскада является токовое зеркало, выполненное на п-канальных транзисторах M_8 , M_9 .

Выходной каскад построен на транзисторах M_5 и M_{10} . Р-канальный транзистор рассчитан таким образом, чтобы ток, протекающий через выходной каскад, был близок к 140 мкА. Эта величина была выбрана, полагаясь на ток заряда подзатворной емкости $I = 110$ мкА, и взята с небольшим запасом. N-канальный транзистор M_{10} является усилительным. Обеспечение низкого выходного сопротивления и высокой нагрузочной способности выполняется именно благодаря выходному каскаду.

Для обеспечения стабильности усилителя в схеме применена цепь компенсации Миллера, представленная в виде конденсатора C_1 . Два р-канальных транзистора M_1 и M_2 предназначены для управления выключением схемы при использовании схем защиты стабилизатора.

В табл. 4 сведены измеренные характеристики усилителя ошибки. АЧХ и ФЧХ представлены на рис. 5.

Таблица 4

Характеристики ОУ

Параметры		Значение	Единицы измерения
A_U	Коэффициент усиления	60,58	дБ
PM	Запас по фазе	76	°
f_1	Частота единичного усиления	6,72	МГц
Δf_{np}	Полоса пропускания	6,4	кГц
U_{II}	Напряжение питания	187	мкА
HxL	Габариты топологии УО	455,5x236.5	мкм x мкм
SR	Скорость нарастания	1.29	В/мкс

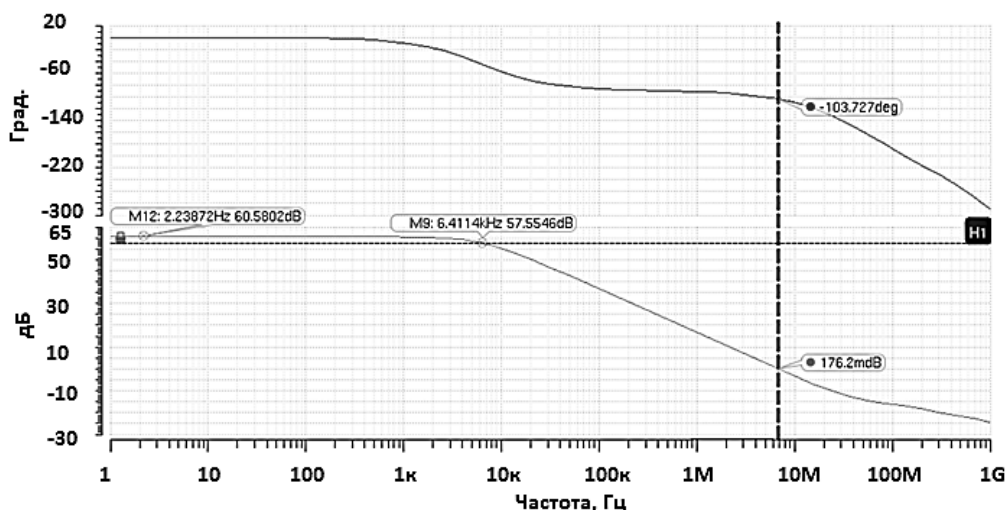


Рис. 5. АЧХ и ФЧХ усилителя ошибки

На рис. 6 изображено расположение элементов, входящих в блок усилителя ошибки, и их соединения. Операционный усилитель электрически изолирован от других блоков стабилизатора. Размещение транзисторов выполнено с использованием перекрестных связей, что уменьшает влияние рассогласующих факторов. Также используются фиктивные элементы – транзисторы – для достижения высокой степени согласования.

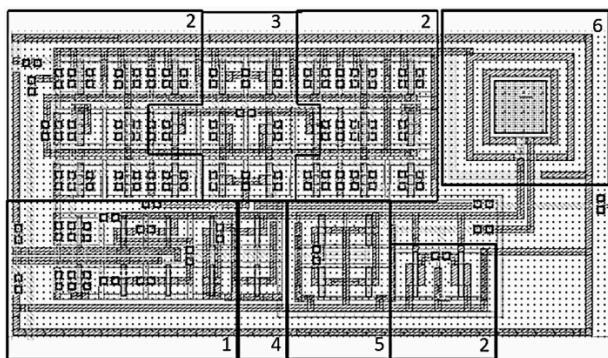


Рис. 6. Топология усилителя ошибки:

- 1 – дифференциальная пара на транзисторах M_6 и M_7 ;
- 2 – выходной каскад на транзисторах M_5 и M_{10} ;
- 3 – р-канальные транзисторы M_3 и M_4 , 4 – р-канальные транзисторы M_1 и M_2 для управления выключением схемы, 5 – п-канальные транзисторы M_8 и M_9 ,
- 6 – конденсатор компенсации Миллера

Заключение

В данной статье представлены IP-блоки ОУ, разработанные для отечественного технологического процесса с проектными нормами 3 мкм. Представленные усилители предназначены для применения в интегральных схемах

линейных стабилизаторов напряжения в качестве усилителя ошибки.

Литература

1. Kumar C.S., Sujatha K. Design and Simulation of Low Dropout Regulator // International Journal of Science and Research (IJSR). 2015. Vol. 4. No. 5. Pp. 1404-1408.
2. Giustolisi G., Palumbo G., Spitale E. A 50-mA 1-nF Low-Voltage Low-Dropout Voltage Regulator for SoC Applications // ETRI Journal. 2010. Vol. 32. No. 4. Pp. 520-529.
3. Lee H., Mok P.K.T., Leung K.N. Design of low-power analog drivers based on slew-rate enhancement circuits for CMOS low-dropout regulators // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2005. Vol. 52. No. 9. Pp. 563-567.
4. Kim -i. Y., Lee -s. S. A Capacitorless LDO Regulator With Fast Feedback Technique and Low-Quiescent Current Error Amplifier // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2013. Vol. 60. No. 6. Pp. 326-330.
5. Leung K.N., Mok P.K.T. A capacitor-free CMOS low-dropout regulator with damping-factor-control frequency compensation // IEEE Journal of Solid-State Circuits. 2003. Vol. 38. No. 10. Pp. 1691-1702.
6. Kamal Z., Hassan Q., Mouhcine Z. Full on-chip CMOS low dropout voltage regulator using MOS capacitor compensation // 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems. 2012. Pp. 1109-1114.
7. Manikandan P., Bindu B. A capacitor-less low-dropout regulator (LDO) architecture for wireless application // 2017 International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2). 2017. Pp. 222-224.
8. Zhan C., Ki W.-H. A high-precision low-voltage low dropout regulator for SoC with adaptive biasing // 2009 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2009. Pp. 2521-2524.
9. Abbasi M.U., Bagnall D., Bn V. A high PSRR capacitor-less on — Chip low dropout voltage regulator // IEEE 8th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics. 2010. Pp. 361-364.
10. Проектирование аналоговых КМОП микросхем: краткий справочник разработчика / под редакцией В.И. Эннса, Ю.М. Кобзева. 2-е издание, стереотип. М.: Горячая линия – телеком. 2016. 454 с.

Информация об авторах

Русанов Александр Валерьевич – канд. техн. наук, ассистент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ralval@rambler.ru

Сопина Лилия Вячеславовна – инженер, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков, 5), e-mail: sopina1803@gmail.com

Бунина Алина Владимировна – инженер, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники» (394033, Россия, г. Воронеж, ул. Ст. Большевиков, д. 5), e-mail: alina.bunina@list.ru

BANDGAP REFERENCE VOLTAGE SOURCE FOR A DOMESTIC TECHNOLOGICAL PROCESS

A.V. Rusanov¹, L.V. Sopina², A.V. Bunina²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Research Institute of Electronic Technology, Voronezh, Russia

Abstract: the article proposes two IP blocks of operational amplifiers (op-amps) built on n-channel and p-channel differential pairs. Op-amps are universal blocks on the basis of which you can build many different electronic devices. Currently, op amps are widely used, both in the form of individual chips and as IP blocks as part of more complex integrated circuits. The developed IP blocks are intended for use in integrated circuits of linear voltage stabilizers as error amplifiers. In voltage regulators, the error amplifier plays a key role by comparing the reference voltage to the output (or part of the output voltage) voltage and drives the pass element to ensure this equality. The description of the electrical circuits of amplifiers, the main electrical characteristics, the results of modeling are presented, the features of the development of the integrated circuit topology are indicated. The op amps are developed on the basis of the domestic BiCMOS technological process with design standards of 3 μm . The development of the scheme and topology was carried out in a specialized system for automated design of integrated circuits. To model the circuit, certified mathematical models of semiconductor devices were used. The developed layouts of the op-amp have passed verification, consisting of checking compliance with design standards (Design rule check, DRC), restoring the electrical circuit from the layout and comparing the layout with the original circuit (Layout vs Schematic, LVS)

Key words: reference voltage source, IP block, integrated circuit, microcircuit, ION

References

1. Kumar C.S., Sujatha K. "Design and Simulation of Low Dropout Regulator", *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 2015, vol. 4, no. 5, pp. 1404-1408.
2. Giustolisi G., Palumbo G., Spitale E. "A 50-mA 1-nF Low-Voltage Low-Dropout Voltage Regulator for SoC Applications", *ETRI Journal*, 2010, vol. 32, no. 4, pp. 520-529.
3. Lee H., Mok P.K.T., Leung K.N. "Design of low-power analog drivers based on slew-rate enhancement circuits for CMOS low-dropout regulators", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2005, vol. 52, no. 9, pp. 563-567.
4. Kim -i. Y., Lee -s. S. "A Capacitorless LDO Regulator With Fast Feedback Technique and Low-Quiescent Current Error Amplifier", *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, 2013, vol. 60, no. 6, pp. 326-330.
5. Leung K.N., Mok P.K.T. "A capacitor-free CMOS low-dropout regulator with damping-factor-control frequency compensation", *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, 2003, vol. 38, no. 10, pp. 1691-1702.
6. Kamal Z., Hassan Q., Mouhcine Z. "Full on-chip CMOS low dropout voltage regulator using MOS capacitor compensation", 2012 International Conference on Multimedia Computing and Systems, 2012, pp. 1109-1114.
7. Manikandan P., Bindu B. "A capacitor-less low-dropout regulator (LDO) architecture for wireless application", International Conference on Nextgen Electronic Technologies: Silicon to Software (ICNETS2), 2017, pp. 222-224.
8. Zhan C., Ki W.-H. "A high-precision low-voltage low dropout regulator for SoC with adaptive biasing", IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), 2009, pp. 2521-2524.
9. Abbasi M.U., Bagnall D., Bn V. "A high PSRR capacitor-less on - Chip low dropout voltage regulator", IEEE 8th International Symposium on Intelligent Systems and Informatics, 2010, pp. 361-364.
10. "Design of analog K-MOS microcircuits. Developer's Quick Reference Guide" ("Proyektirovaniye analogovykh K-MOP mikroskhem: kratkiy spravochnik razrabotchika"), ed. by V.I. Enns, Yu.M. Kobzev, Moscow, Goryachaya liniya – telekom, 2016, 454 p.

Submitted 30.03.2023; revised 01.08.2023

Information about the authors

Alexander V. Rusanov – Cand. Sc. (Technical), assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ralval@rambler.ru

Liliya V. Sopina – Engineer, JSC Research Institute of Electronic Technology (5 St. Bolshevikov str., Voronezh 394033 Russia), e-mail: sopina1803@gmail.com

Alina V. Bunina – Engineer, JSC Research Institute of Electronic Technology (5 St. Bolshevikov str., Voronezh 394033 Russia), e-mail: alina.bunina@list.ru

ОСНОВНЫЕ ПРОБЛЕМНЫЕ ВОПРОСЫ И СОВРЕМЕННЫЕ ПОДХОДЫ К ПРОТИВОДЕЙСТВИЮ МАЛОРАЗМЕРНЫМ РАЗВЕДЫВАТЕЛЬНО-УДАРНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ ЛЕТАТЕЛЬНЫМ АППАРАТАМ

Д.Г. Пантенков¹, В.П. Литвиненко², А.Н. Глушков³

¹АО «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий»,
г. Смоленск, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

³Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени
профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

Аннотация: как показал проведенный анализ событий 2022-2023 годов, применение малоразмерных разведывательных и разведывательно-ударных беспилотных летательных аппаратов (БпЛА) малого и легкого классов в вооруженных конфликтах и при нанесении ущерба объектам критически важной инфраструктуры стало носить массовый характер. Это легко объясняется доступностью их приобретения, весьма незначительной их стоимостью, с одной стороны, и широким функционалом, с другой стороны. Современные БпЛА малого и легкого класса способны находиться в воздухе от нескольких десятков минут до нескольких часов, осуществлять непрерывный мониторинг за интересующими объектами, проводить радио- и радиотехническую разведку заданных районов, проводить съемку подстилающей поверхности, выдавать целеуказание для атаки цели реактивными системам залпового огня, корректировать точность попадания снарядов ударных средств, осуществлять ретрансляцию информации удаленным ее получателям, выступать в качестве ударных дронов или дронов-камикадзе. По сути, современные конфликты перешли в стадию интеллектуального противоборства операторов робототехнических комплексов и систем, включая комплексы с БпЛА различного класса и целевого назначения. Статья является продолжением целой серии работ, в том числе других авторов, посвященных противодействию малоразмерным БпЛА, показаны расчётные количественные соотношения требуемого уровня излучаемой энергии в зависимости от расстояния до объекта воздействия в случае применения средств радиоэлектронной борьбы и функционального поражения бортового радиоэлектронного оборудования

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, малый класс, противодействие, основные способы, радиоэлектронная борьба, функциональное поражение, радиосвязь, навигация, эффективность, автоматизированный комплекс

Введение

В настоящее время в технологически развитых странах широкое распространение получили комплексы с беспилотными летательными аппаратами (БпЛА) как одноразового, так и многоразового применения, способные выполнять различные целевые задачи:

- ведение радио- и радиотехнической разведки источников радиоизлучений;
- ведение аэрофото- и видеосъемки с целью определения координат целей и выдачи целеуказания на реактивные системы залпового огня (РСЗО);
- непрерывное сопровождение наблюдаемого объекта в высоком качестве;
- постановка преднамеренных радиопомех радиоэлектронным средствам (РЭС) различного целевого назначения;
- ведение мониторинга химической, биологической и радиационной обстановки в

заданных районах;

- ретрансляция сигналов, в том числе и в условиях сложной фоноцелевой и помеховой обстановки, в целях гарантированного обеспечения требуемой зоны покрытия.

Широкий спектр выполняемых задач, относительно низкие стоимость и трудоемкость, затрачиваемые на подготовку инженерно-технических кадров и на эксплуатацию комплексов с БпЛА, по сравнению с пилотируемыми авиационными комплексами, сделали БпЛА буквально обязательными элементами сложных многоцелевых систем, способных решать задачи как ведомственного, так и государственного значения [1-25].

Малоразмерные БпЛА (до 30 кг) в масштабе времени, близкому к реальному, обеспечивают получение не менее 50 процентов разведывательной информации на тактическом и оперативном уровнях.

При этом, как показано в работах [1, 4], малоразмерные БпЛА обладают следующими отличительными особенностями, приводящим к затруднению их обнаружения современными

средствами противодействия:

- использование высокоманевренных (например, «змейка») или «рваных» (с периодическим зависанием или резким снижением скорости) режимов полета;

- использование в конструкции БпЛА пластиковых и композиционных материалов, слабо отражающих электромагнитные излучения (ЭМИ);

- использование для управления БпЛА не выделенных каналов радиоуправления, а уже существующей связной инфраструктуры мобильных операторов связи и точек доступа Wi-Fi;

- низкая акустическая, оптическая и радиолокационная заметность в силу незначительных геометрических размеров и малой эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) корпуса БпЛА;

- крайне низкая стоимость БпЛА малого и легкого классов в сравнении со стоимостью современных ракет систем ПВО, что приводит к неэффективному экономическому размену при противодействии подобным БпЛА («война на истощение»).

В связи с вышесказанным, борьба с малоразмерными БпЛА является одной из важнейших задач как при проведении боевых действий в условиях реальной обстановки, так и при защите стратегически значимых объектов от массированных атак с использованием БпЛА малого и легкого классов [4].

Типовой состав бортового радиоэлектронного оборудования (БРЭО) БпЛА:

- система навигации (навигационный приемник GPS) и управления полетом;

- система связи, обеспечивающая прием команд управления «НПУ – БпЛА» и передачу информации «БпЛА – НПУ» (НПУ – наземный пункт управления);

- система управления БпЛА (бортовой компьютер), обеспечивающая управление всем БРЭО БпЛА;

- целевая (полезная) нагрузка, которая в зависимости от назначения БпЛА может иметь средства телевизионной, инфракрасной, лазерной, радиолокационной разведки, радиоэлектронной борьбы (РЭБ), а также авиационного поражения целей.

Нарушение работы радиоэлектронных средств БпЛА различного назначения может быть осуществлено:

- путем их физического поражения огнестрельным оружием или оружием со взрывча-

тым веществом;

- путем создания им преднамеренных помех во всем диапазоне электромагнитных волн;
- функциональным поражением (ФП) сильными электромагнитными полями.

1. Основные способы борьбы с малоразмерными БпЛА

1.1. Огневое поражение малоразмерных БпЛА

Эффективность огневого поражения малоразмерных БпЛА, имеющих ЭПР менее $0,01 \text{ м}^2$, крайне низкая. В настоящее время на вооружении РФ находятся комплексы противовоздушной обороны ближней и малой дальности: зенитный ракетный комплекс (ЗРК) «Тор-М1», «Тор-2Э», «Бук-М2Э», «Бук-М3», «Морфей», «Витязь», «Стрела-10М3», зенитный ракетно-пушечный комплекс (ЗРПК) «Панцирь-С1» и «Сосна». Практический опыт стрельб по малоразмерным БпЛА с использованием этих комплексов ПВО свидетельствует о невысокой эффективности их поражения. Стрельба ракетным вооружением ЗРК «Тор» и ЗРПК «Панцирь-С1» по малоразмерным БпЛА практически невозможна. Причиной тому является малая дальность обнаружения малоразмерных БпЛА, которая составляет порядка 5–7 км для столь малой ЭПР, что практически совпадает с ближней границей зоны поражения ЗУР [1,2]. Применение пушечного вооружения принципиально возможно, но по причине малых размеров БпЛА, вероятность поражения невелика. Комплекс ЗРК «Стрела-10М3» обеспечивает обнаружение малоразмерных целей в ясную погоду на дальности от 1,3 км до 4,5 км. Это не позволяет эффективно бороться с ними, а захват цели инфракрасным каналом вообще невозможен из-за ее крайне слабого теплового излучения [1, 2].

Основные факторы, являющиеся причиной низкой эффективности борьбы с малоразмерными БпЛА [4]:

- небольшие габариты (размах крыла от 0,95 м до 1,6 м, длина крыла – не более 1 м) и, как следствие, малая уязвимость конструкций несущих поверхностей от огневого воздействия средств ПВО;

- малые величины эффективной площади рассеяния ($0,01\text{--}0,1 \text{ м}^2$) и тепловой контрастности;

- малые скорости полета (10–30 м/с);

- возможность полета на предельно малых высотах (до 100 м).

1.2. Радиоэлектронное подавление каналов навигации и управления БпЛА

Практическая возможность и реализуемость радиоэлектронного подавления (РЭП) систем связи и навигации комплексов с БпЛА не раз подтверждена как рядом технических экспериментов, так и боевыми действиями в вооруженных конфликтах различной интенсивности [10, 11, 17, 18, 21].

Может возникнуть ситуация, когда БпЛА, не входя в зону поражения систем противовоздушной обороны (ПВО), будет выполнять раз-

ведывательный полет, вскрывая позиции войск противника и осуществлять целеуказание для своих ударных средств. В этом случае использование средств РЭП позволит воздействовать как на канал приема данных с целевых нагрузок БпЛА (преимущественно средствами авиационного и космического базирования), так и на командно-телеметрический канал БпЛА (рис. 1). Кроме РЭП каналов управления и сброса целевой информации БпЛА, необходимо обеспечить РЭП канала приема сигналов спутниковой навигации [10, 11, 17, 18, 21].

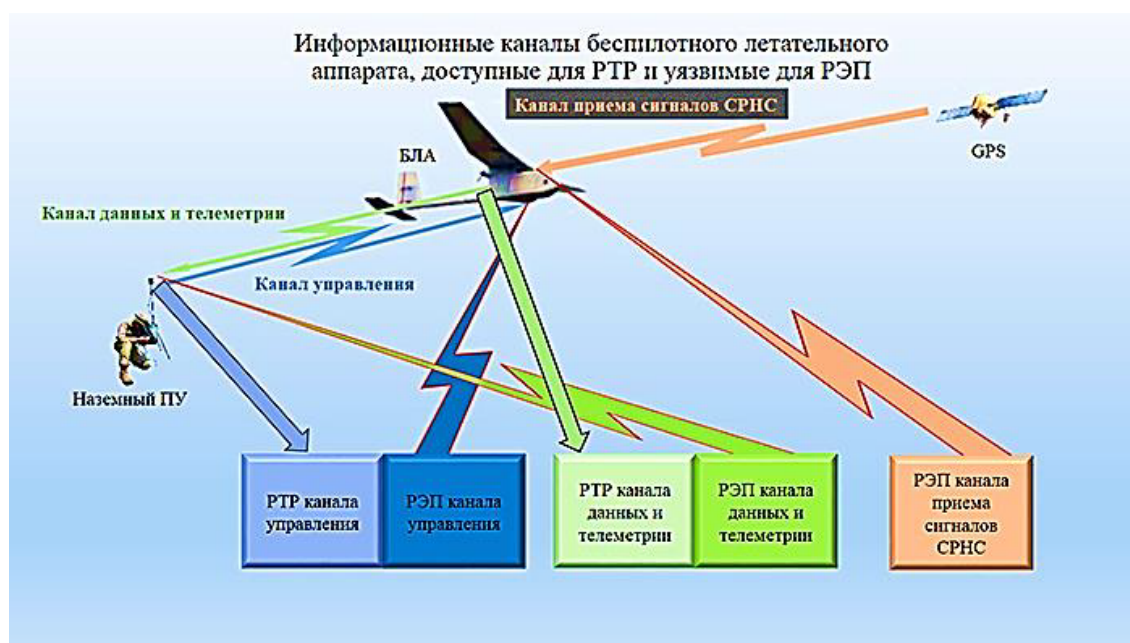


Рис. 1. Основные используемые информационные каналы БпЛА

При отсутствии обратной связи с БпЛА и потере самим БпЛА сигналов управления и геопозиционирования, полет разведывательного (разведывательно-ударного) БпЛА завершится его досрочным возвращением к месту взлета, хаотичным барражированием на местности или его безвозвратной потерей [1-4].

1.2.1. Радиоэлектронное подавление каналов управления и передачи данных

РЭП внешних радиосвязных командных линий управления полетом БпЛА «НПУ – БпЛА» решаются стандартными известными методами: разведка параметров радиосигналов управления и формирование шумовых, имитирующих или других типов помех [1, 11].

Энергетический потенциал передатчика канала «НПУ – БпЛА» при дальности связи до 70 км составляет 30-50 Вт. В этом случае при

коэффициенте подавления, равному 1-2 и дальности «станция помех – БпЛА» до 30 км энергетический потенциал передатчика помех должен составлять 10-20 Вт. Аналогично, необходимая мощность передатчика станции помех для РЭП канала «БпЛА – НПУ» при мощности передатчика БпЛА 2-5 Вт и дальности «станция помех – НПУ БпЛА» 30-50 км составляет 5-10 Вт.

Таким образом, требуемые значения уровня мощности передатчиков станций помех составляют десятки Вт, что легко реализуется, используя твердотельную электронную компонентную базу для рабочих частот до 8 ГГц. Создание приёмной аппаратуры также не представляет особых проблем, имея в виду технические решения станций радиотехнической разведки типа «Автобаза-М».

При этом возможности комплексов РЭБ с БпЛА, реализующих подавление каналов управления, передачи данных и навигации,

существенно снижаются при применении на БпЛА каналов с псевдослучайной перестройкой рабочей частоты (ППРЧ), направленных спутниковых антенн, помехоустойчивых адаптивных антенных решеток спутниковых радионавигационных систем (СРНС) [1, 11].

Значительной проблемой организации радиоэлектронного подавления каналов связи с НПУ. В случае подавления канала «НПУ – БпЛА» необходима радиовидимость на линии «БпЛА – приёмная аппаратура станции помех». При этом радиовидимость линии «передатчик станции помех–БпЛА» реализуется за счёт высоты полёта БпЛА. Во втором случае при подавлении приёмных устройств наземного пункта управления полётом БпЛА необходимо обеспечение радиовидимости на линии

«передатчик станции помех – НПУ». Радиовидимость приёмной аппаратуры станции помех сигналов передатчика БпЛА обеспечивается высотой полёта БпЛА.

Итак, во всех случаях необходим подъём приёмной или передающей аппаратуры станции помех на высоту равную или большую высоте полёта малоразмерных БпЛА, т.е. на 300-500 метров.

В качестве носителя аппаратуры станции помех могут быть использованы самолёты, вертолёты, БпЛА и привязные аэростаты.

Оценка вариантов размещения аппаратуры показывает, что наиболее предпочтительным является вариант аэростата, как обеспечивающий достаточно длительное время (до 30 суток) без дозаправки газом, заданную высоту подъёма аппаратуры (рис. 2).

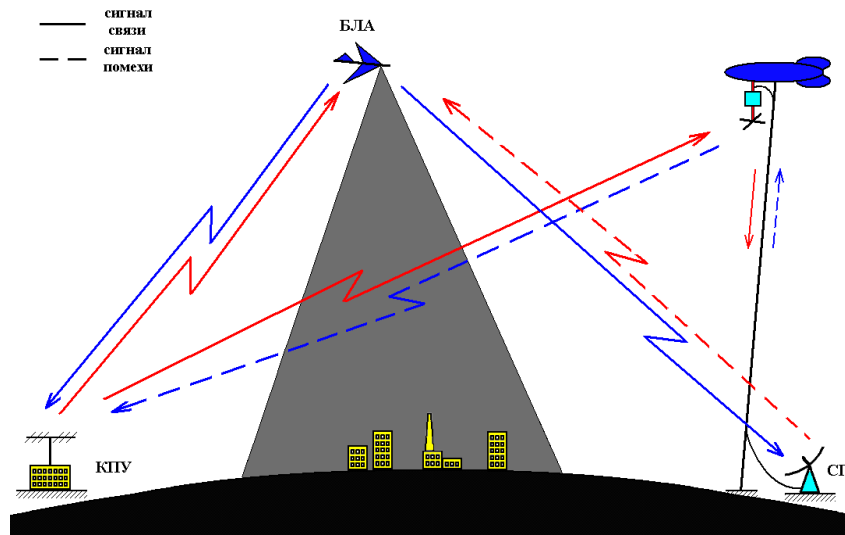


Рис. 2. Схема организации радиотехнической разведки и РЭП информационных каналов связи НПУ и БпЛА

Анализ вариантов построения станции помех информационным каналам БпЛА показывает, что целесообразно оказывать информационное воздействие как на НПУ, так и на БпЛА.

Аппаратура радиотехнической разведки и пеленгации размещается на наземном носителе. Прототипом такой аппаратуры может быть модернизированный комплекс «Автобаза-М», обеспечивающий обнаружение, пеленгацию, определение параметров излучения и координат БпЛА методом триангуляции в всем диапазоне рабочих частот каналов связи «БпЛА – НПУ». Тактико-технические характеристики комплекса «Автобаза-М» обеспечивают одновременное обнаружение и траекторное сопровождение 150 радиоизлучающих воздушных целей в зоне радиусом до 400 км.

Оценки показывают, что при излучаемой

мощности передатчика станции помех 10 Вт потребляемая мощность усилителя составит 50-70 Вт, а вес 10-15 кг, что позволяет применить аэростат с объёмом 200-300 м³ и линейным размером 6-8 м.

При необходимости подавления информационного канала связи «НПУ – БпЛА» в качестве полезной нагрузки на аэростате устанавливается приёмопередающая аппаратура, обеспечивающая усиление и ретрансляцию радиосигналов канала связи «НПУ – БпЛА» на наземную станцию, определение параметров идентификации и формирование помех приёмной аппаратуре БпЛА наземным передатчиком станции помех.

Безусловно, целесообразно создание комплекса, обеспечивающего решение задач разведки и подавления каналов «НПУ – БпЛА» и

«БпЛА – НПУ». При этом, полезной нагрузкой на аэростате должны быть приёмник-ретранслятор и передатчик помех. Вес полезной нагрузки будет составлять 20-30 кг, что потребует применить аэростат с объёмом 500 м³.

Возможно также размещение аппаратуры РЭБ на БпЛА. Применение в качестве средств РЭБ БпЛА снимают определенные ограничения по применению и способны решать задачи радиоэлектронного подавления в максимальной близости к поражаемым объектам, а также быть практически незаметными для средств разведки противника.

Дальнейшая проработка вопросов повышения эффективности борьбы с БпЛА показывает, что возможно также применение так называемых «интеллектуальных» помех. Механизм подобного воздействия нарушает не штатное функционирование поражаемого РЭС, а логику его работы путем введения в его управляющие системы недопустимых или ложных данных. Применение таких помех может привести к блокированию команд управления БпЛА, перехвату передаваемой с БпЛА информации, а также перехвату управления этими БпЛА с возможностью их последующей посадки.

1.2.2. Радиоэлектронное подавление приёмников спутниковой радионавигационной системы

Подавление навигационного канала приёмника GPS обеспечивает исключение навигации в автономном режиме полета БпЛА и, следовательно, выполнение ими боевых задач.

Теоретические и экспериментальные исследования показывают, что для обеспечения эффективного подавления приёмников – потребителей GPS на дальностях до 30 км при сопряжённых спектрах сигналов шумовых помех и сигналов GPS, энергетический потенциал станции помех должен быть не менее 200 Вт для C/A кода и 1500 Вт для P/Y кода GPS одного частотного канала. Для подавления одновременно трёх частотных каналов энергетический потенциал станции помех должен быть увеличен в три раза [10, 17, 18].

Для снижения энергетического потенциала на 10-15 дБ можно формировать ретрансляционные, когерентные квазинепрерывные помехи со скажностью помеха/пауза не менее пяти.

Отличиями воздействия шумовой и ретрансляционной помех является:

- при шумовой помехе исключается возможность приёма сигналов GPS и приёмник БпЛА переходит в режим поиска сигналов, т.е.

фактически исключается возможность использования GPS приёмника для навигации;

- при ретрансляционной помехе, индикатор-определитель местоположения GPS приёмника будет определять станции помех, т.е. в случае передачи по каналу связи «БпЛА – НПУ» координат местоположения БпЛА будут передаваться координаты местоположения станции помех.

В настоящий момент разработаны соответствующие технологии и известны технические решения по возможности изготовления станций помех подавления GPS приёмников, в этом числе установленных на БпЛА, при этом более предпочтительным является применение станции помех с шумовыми сигналами, несмотря на более высокий энергетический потенциал, но исключающий возможность определения местоположения станции помех.

Теоретически исключение определения местоположения станции помех при ретрансляционной помехе возможно путём создания пространственно-распределённой системы РЭБ, т.е. обеспечение подавления GPS приёмников, несколькими (3-5) разнесёнными на местности станциями помех.

Для РЭП информационных каналов передачи данных и приемной аппаратуры СРНС возможно использовать комплекс типа «Репеллент», Р-330Ж «Житель», «Шиповник-АЭРО», «Крона-2М», «Солярис-Н» и пр. [1].

Комплексы такого класса обеспечивают выявление сигналов каналов управления и передачи данных наземных пунктов управления, бортовых средств беспилотных летательных аппаратов и противодействие их работе с выполнением:

- панорамного обнаружения сигналов в заданном диапазоне и их экспресс-анализа по частотному, энергетическому и пространственному признакам, а также проведения детального технического анализа, пеленгования и траекторного сопровождения полётов БпЛА;

- постановки различных видов помех по обнаруженным и классифицированным сигналам и постановки помех навигационной аппаратуре потребителей (НАП) спутниковых радионавигационных систем;

- записи, накопления и архивирования в базах данных результатов технического анализа и пеленгования для последующей обработки, технического анализа радиосигналов в режиме реального времени и в режиме отложенного анализа и других задач.

Перечисленные выше комплексы относятся к наземной аппаратуре обнаружения, со-

провожения, пеленгования и классификации сигналов радиосредств управления и передачи данных НПУ и бортовых средств малоразмерных БпЛА, противодействия их работе в диапазоне в основном от 0,3 ГГц до 6,4 ГГц.

Антенны РТР и РЭП каналов сброса целевой информации и управления размещаются на телескопических мачтах с высотой подъема до 20 м, что позволяет обеспечить обнаружение и подавление НПУ БпЛА на дальности до 10 км. Используемая аппаратура способна распознавать все типы беспилотных летательных аппаратов.

Одновременное применение модулей подавления канала управления и канала приема сигналов СРНС обеспечивает комплексное радиоэлектронное подавление перечисленных информационных каналов и приводит к срыву выполнения боевой задачи БпЛА.

1.3. Функциональное поражение РЭА БпЛА

1.3.1. Функциональное поражение РЭА БпЛА электромагнитными импульсами

Функциональное поражение (ФП) нацелено на выведение из строя (нарушение работоспособности) чувствительных элементов радиоэлектронной аппаратуры БпЛА. Воздействие сильными электромагнитными полями приводят к нарушению функционирования отдельных элементов РЭС или системы в целом [1]. При этом физические разрушения объектов поражения практически отсутствуют.

Средства ФП способны поражать любые объекты, использующие элементную базу современной электроники независимо от класса РЭС, диапазона рабочих частот, видов и параметров рабочих сигналов, степени помехозащищенности в традиционном ее понимании (рис. 3). Поражаются узлы и элементы таких электронных средств, которые не подвержены воздействию традиционных видов помех: передающие устройства, блоки питания, инерциальные системы наведения, вычислительные средства, элементы антенно-фидерных трактов, волоконно-оптические линии связи (ВОЛС).

По мере развития и совершенствования электронной техники снижаются уровни рабочих напряжений и мощностей, выделяемых на нагрузках схемных элементов. Одновременно уменьшаются уровни энергии внешнего воздействия, способные вызвать нарушения в работе этой техники. Широкое распространение получила цифровая техника, весьма чувствительная к возмущениям импульсного характе-

ра. Таким образом, платой за возросшие возможности радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) явилось возрастание уязвимости ее элементов и прежде всего тех, которые имеют высокую степень интеграции, от мощного электромагнитного излучения, индуцирующего большие токи в электрических цепях РЭА.

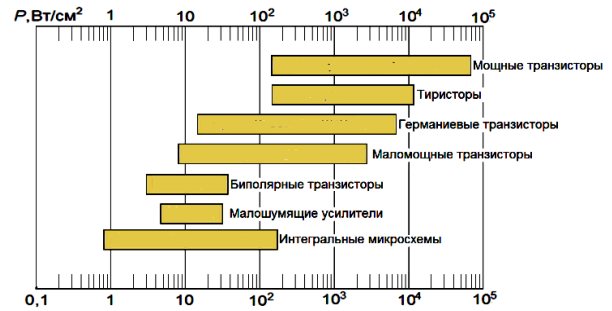


Рис. 3. Уровни поражения полупроводниковых приборов при длительности электромагнитного импульса 1 нс

Электромагнитное излучение проникает в электронные системы не только через антенну или оптическую систему, но и через провода по цепям питания, через различные технологические люки, зазоры, отверстия и тому подобные неоднородности сплошных экранов. ФП обладает внеполосным воздействием, т.е. поражает РЭС любого класса даже тогда, когда рабочая частота воздействующего излучения далеко отстоит от полосы пропускания основного канала приема поражаемого РЭС. При воздействии средств ФП может быть дезорганизована работа банков, систем навигации и управления транспортом, оборудования медицинского мониторинга и др.

Эффективность воздействия ЭМИ на РЭС зависит от параметров электромагнитного излучения и конструктивных особенностей полупроводниковой элементной базы.

Исходя из теоретических оценок и экспериментальных данных уверенно можно утверждать лишь то, что устойчивость РЭС падает с уменьшением размеров p - n переходов полупроводниковых приборов и технологического зазора микросхем.

Эффективность функционального поражения элементной базы, кроме того, зависит от длительности воздействующего на нее импульса электромагнитного поля и от числа импульсов в пачке поражающего излучения (рис. 4). При этом эффективность воздействия СВЧ-импульсов на РЭС растет с уменьшением длины волны излучения.

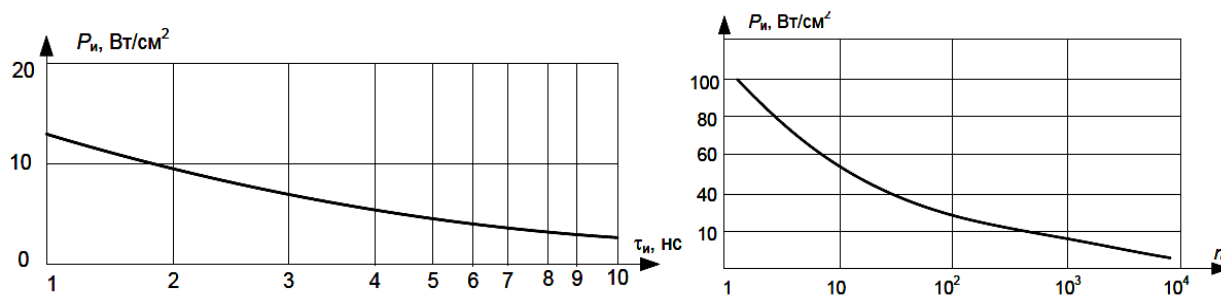


Рис. 4. Зависимости уровня поражения РЭС от длительности воздействующего импульса τ_n и от числа импульсов в пакете n

Эффект функционального поражения проявляется в следующем.

1. Прекращение функционирования отдельных элементов РЭС или РЭС в целом, вызванное разрушением структуры этих элементов. Разрушение структуры приводит к невозстанавливаемым (катастрофическим, необратимым) отказам РЭС или их элементов.

2. Нарушение функционирования отдельных элементов РЭС или РЭС в целом, вызванное изменением физической структуры этих элементов. Такое нарушение приводит к восстанавливаемым (временным, обратимым) отказам, сопровождаемым ухудшением параметров РЭС после их восстановления, либо к сохранению этих параметров, если со временем структура элементов восстановится полностью. Интервал временного выхода из строя элементов РЭС изменяется в широких пределах – от единиц миллисекунд до десятков минут (а иногда и часов).

3. Функциональные нарушения работоспособности РЭС (ложные срабатывания и сбои в работе исполнительных схем, искажения выходных сигналов обнаруживающих и анализирующих устройств и т.д.).

К настоящему времени сформировались следующие направления разработки и использования средств ФП. Первое направление предполагает создание мобильных средств многократного применения на базе генераторов мощных радиоимпульсов СВЧ-излучения длительностью от нескольких наносекунд до микросекунд с использованием в качестве генератора обычных или релятивистских вакуумных приборов (типа магнетрон, клистрон, гиротрон, черенковский генератор, виркатор и др.). Для уменьшения длительности импульса и повышения его амплитуды применяются методы сжатия СВЧ сигнала, при этом длительность исходного импульса может быть уменьшена на 2-3 порядка, а выходная мощ-

ность составлять более 1 ГВт.

Второе направление предполагает формирование видеоимпульсов наносекундной длительности (от долей до единиц наносекунд) с использованием специальных режимов в полупроводниковых диодах и транзисторах (дрейфовые диоды и транзисторы с резким восстановлением, диоды с запаздывающим лавинным пробоем, SOS-диоды, диодные лавинные обострители и др.). Формирование видеоимпульсов мощностью в десятки – сотни мегаватт и более осуществимо с помощью последовательно-параллельных высоковольтных сборок полупроводниковых структур. Экспериментальные результаты по использованию полупроводниковых приборов показали, что на нагрузке 50 Ом возможно формирование высоковольтных импульсов длительностью 1-2 нс мощностью 0,75-1 ГВт при частоте повторения импульсов до 3,5 кГц.

Еще одним из направлений развития средств ФП является создание средств одноразового применения на основе электромагнитных боеприпасов (ЭМБ).

Объектами функционального поражения могут быть любые радиоэлектронные средства и системы, однако при этом необходимо на входных устройствах поражаемых РЭС обеспечить не менее 2 Вт/см^2 мощности излучения. Если предполагается использование средств функционального поражения в тактической зоне боевых действий на расстоянии до 10 км, тогда эквивалентная мощность излучения должна составлять не менее 10^{13} Вт (рис. 5).

Реализация больших энергетических потенциалов в станциях функционального поражения РЭС возможна с применением активных фазированных антенных решеток (АФАР), суммирующих мощности передающих модулей, входящих в состав передающей аппаратуры станции.

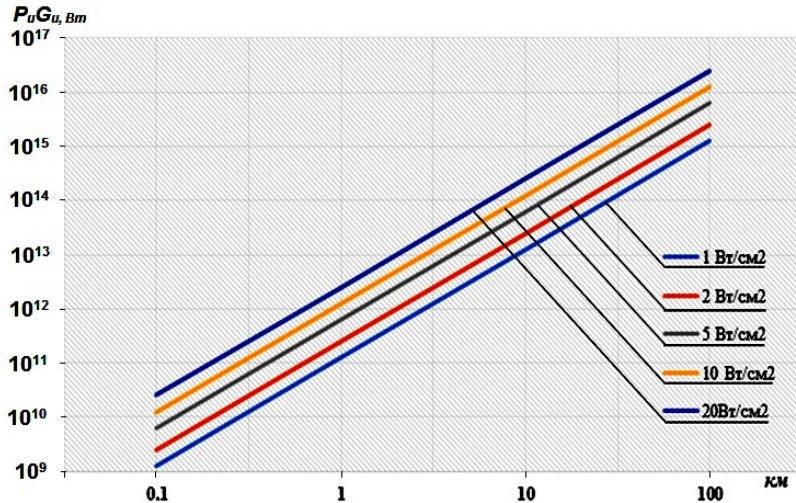


Рис. 5. Зависимость энергетического потенциала станции функционального поражения от дальности

Количество элементов ФАР будет зависеть от используемой элементной базы, решаемых задач и способов боевого применения средств ФП.

Отсутствие генераторов СВЧ-излучения, приемлемых по массогабаритным характеристикам и выходной мощности для создания АФАР с энергетическим потенциалом не менее 1 ТВт, определяет необходимость создания станции функционального поражения на базе генераторов видеоимпульсов.

Основными объектами ФП могут быть роботизированные комплексы (в первую очередь малоразмерные БпЛА), высокоточное оружие (прежде всего крылатые ракеты морского, наземного и воздушного базирования), а также любые другие РЭС, находящиеся в зоне досягаемости для функционального поражения.

В настоящее время проводится комплекс работ по созданию средств ФП как на базе генераторов радиоимпульсов, так и видеоимпульсов. Созданный в ОИВТ РАН экспериментальный образец комплекса функционального поражения с использованием в качестве генераторов клистронов показал, что имеются технологические возможности созданию средств ФП с необходимыми техническими параметрами. Вместе с тем, по массогабаритным характеристикам такой комплекс не может быть использован в тактической зоне боевых действий. Для тактической зоны необходимо использовать полупроводниковые генераторы видеоимпульсов, применение которых обеспечит создание подвижного комплекса с дальностью ФП до 10-15 км с энергетическим потенциалом станции не менее 10^{13} Вт. Это обеспечит уровень мощности сигнала на поражаемом РЭС >2 Вт/см².

1.3.2. Функциональное поражение РЭА БпЛА лазерным излучением

Лазер, являющийся оптическим квантовым генератором, способен формировать сильное ЭМИ в оптическом диапазоне длин волн с высокой плотностью энергии в весьма узком телесном угле [1, 22-25]. Свойство очень узкой направленности луча и высокая энергетическая плотность излучения позволяют применять лазер в качестве средства функционального поражения.

Лазеры способны генерировать ЭМИ в широком оптическом диапазоне, однако, как средства ФП практический интерес представляют оптические квантовые генераторы, работающие в так называемых «окнах прозрачности» атмосферы, которым соответствуют волны оптического диапазона $\lambda = 0,5 - 2$ мкм, за исключением «непрозрачных» участков $\lambda = 0,95; 1,15; 1,3 - 1,5$ мкм [1, 23, 24].

Можно выделить следующие механизмы функционального поражения объектов лазерным оружием [1, 24]:

1. Непосредственное поражение электронных приборов путем прямого воздействия мощного узконаправленного лазерного ЭМИ.

2. Выведение из строя объекта за счет вторичного индуцированного излучения плазмы, порождаемой взаимодействием сильного электромагнитного поля и твердого вещества (например, материал корпуса цели). В частности, при облучении управляемых ракет лазерным излучением с плотностью потока мощности порядка 10 Вт/см² вблизи поверхности обтекателя возникает мощное плазменное образование, являющееся источником некогерентного оптического излучения [22-25].

В этом случае возможно обратимое (временное) поражение РЭА, которое через некоторое время восстанавливает свои функции.

3. Деструктивное воздействие на поверхностный слой материала цели, в результате лазерное излучение может разрушить тонкостенные оболочки тепловым или ударным воздействием. В этом случае поражающее действие лазерного оружия определяется в основном термомеханическим и ударно-импульсным воздействием лазерного луча на цель и достигается за счет нагревания до высоких температур материалов объекта. Это вызывает расплавление или даже испарение материалов.

Действие лазерного излучения отличается внезапностью, скрытностью, отсутствием внешних признаков в виде огня, дыма, звука, высокой точностью, прямолинейностью распространения и практически мгновенным действием.

2. Альтернативные способы борьбы с малоразмерными БпЛА

К альтернативным способам борьбы с малоразмерными БпЛА можно отнести [1]:

1. Использование БпЛА-перехватчиков. Предполагается двухэтапное применение такого БпЛА в автоматическом и полув автоматическом режимах. Предварительное целеуказание для БпЛА-перехватчика должно осуществляться с НПУ. В качестве средства поражения на БпЛА-перехватчике может быть установлена малокалиберная легкая гладкоствольная пушка, в качестве поражающих элементов – композитная дробь.

2. Использование горючих аэрозолей. Аэрозольное вещество заблаговременно распыляется на трассе полета БпЛА и впоследствии поджигается, например, с использованием трассирующих боеприпасов.

3. Использование специальных клейких и вязких аэрозолей:

– клейкие аэрозоли: при взаимодействии с несущими аэродинамическими поверхностями и элементами управления БпЛА прилипают к ним, изменяя их геометрическую конфигурацию и свойства обтекания воздухом, что делает БпЛА аэродинамически неустойчивым и приводит к его падению;

– вязкие аэрозоли: изменяют свойства (плотность и вязкость) воздуха в котором движется летательный аппарат, также делают БпЛА аэродинамически неустойчивым, что приводит к его «сваливанию» или «опрокидыванию».

4. Использование специальных сетей.

Сеть, опутав БпЛА, блокирует двигатели и элементы системы управления БпЛА, лишая его возможности продолжать полет. Анализ показал, что существующие наземные пусковые установки, выстреливающие сеть, обеспечивают дальность перехвата БпЛА 100-300 м, точность – порядка 0,5 м, при диаметре выстреливаемой сети от 2,5 до 10 м.

5. Противодействие БпЛА с использованием специально тренированных птиц.

6. Вывод БпЛА из положения устойчивого полета в закритические условия путем накрытия спутным следом от пролетающего летательного аппарата.

Заключение

Современные беспилотные летательные аппараты могут иметь на борту широкую номенклатуру целевых (полезных) нагрузок (в зависимости от взлетной массы), которая обеспечивает решение самых разнообразных поставленных целевых задач.

С позиций противоборства с БпЛА необходимо подчеркнуть, что борьба с БпЛА среднего, тяжелого и сверхтяжелого классов является прерогативой систем ПВО, поскольку БпЛА таких классов являются достаточно автономными (независимыми от оператора), но при этом заметными на экранах радаров.

Особую актуальность в свете событий 2022-2023 гг. приобрела борьба с малоразмерными БпЛА малого и легкого классов, которые при относительно невысокой стоимости могут решать целый комплекс разведывательно-ударных целевых задач.

Как показано в [4], БпЛА малого и легкого классов, с одной стороны, обладают низкой акустической, оптической и радиолокационной заметностью в силу незначительных геометрических размеров и малой ЭПР корпуса БпЛА, могут летать на очень низких высотах, могут применяться в составе группы, что в совокупности приводит к определенным сложностям с точки зрения противодействия им.

С другой стороны, малоразмерные БпЛА в силу понятных ограничений по массогабаритным характеристикам не могут иметь на борту всю номенклатуру БРЭО, необходимую для их автономного функционирования (без участия оператора) – навигационную аппаратуру потребителей GPS/ГЛОНАСС, комплексированную с инерциальными навигационными системами; помехоустойчивые радиомодемы с направленными антенными системами; аппаратуру криптографической защиты информации; наличие

оптико-электронных (ОЭС) и радиолокационных систем (РЛС) на одном БпЛА для работы при любых погодных условиях.

В связи с вышесказанным, основные выводы с позиций противоборства с БпЛА малого и легкого классов заключаются:

1. Объектом РЭБ с БпЛА выступает электронная аппаратура двигателей БпЛА, навигационная аппаратура потребителей СРНС, информационные каналы управления БпЛА на радиолинии «НПУ – БпЛА» и передачи данных и телеметрии с борта БпЛА на радиолинии «БпЛА – НПУ». Реальная дальность РЭП каналов связи и навигации в современных средствах РЭБ составляет до 5 км во всенаправленном режиме и до 10-15 км в направленном режиме излучения.

2. Перспективным средством борьбы с радиоэлектронными средствами БпЛА следует считать комплексы ФП с построением по технологии АФАР на основе полупроводниковых генераторов видеоимпульсов. Существующая элементная база позволяет создать станцию ФП с дальностью поражения РЭС БпЛА 10-15 км.

3. С учетом наличия ограничений всех известных средств обнаружения БпЛА (оптических, радиотехнических и радиолокационных), связанных с физическими процессами их создания и условиями применения, с позиций противодействия малоразмерным БпЛА целесообразно использовать их в составе единого автоматизированного комплекса (АК) по защите объектов критически важной инфраструктуры и специальных объектов. В состав такого комплекса должны входить: оптико-электронная система, радиолокатор, система радиотехнической разведки (для обнаружения БпЛА) и средства РЭП каналов навигации и управления БпЛА (для активного противодействия БпЛА).

4. Поскольку с каждым годом повышается автономность функционирования БпЛА, растет уровень их «интеллекта» (появляется возможность применять разведывательно-ударные БпЛА без использования канала управления по заранее заложенной программе; без использования НАП СРНС с ориентацией по заранее загруженным картам местности с использованием бортовых ОЭС высокого разрешения; реализованные в бортовом компьютере технологии искусственного интеллекта на основе нейронных сетей позволяют не только получать целевую информацию, но и проводить ее анализ, обработку и принятие решений без участия оператора), то

в таком случае средства РЭБ будут малоэффективны и АК обязательно необходимо дополнить средствами физического поражения БпЛА (огневого или на основе систем ФП).

Литература

1. Макаренко С.И. Противодействие беспилотным летательным аппаратам: монография. СПб.: Научно-емкие технологии, 2020. 204 с.
2. Макаренко С.И. Информационное противоборство и радиоэлектронная борьба в сетевых войнах начала XXI века: монография. СПб.: Научно-емкие технологии, 2017. 546 с.
3. Ерёмин Г.В., Гаврилов А.Д., Назарчук И.И. Организация системы борьбы с малоразмерными БПЛА // Арсенал Отечества. 2014. № 6(14). С. 46–55.
4. Пантенков Д.Г. Актуальность и оценка технических возможностей защиты стратегически значимых объектов от массированных атак с использованием малых БПЛА // Академические Жуковские чтения: сборник научных статей по материалам VI Всероссийской научно-практической конференции «Авионика» в рамках II Всероссийского форума с международным участием. Воронеж: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2022. С. 243-247.
5. Особенности оценки характеристик обнаружения в РЛС малой дальности / А.Е. Ананенков, В.М. Нуждин, В.В. Расторгуев, В.Н.Скосырев // Радиотехника. 2013. № 11. С. 35–38.
6. Пути создания радиооптического комплекса контроля воздушного и наземного пространства для диспетчерских служб региональных аэропортов / В.Н. Скосырев, В.А. Кочкин, А.В. Шумов, А.Е. Ананенков, Г.П. Слукин, С.И. Нефедов, И.Б. Федоров // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2015. № 11. С. 301-321.
7. Плекин В.Я. Цифровые устройства селекции движущихся целей. М.: САЙНС-ПРЕСС, 2003. 79 с.
8. Лопаткин Д.В., Савченко А.Ю., Солоха Н.Г. К вопросу о борьбе с тактическими беспилотными летательными аппаратами // Военная мысль. 2014. № 2. С. 41-47.
9. Michel A.H. Counter-drone systems. Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018. 23 p.
10. Пантенков Д.Г. Результаты математического моделирования помехоустойчивости спутниковых радионавигационных систем при воздействии преднамеренных помех // Успехи современной радиоэлектроники. 2020. Т. 74. № 2. С. 57-68.
11. Пантенков Д.Г. Результаты математического моделирования помехоустойчивости спутниковых систем радиосвязи при воздействии преднамеренных помех // Радиотехника. 2020. Т. 84. №5 (10). С. 20-30.
12. Анализ способов противодействия беспилотным летательным аппаратам для обеспечения безопасности защищаемых объектов / В.О. Егурнов, В.В. Ильин, М.И. Некрасов, В.Г. Сосунов // Вопросы оборонной техники. Серия 16: Технические средства противодействия терроризму. 2018. № 1-2 (115-116). С. 51-58.
13. Макаренко С.И. Робототехнические комплексы военного назначения – современное состояние и перспективы развития // Системы управления, связи и безопасности. 2016. № 2. С. 73-132.
14. Патент на полезную модель № 72754. Устройство борьбы с дистанционно пилотируемыми (беспилотными) летательными аппаратами / В.А. Пархоменко, Е.М. Устинов, В.А. Пушкин, В.А. Беляков, С.В. Шишков. 27.04.2008.

15. К вопросу о наблюдении малоразмерных беспилотных летательных аппаратов / А.Е. Ананенков, Д.В. Марин, В.М. Нуждин, В.В. Расторгуев, П.В. Соколов // Труды МАИ. 2016. № 91. С. 19.

16. Абросимов В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. Монография. М.: Наука, 2013. 168 с.

17. Пантенков Д.Г., Григоренко Н.С. Подсистема доставки информации для обеспечения повышения точности навигационных определений подвижных абонентов // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. № 2. 2021. С. 25-49.

18. Григоренко Н.С., Пантенков Д.Г. Навигационный комплекс беспилотного летательного аппарата с использованием оптико-электронных систем // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. № 8, 2020. С. 43-50.

19. Автономный навигационный комплекс для роботизированных наземных и летательных аппаратов / В.В. Щербинин, А.В. Связов, С.В. Смирнов, Г.А. Кветкин // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2014. № 3 (152). С. 234-243.

20. Макаренко С.И. Информационная безопасность: учебное пособие для студентов вузов. Ставрополь: СФ МГТУ им. М. А. Шолохова, 2009. 372 с.

21. Семенова Л.Л. Современные методы навигации беспилотных летательных аппаратов // Наука и образование сегодня. 2018. № 4 (27). С. 6-8.

22. Куприянов А.И., Шустов Л.Н. Радиоэлектронная борьба. Основы теории. М.: Вузовская книга, 2011. 800 с.

23. Средства функционального подавления радиоэлектронных средств малоразмерных беспилотных летательных аппаратов с фокусировкой электромагнитного излучения / А.В. Гомозов, Д.В. Грецких, А.В. Демченко, Н.М. Цикаловский // Космическая техника. Ракетное вооружение. 2018. № 1 (115). С. 13-19.

24. Владимиров В.А., Лебедев А.В. Анализ состояния и тенденций развития современных видов оружия // Стратегия гражданской защиты: проблемы и исследования. 2012. № 2. С. 61-80.

25. Леньшин А.В. Бортовые системы и комплекс радиоэлектронного подавления. Воронеж: Научная книга, 2014. 590 с.

Поступила 06.06.2023; принята к публикации 04.08.2023

Информация об авторах

Пантенков Дмитрий Геннадьевич – канд. техн. наук, руководитель направления стратегических исследований – главный конструктор, АО «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий» (214012, Россия, г. Смоленск, ул. Ново-Ленинградская, д. 10), тел. 8 (926) 109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru

Литвиненко Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: litvinvp@gmail.com

Глушков Алексей Николаевич – канд. техн. наук, доцент, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, д. 54а), e-mail: a.glushkov75@yandex.ru

THE MAIN PROBLEMATIC ISSUES AND MODERN APPROACHES TO COUNTERING SMALL-SIZED RECONNAISSANCE AND STRIKE UNMANNED AERIAL VEHICLES

D.G. Pantenkov¹, V.P. Litvinenko², A.N. Glushkov³

¹Scientific research institute of modern telecommunication technologies, Smolensk, Russia

²Voronezh state technical university, Voronezh, Russia

³Russian Air Force Military Educational and Scientific Center Air Force Academy Professor
N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh, Russia

Abstract: as the analysis of the events of 2022-2023 years has shown, the use of small-sized reconnaissance and reconnaissance-strike unmanned aerial vehicles of small and light classes in armed conflicts and when damaging critical infrastructure facilities has become widespread. This is easily explained by the availability of their purchase, their very insignificant cost on the one hand and wide functionality on the other hand. Modern UAVs of small and light class are capable of being in the air from several tens of minutes to several hours, to carry out continuous monitoring of objects of interest, to conduct radio and radio-technical reconnaissance of specified areas, to survey the underlying surface, to issue target designation for the target attack to multiple rocket launchers, to adjust the accuracy of hitting projectiles of shock means, to relay information to remote to its recipients, act as shock drones or kamikaze drones. In fact, modern conflicts have moved into the stage of intellectual confrontation between operators of robotic complexes and systems, including complexes with UAVs of various classes and purposes. The article is a continuation of a whole series of works, including by other authors, devoted to countering small-sized UAVs, shows the calculated quantitative ratios of the required level of radiated energy depending on the distance to the object of impact in the case of the use of electronic warfare and functional damage to avionics, conclusions are drawn

Key words: unmanned aerial vehicle, small class, counteraction, basic methods, electronic warfare, functional defeat, radio communication, navigation, efficiency, automated complex

References

1. Makarenko S.I. «Countering unmanned aerial vehicles. Monograph» ("Protivodeystviye bespilotnym letatel'nyim apparatam:

monografiya), St. Petersburg, Naukoyemkiye tekhnologii, 2020, 204 p.

2. Makarenko S.I. "Information warfare and electronic warfare in network-centric wars of the beginning of the XXI century. Monograph" Informatsionnoye protivoborstvo i radioelektronnaya bor'ba v setetsentricheskikh voynakh nachala XXI veka: monografiya", St. Petersburg, Naukoyemkiye tekhnologii, 2017, 546 p.

3. Eremin G.V., Gavrilov A.D., Nazarchuk I.I. "Organization of the system for combating small-sized UAVs", *Arsenal of the Fatherland (Arsenal Otechestva)*, 2014, no. 6 (14), pp. 46-55.

4. Pantenkov D.G. "Relevance and assessment of the technical capabilities of protecting strategically important objects from massive attacks using small UAVs", VI All-Russian Scientific and Practical conference "Avionics" ("Avionica"): coll. of scientific papers (November 23-25, 2022), Voronezh: VUNTS VVS "VVA", 2022, pp. 243-247.

5. Ananenkov A. E., Nuzhdin V. M., Rastorguev V. V., Skosyrev V. N. "Features of evaluation of detection characteristics in short-range radar", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2013, no. 11, pp. 35-38.

6. Skosyrev V. N., Kochkin V. A., Shumov A. V., Ananenkov A. E., Slukin G. P., Nefedov S. I., Fedorov I. B. "Ways of creating a radio-optical complex for monitoring air and ground space for dispatching services of regional airports", *Science and Education. Bauman Moscow State Technical University (Nauka i obrazovaniye. MGTU im. N.E. Baumana)*, 2015, no. 11, pp. 301-321.

7. Plekin V. Ya. "Digital devices for selection of moving targets" ("Tsifrovyye ustroystva selektsii dvizhushchikhsya tseley"), Moscow, Sayns Press, 2003, 79 p.

8. Lopatkin D.V., Savchenko A.Yu., Solokha N.G. "On the issue of combating tactical unmanned aerial vehicles", *Military thought (Voyennaya mysl')*, 2014, no. 2, pp. 41-47.

9. Michel A.H. "Counter-drone systems", Center for the Study of the Drone at Bard College, 2018, 23 p.

10. Pantenkov D.G. "Results of mathematical modeling of noise immunity of satellite radio navigation systems under the influence of intentional interference", *Successes of modern radio electronics (Uspekhi sovremennoy radioelektroniki)*, 2020, vol. 74, no. 2, pp. 57-68.

11. Pantenkov D.G. "Results of mathematical modeling of noise immunity of satellite radio communication systems under the influence of intentional interference", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2020, vol. 84, no. 5 (10), pp. 20-30.

12. Egurnov V.O., Ilyin V.V., Nekrasov M.I., Sosunov V.G. "Analysis of methods of countering unmanned aerial vehicles to ensure the safety of protected objects", *Issues of defense technology (Voprosy oboronnoy tekhniki)*, ser. 16, 2018, no. 1-2 (115-116), pp. 51-58.

13. Makarenko S.I. "Robotic complexes for military purposes – current state and development prospects", *Control, communication and security systems (Sistemy upravleniya, svyazi i bezopasnosti)*, 2016, no. 2, pp. 73-132.

14. Parkhomenko V.A., Ustinov E.M., Pushkin V.A., Belyakov V.A., Shishkov S.V. "Device for combating remotely piloted (unmanned) aircraft" ("Ustroystvo bor'by s distantsionno pilotiruyemyimi (bespilotnymi) letatel'nymi apparatami"), Patent of RF no. 72754, 27.04.2008.

15. Ananenkov A.E., Marin D.V., Nuzhdin V.M., Rastorguev V.V., Sokolov P.V. "On the question of the observation of small-sized unmanned aerial vehicles", *Proc. of MAI (Trudy MAI)*, 2016, no. 91, p. 19.

16. Abrosimov V.K. "Group movement of intelligent aircraft in an antagonistic environment. Monograph" ("Gruppovoye dvizheniye intellektual'nykh letatel'nykh apparatov v antagonisticheskoy srede. Monografiya"), Moscow, Nauka, 2013, 168 p.

17. Pantenkov D.G., Grigorenko N.S. "Subsystem of information delivery to ensure an increase in the accuracy of navigation definitions of mobile subscribers", *Flight. All-Russian Scientific and Technical Journal (Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, no. 2, 2021, pp. 25-49.

18. Grigorenko N.S., Pantenkov D.G. "Navigation complex of an unmanned aerial vehicle using optoelectronic systems", *Flight. All-Russian Scientific and Technical Journal (Polet. Obshcherossiyskiy nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, no. 8, 2020, pp. 43-50.

19. Shcherbinin V.V., Sviyazov A.V., Smirnov S.V., Kvetkin G.A. "Autonomous navigation complex for robotic ground and aircraft" // *Proc. of the Southern Federal University. Technical sciences (Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskoye nauki)*, 2014, no. 3 (152), pp. 234-243.

20. Makarenko S.I. "Information security: a textbook for university students" ("Informatsionnaya bezopasnost': uchebnoye posobiye dlya studentov vuzov"), Stavropol, SF MGGU im. M.A. Sholokhova, 2009, 372 p.

21. Semenova L.L. "Modern methods of navigation of unmanned aerial vehicles", *Science and education today Nauka i obrazovaniye segodnya*, 2018, no. 4 (27), pp. 6-8.

22. Kupriyanov A.I., Shustov L.N. "Electronic warfare. Fundamentals of theory" ("Radioelektronnaya bor'ba. Osnovy teorii"), Moscow, Vuzovskaya kniga, 2011, 800 p.

23. Gomozyov A.V., Gretsikh D.V., Demchenko A.V., Tsikalovsky N.M. "Means of functional suppression of radio-electronic means of small-sized unmanned aerial vehicles with electromagnetic radiation focusing", *Space technology. Missile weapons (Kosmicheskaya tekhnika. Raketnoye vooruzheniye)*, 2018, no. 1 (115), pp. 13-19.

24. Vladimirov V.A., Lebedev A.V. "Analysis of the state and trends in the development of modern weapons", *Civil protection strategy: problems and research (Strategiya grazhdanskoy zashchity: problemy i issledovaniya)*, 2012, no. 2, pp. 61-80.

25. Lenshin A.V. "Onboard systems and electronic suppression complex" ("Bortovyye sistemy i kompleks radioelektronnogo podavleniya"), Voronezh, Nauchnaya kniga, 2014, 590 p.

Submitted 06.06.2023; revised 04.08.2023

Information about the authors

Dmitriy G. Pantenkov - Cand. Sc. (Technical), Head of Strategic Research – Chief Designer, Scientific research institute of modern telecommunication technologies (10 Novo-Leningradskaya str., Smolensk 214012, Russia), 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru

Vladimir P. Litvinenko - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com

Alexei N. Glushkov - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, The military educational and scientific center of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), e-mail: a.glushkov75@yandex.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЭМС-КОММУТАТОРОВ ДЛЯ РЕАЛИЗАЦИИ АКТИВНОЙ ПЛАНАРНОЙ АНТЕННЫ УДА-ЯГИ

Е.А. Ищенко¹, С.О. Распопов¹, А.С. Тупицына¹, И.А. Черноиваненко¹, С.М. Фёдоров^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается возможность использования микроэлектромеханических-коммутаторов (МЭМС-коммутаторов) в конструкции планарной антенны Уда-Яги для управления характеристиками диаграмм направленности. Моделирование исследуемой задачи выполнялось на основе использования SPICE-моделей эквивалентных схем МЭМС-коммутатора как в активном (включенном), так и в выключенном (разомкнутом) режиме. Полученные результаты показывают, что использование МЭМС-коммутаторов позволяет обеспечить высокую эффективность работы антенны, при этом удастся создать условия для управления характеристиками диаграмм направленности антенны, так как предполагается подключение дополнительных директоров на основе коммутации МЭМС-коммутаторов. Для повышения точности моделирования в выключенном режиме МЭМС-коммутаторы заменялись также эквивалентными схемами. Проведенное исследование подтвердило, что МЭМС-ключи имеют малое сопротивление в активном режиме и высокую изоляцию в выключенном режиме. В процессе моделирования исследовалась планарная антенна Уда-Яги, которая имела тринадцать директоров, из которых двенадцать имели в своей конструкции по два МЭМС-коммутатора для включения и выключения директоров. На основании моделирования было получено, что антенна имеет КНД от 11.8 до 14.1 дБ, при этом КПД во всем рабочем диапазоне частот более 65 %, а благодаря использованию МЭМС-ключей удастся обеспечить быстрое подключение дополнительных директоров в планарной антенне Уда-Яги, что повышает направленные свойства антенны

Ключевые слова: активная антенна, антенна Уда-Яги, МЭМС-коммутаторы, SPICE-модель

Введение

Объединение радиоэлектронных элементов и антенных систем позволяет реализовать антенны, которые обладают перестраиваемыми характеристиками. Типовым решением использования активных компонент для управления характеристиками антенн являются активные фазовращатели [1], специальные маломощные схемы, которые изменяют характеристики сигналов и/или электромагнитных волн на стадии передачи в излучатель. Однако в последнее время все большую популярность набирают антенные системы, которые используют радиокомпоненты непосредственно в конструкции излучателя. Такие антенны позволяют повысить скорость работы системы управления, обеспечить изменение типов поляризации, характеристик диаграмм направленности с минимальными потерями.

В работах [2, 3] авторы предлагают использовать активные pin-диоды, которые позволяют обеспечить управление характеристиками диаграмм направленности. Благодаря

возможности коммутации pin-диодов, а также реализации высокой изоляции в выключенном режиме, удастся обеспечить протекание сигнала практически без потерь через компонент, что позволяет обеспечить сохранение высокого КПД (коэффициента полезного действия), а также обеспечить быстрое переключение режимов работы.

Другими средствами управления характеристиками антенн являются маломощные схемы [4, 5]. Реализация таких схем позволяет расширить диапазон рабочих частот антенн, а также обеспечить управление фазами сигналов, что обеспечивает изменение характеристик диаграмм направленности антенн. Недостатками таких схем является их сложность, а также необходимость использования большого числа сложных радиокомпонентов, которые могут оказывать негативное влияние на характеристики протекающих сигналов.

В данной работе предлагается использование активных МЭМС-ключей, которые обеспечивают характеристики изоляции и коммутации значительно превосходящие pin-диоды, а также могут быть реализованы с использованием более совершенных технологий фотолитографии в экстремальном ультрафиолете (EUV),

а также с использованием технологических процессов 5 нм и меньше. В предлагаемой антенне МЭМС-ключи используются для управления характеристиками диаграмм направленности планарной антенны Уда-Яги [6], что позволит обеспечить увеличение уровня КНД антенны (коэффициента направленного действия антенны) путем выполнения коммутаций директоров антенны.

Эквивалентная схема МЭМС-ключа в активном и выключенном режиме

Для выполнения электродинамического моделирования необходимо определить модель МЭМС-ключа на основе эквивалентных схем, при этом стоит учитывать характеристики радиокомпонента в выключенном режиме, так как его сопротивление не будет бесконечным. Для моделирования могут быть использованы эквивалентные схемы, которые определяются с использованием SPICE-моделей или Touchstone-файлов. В данном случае будут использоваться SPICE-модели МЭМС-ключа из работы [7], так как благодаря использованию SPICE-моделей удастся повысить скорость расчетов, а конструкция МЭМС-ключа с размерами порядка 300 мкм позволяет обеспечить высокие характеристики как в активном, так и в выключенном режиме. На рис. 1 приводятся эквивалентные схемы используемого МЭМС-ключа, а также его SPICE-модели.

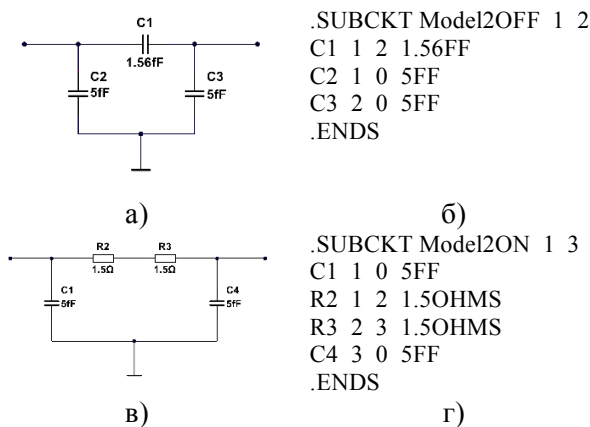


Рис. 1. Модель МЭМС-коммутатора: а) эквивалентная схема в выключенном режиме (разомкнутый режим); б) SPICE-модель в выключенном режиме; в) эквивалентная схема в активном режиме (режим коммутации); г) SPICE-модель в режиме коммутации

Как видно из модели, в выключенном режиме МЭМС-коммутатор представляет собой соединение трех емкостей очей малой емкости, что обеспечивает высокую изоляцию в широком диапазоне частот, при этом при выполнении коммутации ключа обеспечивается малое сопротивление, что обеспечивает протекание сигналов с минимальными потерями. На основании приведенной модели МЭМС-ключа производилось моделирование планарной антенны Уда-Яги для управления характеристиками диаграмм направленности.

Моделирование активной перестраиваемой антенны Уда-Яги с использованием МЭМС-коммутаторов

В процессе исследования была сформирована планарная антенна Уда-Яги, которая выполнялась на основе диэлектрика Fr-4 толщиной 1.5 мм, в базовой конструкции антенны были сформированы 13 директоров, из которых 12 активных, коммутируемых с использованием МЭМС-ключей шириной 5 мм. Вид антенны приводится на рис. 2.

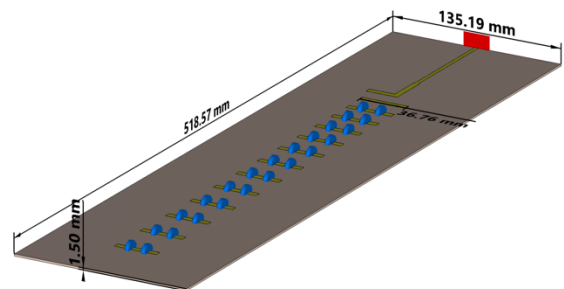


Рис. 2. Модель планарной антенны Уда-Яги с 13 директорами, из которых 12 активных

Полученная антенна в процессе моделирования коммутировалась с использованием МЭМС-коммутатора, который приводится на рис. 1, при этом, если ключ находился в разомкнутом режиме, то он заменялся соответствующей эквивалентной схемой, которая определяла сосредоточенный элемент при моделировании. На рис. 3 приводятся возвратные потери антенны (RL), а также поведение токов в директорах в случаях, когда директор был замкнут или разомкнут.

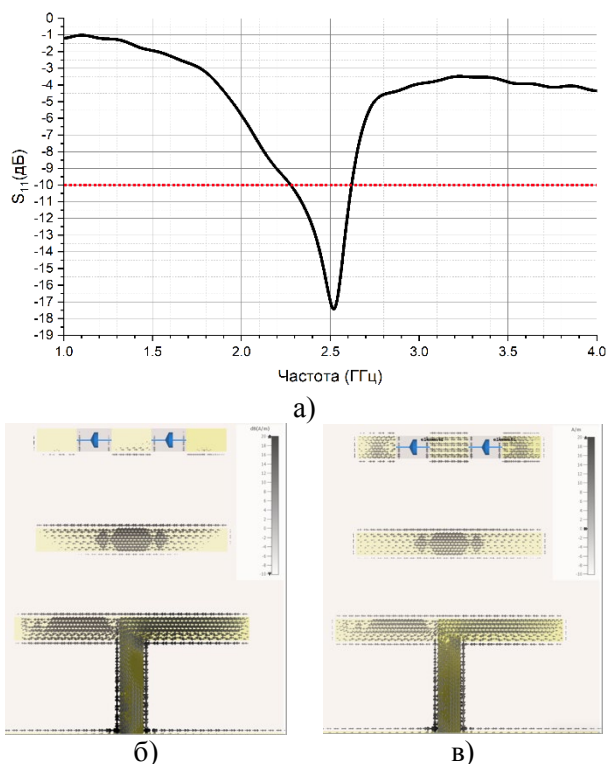


Рис. 3. Характеристики антенны: а) график возвратных потерь антенны (S_{11}); б) токи в директорах при отсутствии коммутаций; в) токи в директоре при коммутации с использованием МЭМС-ключа

Как видно по графику возвратных потерь антенна имеет диапазон рабочих частот от 2.25 до 2.62 ГГц по уровню КСВН=2 ($RL=10$ дБ). При этом отчетливо видно, что при использовании модели МЭМС-ключа в выключенном режиме в директоре практически не возникают токи, что приводит к тому, что он не используется при формировании диаграммы направленности (сопротивление МЭМС-ключа в выключенном режиме более 10 кОм), при этом при выполнении коммутации ключа происходит замыкание директора, что приводит к возбуждению токов, а также изменению характеристик диаграммы направленности (сопротивление

МЭМС-ключа во включенном режиме около 3 Ом). На основании полученной конструкции были получены диаграммы направленности антенны при поочередной коммутации всех директоров – рис. 4, а также основные характеристики диаграмм направленности приводятся в табл. 1.

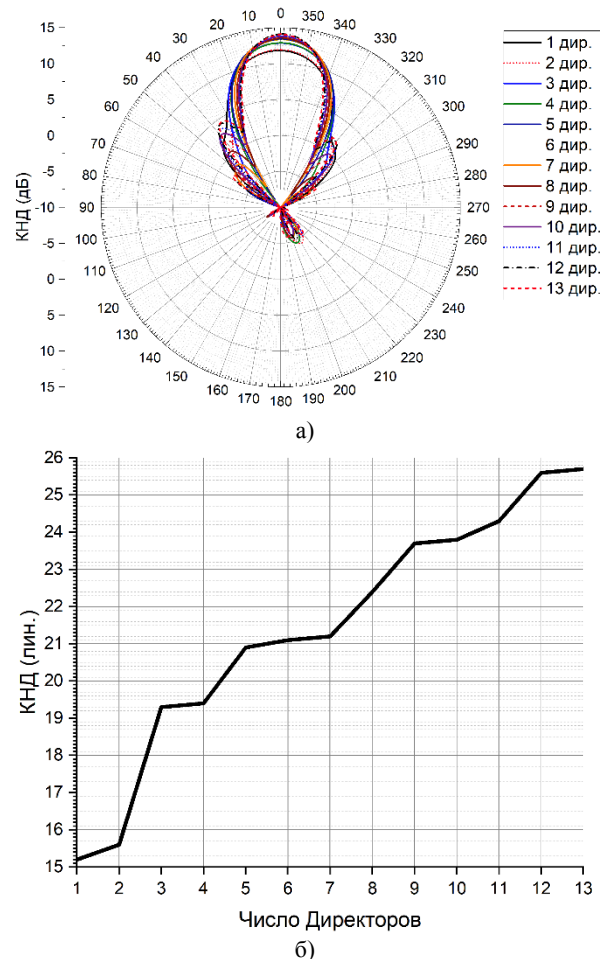


Рис. 4. Диаграммы направленности антенны при коммутации директоров: а) диаграммы направленности антенны при всех случаях коммутации директоров; б) зависимость КНД (линейный масштаб) от числа коммутированных директоров

Таблица 1

Характеристики антенны Уда-Яги с коммутируемыми директорами при использовании 1 и всех директоров

Характеристика антенны	Значение
КНД, дБ*	11.8 14.1
КНД, лин	15.2 25.7
Ширина лепестка, °	39.9 26.7
УБЛ, дБ	-21.9 -9.5
КПД, %	> 65 во всех случаях
*Значения указываются для случаев, когда замкнут и используется 1 директор, а также когда используются все 13 директоров; значения разделяются через « »	

Как видно по полученным результатам, при коммутации директоров происходит увеличение уровня КНД с сужением главного лепестка. Такое поведение характерно для всех антенн Уда-Яги и связано с увеличением числа директоров в антенне. Также отчетливо видно, что постепенно скорость увеличения уровня КНД уменьшается при увеличении числа директоров. Особенностью предлагаемой конструкции является то, что благодаря использованию МЭМС-ключей удается обеспечить управление уровнем КНД антенны путем подключения или отключения дополнительных директоров.

Заключение

Полученные в процессе исследования результаты показывают, что совмещение антенн и активных радиокомпонентов позволяет обеспечить управление характеристиками антенны с высокой эффективностью. Использование современных МЭМС-ключей в конструкциях антенных систем и СВЧ-устройств обеспечивает высокую эффективность работы устройства как в режиме коммутации, так как обеспечивается минимальное сопротивление, так и в выключенном режиме, так как обеспечивается высокая изоляция выхода от входа. Проведенное в данной работе исследование показывает, что совмещение конструкции планарной антенны Уда-Яги и коммутируемых на основе МЭМС-

ключей директоров обеспечивает управление характеристиками диаграммы направленности благодаря формированию дополнительных директоров в антенне.

Литература

1. Wu Z. -f., Liu J. -b. A new design of MEMS coplanar waveguide phase shifter // 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. 2018. 2 p.
2. Mingle S., Hassoun I., Kamali W. Beam-Steering in Metamaterials Enhancing Gain of Patch Array Antenna Using Phase Shifters for 5G Application // IEEE EUROCON 2019 -18th International Conference on Smart Technologies. 2019. 4 p.
3. Design of a PIN Diode-Based Reconfigurable Metasurface Antenna for Beam Switching Applications / S. Chaimool, T. Hongnara, C. Rakluea, P. Akkaraekthalin, Ya. Zhao // International Journal of Antennas and Propagation. Vol. 2019. Article ID 7216324. 2019. 7 p.
4. Cho K., Hong S. Design of a VHF/UHF/L-Band Low-Power Active Antenna for Mobile Handsets // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. Vol. 11. 2012. Pp. 45-48.
5. Frequency reconfigurable active antenna / S. Agarwal, A. Basu, M.P. Abegaonkar, S.K. Koul // 2014 International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings. 2014. pp. 87-88.
6. Vizbicke P.P. Yagi Antenna Design. NBS Technical Note 688 // U.S. Department of Commerce. 1976. 30 p.
7. Enhanced Robustness of a Bridge-Type Rf-Mems Switch for Enabling Applications in 5G and 6G Communications / J. Casals-Terré, L. Pradell, J.C. Heredia, F. Giacomozzi, J. Iannacci, A. Contreras, M. Ribó // Sensors. No. 22. 2022. 20 p.

Поступила 31.05.2023; принята к публикации 03.08.2023

Информация об авторах

Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473) 243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Распопов Станислав Олегович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473) 243-77-29, e-mail: s.o.raspopov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3052-5371>

Тупицына Анна Сергеевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473) 243-77-29, e-mail: anna.typitsyna.00@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6386-9769>

Черноиваненко Игорь Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473) 243-77-29, e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

USING MEMS SWITCHES FOR REALIZATION OF ACTIVE PLANAR ANTENNA UDA-YAGI

E.A. Ishchenko¹, S.O. Raspopov¹, A.S. Tupitsina¹, I.A. Chernovivanenko¹, S.M. Fedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers the possibility of using MEMS switches in the design of a planar Uda-Yagi antenna to control the characteristics of the radiation patterns. The simulation of the problem under study was performed based on the use of SPICE models of equivalent circuits of a MEMS switch in both active and off modes. The results obtained show that the use of MEMS switches makes it possible to ensure high efficiency of the antenna, while it is possible to provide control over the characteristics of the antenna patterns, since additional directors are connected based on switching MEMS keys. To improve the simulation accuracy in the off mode, MEMS switches were also replaced with equivalent circuits. The study has confirmed that MEMS switches have low resistance in the active mode and high isolation in the off mode. During the simulation, the Uda-Yagi planar antenna was studied, which had thirteen directors, of which twelve had two MEMS switches in their design to turn the directors on and off. Based on the simulation, it was obtained that the antenna has an efficiency factor from 11.8 to 14.1 dB, while the efficiency over the entire operating frequency range is more than 65%, and thanks to the use of MEMS switches, it is possible to provide a quick connection of additional directors in the Uda-Yagi planar antenna, which increases the directional antenna properties

Key words: active antenna, Uda-Yagi antenna, MEMS switches, SPICE model

References

1. Wu Z. -f., Liu J. -b. "A new design of MEMS coplanar waveguide phase shifter", 2018 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. 2018. 2 p.
2. Mingle S., Hassoun I., Kamali W. "Beam-Steering in Metamaterials Enhancing Gain of Patch Array Antenna Using Phase Shifters for 5G Application", *IEEE EUROCON*, 2019 -18th International Conference on Smart Technologies, 2019, 4 p.
3. Chaimool S., Hongnara T., Raklua C., Akkaraekthalin P., Zhao Ya. "Design of a PIN Diode-Based Reconfigurable Metasurface Antenna for Beam Switching Applications", *International Journal of Antennas and Propagation*, vol. 2019, Article ID 7216324, 2019, 7 p.
4. Cho K., Hong S. "Design of a VHF/UHF/L-Band Low-Power Active Antenna for Mobile Handsets", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, 2012, pp. 45-48.
5. Agarwal S., Basu A., Abegaonkar M.P., Koul S.K. "Frequency reconfigurable active antenna", 2014 International Symposium on Antennas and Propagation Conference Proceedings, 2014, pp. 87-88.
6. Vizbickie P.P. "Yagi Antenna Design. NBS Technical Note 688", U.S. Department of Commerce, 1976, 30 p.
7. Casals-Terré J., Pradell L., Heredia J. C., Giacomozzi F., Iannacci J., Contreras A., Ribó M. "Enhanced Robustness of a Bridge-Type RF-Mems Switch for Enabling Applications in 5G and 6G Communications", *Sensors*, no. 22, 2022, 20 p.

Submitted 31.05.2023; revised 03.08.2023

Information about authors

Evgeny A. Ishchenko - Post-graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Stanislav O. Raspopov - Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: s.o.raspopov@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-3052-5371>

Anna S. Tupitsina - Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: anna.tupitsyna.00@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-6386-9769>

Igor A. Chernovivanenko - Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: chernovivanenko2000@mail.ru

Sergei M. Fedorov - Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

ВЛИЯНИЕ ШУМА НА ПОГРЕШНОСТЬ ИЗМЕРЕНИЯ ЧАСТОТЫ ПО ДИСКРЕТНЫМ ОТСЧЕТАМ ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА МЕТОДОМ МОМЕНТОВ

М.А. Альрубеи, А.Д. Поздняков

Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых,
г. Владимир, Россия

Аннотация: известны алгоритмы измерения отклонения частоты гармонических сигналов, основанные на использовании массива дискретных отсчетов, быстрого преобразования Фурье (БПФ) и интерполяции. Метод моментов позволяет получить средневзвешенную оценку положения на оси частот пика энергетического спектра, принимаемого за результат измерения. Рассмотрены возможности применения метода моментов, ограниченные методической погрешностью, которая обусловлена влиянием шага частотной сетки БПФ, видом используемой оконной функции, числом учитываемых спектральных линий, длительностью интервала дискретизации сигнала. В основе экспериментального исследования применен метод полунатурного моделирования в среде Матлаб 2016 с компьютерным формированием выбранного числа отсчетов испытательного гармонического или полигармонического сигнала при реальной обработке полученных данных при наличии и отсутствии шума. Приведены результаты исследования влияния числа отсчетов, числа учитываемых спектральных линий, отношения сигнал/шум для окон Наттолла, Чебышева, Блэкмана, Кайзера, Ханна, Треугольное, Плоская вершина, Парзена, Блэкмана-Харриса. Даны рекомендации с целью оптимизации параметров контроля частоты. Сравнение погрешностей для разных оконных функций при отношении сигнал/шум 60 дБ показывает, что при 16 отсчетах и учете трех спектральных линий лучшим является Треугольное окно с погрешностью около $1\text{E-}03$, худшим – окно Наттолла с погрешностью $1\text{E-}02$. При 2048 отсчетах и учете семи спектральных линий лучшим является окно Наттолла с погрешностью $1\text{E-}09$, худшим – Треугольное окно с погрешностью $1\text{E-}06$. Анализ данных моделирования показал, что при использовании метода моментов вначале необходимо оценить, какой максимальный объем отсчетов можно получить и какое число спектральных линий использовать в расчетах, и только после этого выбирать подходящее окно. Корректный выбор вида оконной функции позволяет уменьшить погрешность на порядок

Ключевые слова: метод моментов, частота, гармонический сигнал, отсчет, погрешность, временное окно

Введение

Измерение, контроль и мониторинг частоты периодического сигнала реализуется в различных системах передачи информации с помощью электромагнитных колебаний, таких как радиосвязь, радионавигация, радиолокация, радиообнаружение, радиотелеметрия, а также в других сферах жизнедеятельности человека: в медицине, в научных исследованиях, в промышленности. Широкий спектр разнообразных применений [1-11] определил большое разнообразие требований и средств измерения частоты электромагнитных колебаний во временной и в частотной области представления сигнала. Известны вычислительные алгоритмы измерения частоты гармонического сигнала путем дискретизации и решении системы уравнений, применения интерполяционных алгоритмов, спектрального анализа и дискретного счета.

В данной работе рассматриваются возможности метода моментов, в котором частота периодического сигнала оценивается [12-15] по положению компонент спектра, полученного в

результате применения преобразования Фурье к ограниченному числу дискретных отсчетов. Метод моментов позволяет получить средневзвешенную оценку положения пика энергетического спектра с учетом его растекания, находится абсцисса «центра тяжести», которая для дискретной функции может быть представлена в виде формулы [4]:

$$x_{cp} = \frac{\sum_{i \in I} x_i f_i^p(x_i)}{\sum_{i \in I} f_i^p(x_i)},$$

где x_i – дискретное значение аргумента, центр которого определяется;

$f_i(x_i)$ – значение дискретной функции;

p – порядок, определяющий физический смысл «центра тяжести» ($p=1$ – по площади; $p=2$ – по энергии);

i – значение номера учитываемой спектральной составляющей, расположенной в зоне растекания.

Метод моментов

В методе моментов считается, что искомое значение частоты сигнала совпадает с максимумом огибающей спектральной функции. Методическая составляющая погрешности зависит от степени близости истинного значения частоты и положения энергетического центра оконной функции. При этом основными факторами влияния становятся вид используемой оконной функции, число отсчетов и число учитываемых в расчетах спектральных линий сигнала. Решить аналитически, какая оконная функция наилучшим образом соответствует искомой частоте сигнала очень сложно, поэтому был выбран метод полунатурного моделирования с имитацией массива дискретных отсчетов сигнала с шумами и реальной обработкой с оценкой частоты и погрешности [16-19].

Когда в окно выборки отсчетов попадает нецелое число периодов сигнала, на границах окна образуются разрывы, приводящие к появлению дополнительных спектральных компонент в частотной области. Для уменьшения влияния спектральной утечки применяется предварительное сглаживание временной последовательности, что достигается умножением всех отсчетов сигнала на весовые коэффициенты специальной оконной функции. Известно, что наличие разнообразных окон, отличающихся по степени сглаживания, разрешающей способности и т.д., затрудняет выбор окна для конкретной цели, заключающейся в минимизации отклонения положения на оси частот энергетического максимума спектра сигнала от истинного значения частоты этого сигнала [20-22].

Во встроенных системах контроля применяются методы спектрального анализа с использованием быстрого преобразования Фурье (БПФ). Определяется максимальная спектральная составляющая с последующим уточнением положения максимума путем математических преобразований, интерполяции и внесением поправок.

Алгоритм оценки частоты

В [13] приведен алгоритм оценки частоты, когда спектральные линии исследуемого сигнала по уровню выделяются на фоне шума. При вычислении частоты сигнала учитываются только основные спектральные компоненты, расположенные вблизи от максимума:

$$f_c \approx \frac{\sum_{i=m-d}^{m+d} |S_i[i \cdot f_d/N]|^2 \cdot i \cdot f_d/N}{\sum_{i=m-d}^{m+d} |S_i[i \cdot f_d/N]|^2},$$

где m – номер спектральной компоненты максимального уровня;

S_i амплитуды спектральных компонент;

d – число дополнительных линий спектра близких к m сверху и снизу.

Применительно к задаче оценки частоты сигнала, спектр которого занимает несколько линеек сетки быстрого преобразования Фурье (БПФ), «центр тяжести» находится в ограниченной зоне растекания $m \pm d$, которая определяется выбранным окном, шумами и требуемой точностью. Программа моделирования измерения частоты гармонического сигнала с оценкой погрешности в условиях воздействия аддитивного шума создана в среде МАТЛАБ 2016. Алгоритм работы включает следующие шаги:

1. Для заданного диапазона рабочих частот сигнала выбирается частота дискретизации f_d , временное окно, объем N дискретных отсчетов сигнала, число учитываемых компонент спектра.

2. Выбирается распределение шума и формируется массив цифровых отсчетов с заданным отношением сигнал-шум.

3. На полученный массив накладывается временное окно.

4. Вычисляется комплексный спектр $S[i f_d/N]$.

5. В комплексном спектре определяется номер компоненты m , амплитуда которой максимальна.

6. Оценивается уровень компонент $m \pm d$, ближайших к максимальной составляющей, выбирается алгоритм взвешивания, оценивается положение центра спектра и частота сигнала.

7. Вычисляется методическая погрешность, составляется таблица и строится график.

Результаты моделирования

Результаты компьютерного моделирования представлены в виде графиков и таблиц. На рис. 1 приведены графики погрешностей для 6 видов окон при наличии шума с изменением отношения сигнал/шум от нуля до 70 дБ с шагом 10 дБ. Графики, построенные по 16 отсчетам и трем спектральным линиям, показывают, что вид оконной функции и уровень шума существенно влияют на точность определения частоты. Лучшим является

окно Треугольное, худшим – окно Наттолла. Увеличение числа учитываемых спектральных линий и количества отсчетов уменьшает методическую погрешность определения частоты для всех окон, однако степень уменьшения разная, поэтому худшее окно – может стать лучшим, а лучшее – худшим, как в приведенном ниже примере.

На рис. 2 приведены графики погрешностей для 5 видов окон при отсутствии и нали-

чий шума с изменением отношения сигнал/шум от нуля до 60 дБ с шагом 10 дБ. Графики, построенные по 2048 отсчетам и семи спектральным линиям, показывают, что лучшим является окно Наттолла, худшим – Треугольное окно. Таким образом, при увеличении выборки с 16 до 2048 отсчетов худшее окно стало лучшим, а лучшее – худшим.

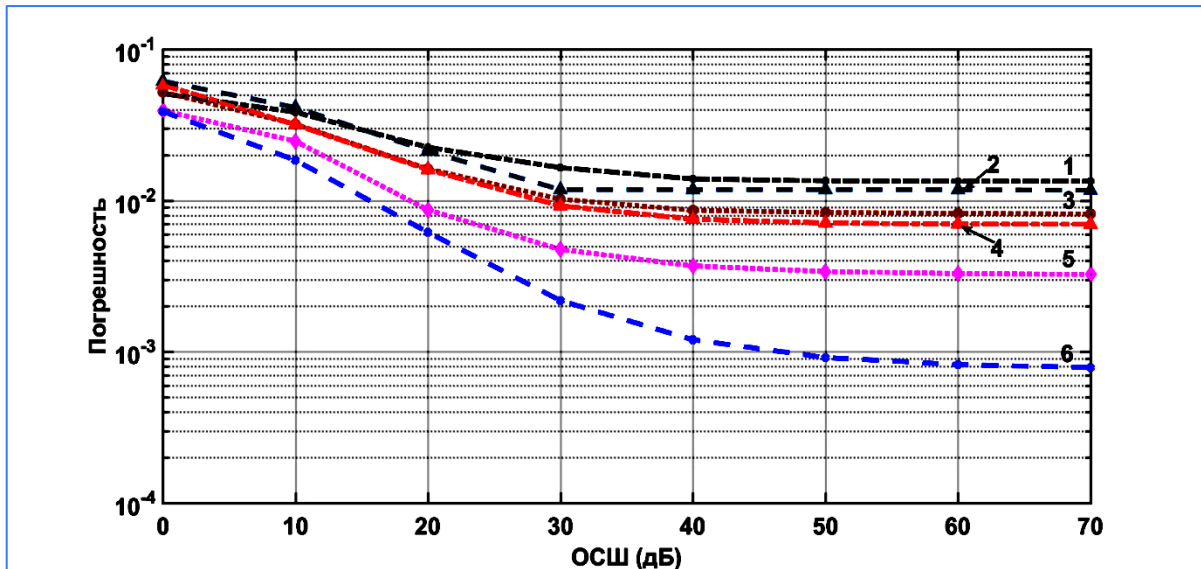


Рис. 1. Графики погрешности для 16 отсчетов и 6 видов оконной функции: 1 – Наттолла; 2 – Чебышева; 3 – Блэкмана; 4 – Кайзера (B=8); 5 – Ханна; 6 – Треугольное

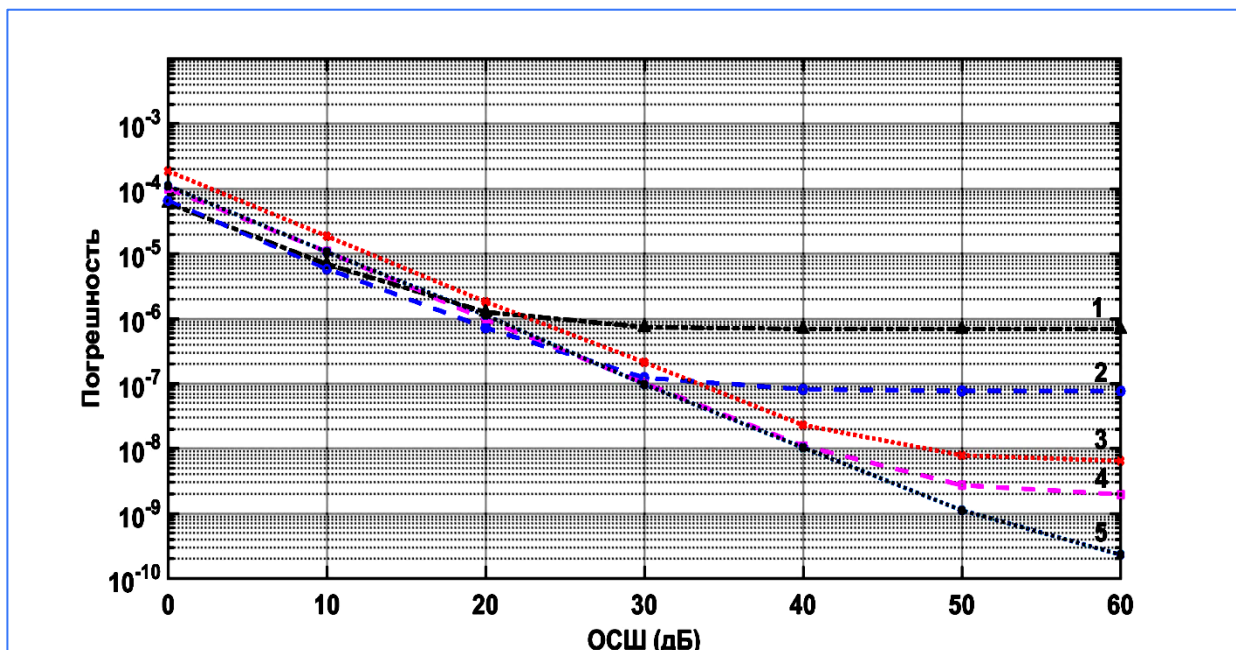


Рис. 2. Графики погрешности для 2048 отсчетов и 5 видов оконной функции: 1 – Треугольное; 2 – Ханна; 3 – Плоская вершина; 4 – Парзена; 5 – Наттолла

Таблица 1

Максимальная погрешность для 3-х компонент спектра

Окно	N	Максимальная погрешность для трех компонент при отношении сигнал-шум (дБ)							Без шума
		0	10	20	30	40	50	60	
Треугольное	8	5.0E-1	3.5E-1	2.2E-1	8.9E-2	7.2E-2	6.7E-2	6.5E-2	6.5E-2
	16	1.8E-1	1.2E-1	3.9E-2	1.7E-2	9.7E-3	7.0E-3	6.3E-3	6.0E-3
	32	3.9E-2	1.9E-2	6.2E-3	2.2E-3	1.2E-3	9.2E-4	8.2E-4	7.7E-4
Ханна	8	3.7E-1	2.9E-1	2.7E-1	2.2E-1	2.0E-1	1.9E-1	1.9E-1	1.9E-1
	16	1.8E-1	1.6E-1	6.0E-2	3.0E-2	2.1E-2	1.8E-2	1.8E-2	1.8E-2
	32	3.9E-2	2.5E-2	8.7E-3	4.7E-3	3.7E-3	3.4E-3	3.3E-3	3.2E-3
Чебышева	8	4.2E-1	3.0E-1	2.5E-1	2.0E-1	1.8E-1	1.7E-1	1.7E-1	1.7E-1
	16	1.3E-1	1.2E-1	7.4E-2	6.3E-2	5.7E-2	5.6E-2	5.5E-2	5.5E-2
	32	6.2E-2	4.1E-2	2.1E-2	1.2E-2	1.2E-2	1.2E-2	1.2E-2	1.2E-2

Таблица 2

Максимальная погрешность для 5 компонент спектра

Окно	N	Максимальная погрешность для пяти компонент при отношении сигнал-шум (дБ)							Без шума
		0	10	20	30	40	50	60	
Треугольное	16	2.3E-1	1.6E-1	4.5E-2	1.6E-2	9.5E-3	7.2E-3	6.3E-3	6.0E-3
	32	5.1E-2	4.0E-2	1.0E-2	3.7E-3	1.2E-3	5.6E-4	3.6E-4	3.2E-4
	64	1.5E-2	1.1E-2	3.2E-3	1.2E-3	4.6E-4	2.4E-4	1.7E-4	1.5E-4
Ханна	16	2.7E-1	2.0E-1	4.4E-2	1.5E-2	5.5E-3	1.7E-3	8.9E-4	5.4E-4
	32	6.4E-2	5.2E-2	1.4E-2	3.8E-3	1.3E-3	5.6E-4	2.7E-4	1.7E-4
	64	1.8E-2	1.4E-2	3.8E-3	1.1E-3	4.7E-4	1.1E-4	9.7E-5	7.1E-5
Чебышева	16	2.4E-1	2.1E-1	8.3E-2	2.6E-2	1.5E-2	1.4E-2	1.0E-2	9.9E-3
	32	6.3E-2	5.4E-2	1.9E-2	6.6E-3	2.1E-3	1.0E-3	7.5E-4	6.4E-4
	64	2.4E-2	1.6E-2	6.3E-3	1.8E-3	7.4E-4	4.2E-4	3.4E-4	3.0E-4

В табл. 1 приведены в формате чисел с плавающей точкой максимальные погрешности при изменении отношения сигнал/шум от нуля до 60 дБ с шагом 10 дБ. Если для каждого окна сравнить результаты измерения частоты без шума и при отношении С/Ш равным 30 дБ и выше до 60, можно сделать вывод, что они одного уровня. Заметное влияние шума начинается с отношения 40 дБ и меньше. При числе отсчетов 8 погрешность ниже 7 % обеспечивает только треугольное окно.

В табл. 2 приведены значения погрешности для тех же окон, изменилось только число учитываемых спектральных линий – вместо 3-х учтено

5 компонент. Только при 16 отсчетах методическая погрешность может быть менее 1%. Увеличение отсчетов до 32 и 5 линеек спектра уменьшает погрешность почти на порядок. Еще меньшая погрешность достигается при 64 отсчетах.

В табл. 3 приведены значения методической погрешности в широком диапазоне выборок от 32 до 8192 при отсутствии шума, а также при отношении сигнал/шум равном 60 дБ. При максимальных объемах выборки погрешность для всех окон уменьшилась более, чем в 1000 раз. Для окна Чебышева она снизилась до 1.0E-9, что позволяет создавать виртуальные частотомеры.

Таблица 3

N	Максимальная погрешность для окон					
	Треугольное		Ханна		Чебышева	
	Без шума	С/Ш 60 дБ	Без шума	С/Ш 60 дБ	Без шума	С/Ш 60 дБ
32	1.1E-4	2.0E-4	3.0E-5	1.4E-4	2.1E-6	1.8E-4
64	4.4E-5	7.1E-5	1.1E-5	4.2E-5	6.9E-7	6.7E-5
128	2.2E-5	3.2E-5	5.1E-6	1.5E-5	2.3E-7	2.4E-5
256	1.1E-5	1.4E-5	2.4E-6	6.2E-6	8.3E-8	7.4E-6
512	5.2E-6	6.2E-6	1.2E-6	2.5E-6	3.1E-8	2.6E-6
1024	2.6E-6	3.0E-6	5.8E-7	9.9E-7	1.3E-8	9.0E-7
2048	1.3E-6	1.4E-6	2.8E-7	4.3E-7	5.4E-9	3.2E-7
4096	6.4E-7	6.9E-7	1.4E-7	2.0E-7	2.4E-9	1.2E-7
8192	3.2E-7	3.4E-7	7.1E-8	9.1E-8	1.0E-9	4.0E-8

На рис. 3, рис. 4 и рис. 5 приведены графики максимальной погрешности для 3-х окон при работе с 7 компонентами спектра и разными объемами отсчетов: 16, 256 и 8192. При 16 отсчетах наилучшим стало окно Ханна, создающее погрешности ниже 0,001 % в диапазоне отношения сигнал/шум от 30 дБ. При 256 отсчетах

окно Ханна снижает погрешность до 0,0001 %, дальнейшего снижения при увеличении отсчетов до 8192 не наблюдается. Однако окна Блэкмана и Блэкмана-Харриса при увеличении числа отсчетов продолжают снижать погрешность ниже уровня 0,00001 % или в относительных единицах 1E-7.

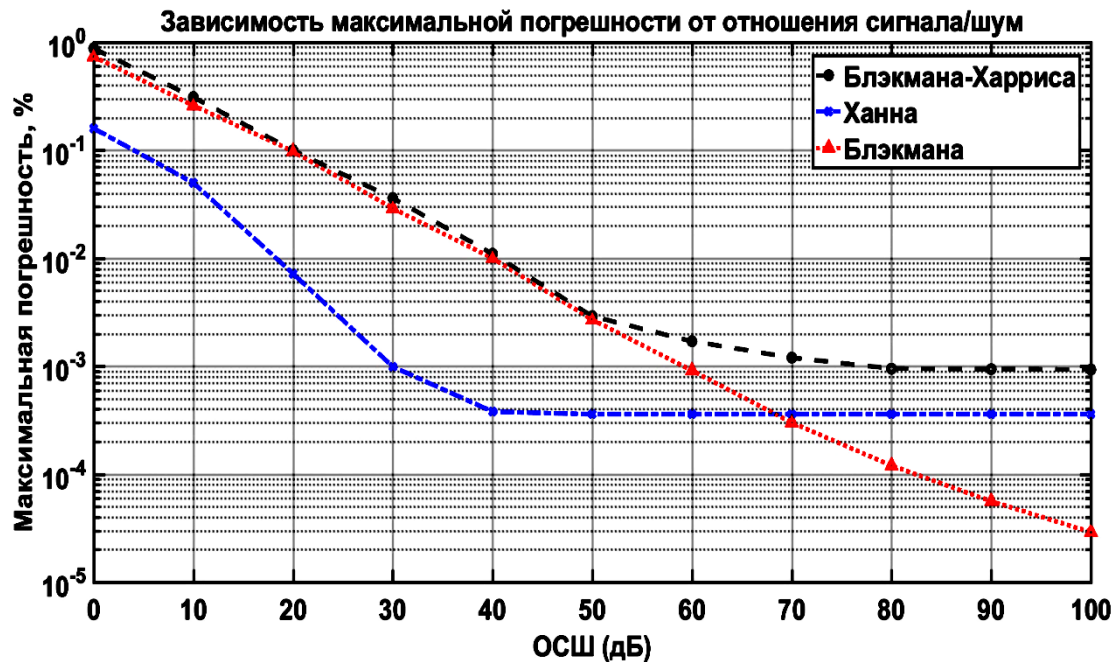


Рис. 3. Графики погрешности для 16 отсчетов и 7 компонент спектра

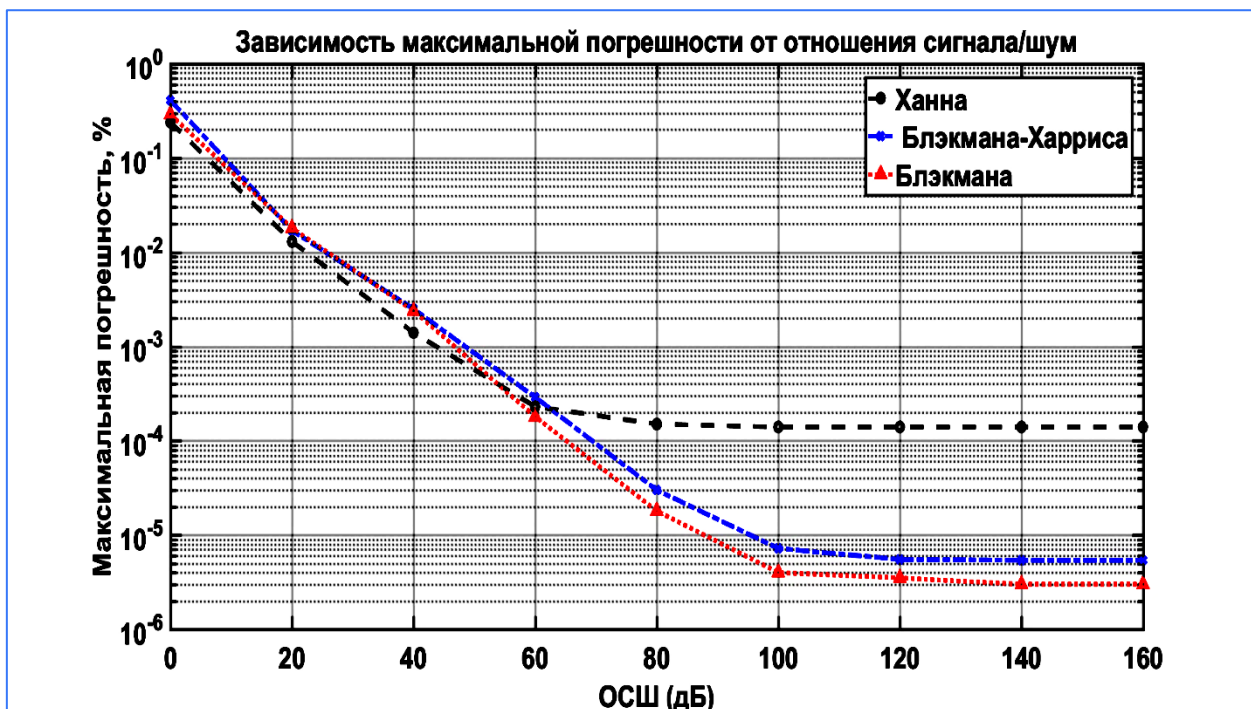


Рис. 4. Графики погрешности для 256 отсчетов и 7 компонент спектра

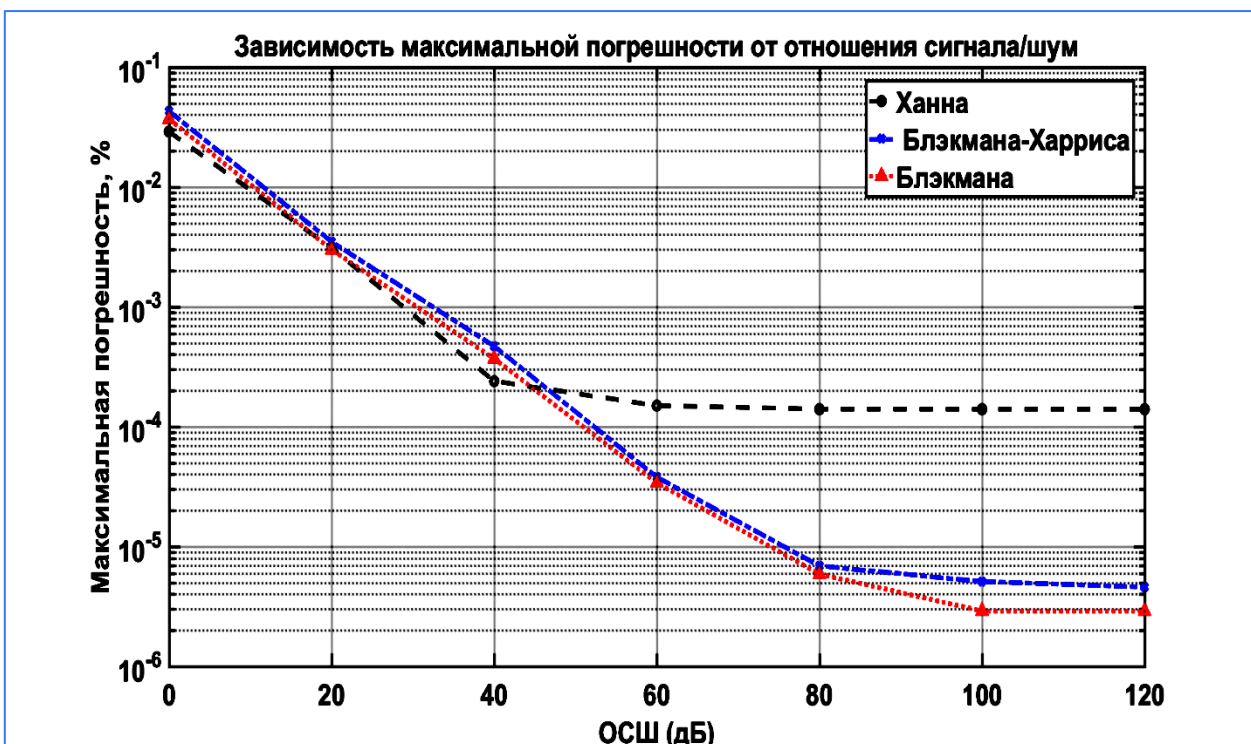


Рис. 5. Графики погрешности для 8192 отсчетов и 7 компонент спектра

Заключение

Частоту периодического сигнала можно оценить методом моментов, позволяющего получить средневзвешенную оценку положения пика энергетического спектра с учетом его рас-

текания. Погрешность определяется шагом частотной сетки, уровнем шума, видом используемой оконной функции, числом учитываемых спектральных линий, длительностью интервала дискретизации сигнала.

Сравнение погрешностей для разных оконных функций (Наттолла, Чебышева, Блэкмана, Кайзера, Ханна, Треугольное, Плоская вершина, Парзена, Блэкмана-Харриса) при отношении сигнал / шум 60 дБ показывает:

- при 16 отсчетах и учете трех спектральных линий лучшим является Треугольное окно с погрешностью около $1\text{E-}03$, худшим – окно Наттолла с погрешностью $1\text{E-}02$;

- при 2048 отсчетах и учете семи спектральных линий лучшим является окно Наттолла с погрешностью $1\text{E-}09$, худшим – Треугольное окно с погрешностью $1\text{E-}06$.

Увеличение числа учитываемых спектральных линий и количества отсчетов уменьшает методическую погрешность определения частоты для всех окон, однако степень уменьшения разная и худшее окно – может стать лучшим, а лучшее – худшим.

Приведенные данные показывают, что при использовании метода моментов необходимо, прежде всего, оценить, с каким максимальным объемом отсчетов можно работать и какое число спектральных линий использовать в расчетах и только после этого выбирать подходящее окно. Корректный выбор вида оконной функции позволяет уменьшить погрешность более чем в 10 раз.

Литература

1. Терешкин Д.О., Семибаламут В.М. Современные методы измерения частоты и фазы в реальном времени // Автоматика и программная инженерия. 2018. № 2 (24). С. 117-130.
2. Вайс С.Н., Репина М.В. Использование методов+ интерполяции при разработке тестовых радиолокационных сигналов // Труды МАИ. 2014. № 74.
3. Использование технологии виртуальных приборов для определения частотных характеристик элементов и устройств систем управления / С.Ю. Байдаров [и др.] // Известия высших учебных заведений. Поволжский регион. Технические науки. 2012. № 1. С. 105-115.
4. Розенберг В.Я. Введение в теорию точности измерительных систем. М.: Советское радио, 1975. 304 с.
5. Harris Fredrick J. Using Windows for Discrete Fourier Transform Harmonic Analysis // IEEE, 1978. Vol. 66. No. 1.
6. Серов А.Н., Шатохин А.А. Применение преобразователей частоты дискретизации для измерения спектра сигнала с помощью быстрого преобразования Фурье // Вопросы применения цифровой обработки сигналов. 2018. Т. 8. № 4. С. 79-84.
7. Eric Jacobsen, Peter Kootsookos. Fast, Accurate Frequency Estimators // IEEE Signal Processing Magazine, 2007. Vol. 24. Is. 3. Pp. 123-125.

8. Гнездилов Д.С., Матвеев Б.В. Сравнительный анализ цифровых интерполяционных алгоритмов оценки частоты радиосигнала // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 2. С. 37-39.
9. Каюков И.В., Манелис В.Б. Сравнительный анализ различных методов оценки частоты сигнала // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2006. № 7. С. 42-55.
10. Bernard Bischl, Uwe Ligges, Klaus Weichs. Frequency Estimation by DFT Interpolation: A Comparison of Methods // Journal of Signal Processing, May 2009.
11. Gasior M., Gonzalez J. L. Improving the resolution of FFT frequency measurements with parabolic and Gaussian interpolation, November 2004.
12. Цифровой алгоритм высокоточной оценки частоты гармонического сигнала на фоне аддитивного гауссовского шума / Гнездилов Д.С. [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 3-1. С. 124-126.
13. Chang-Gui Xie. Frequency Estimation of Weighted Signals Based On DFT Interpolation Algorithm // 3rd International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks (WCSN 2016).
14. Xiao Yangcan, Ping Wei. Novel frequency estimation by interpolation using Fourier coefficients // 8th international Conference on Signal Processing, 2006. Vol. 1.
15. Алгоритмы цифровой интерполяции для оценки частоты гармонического сигнала. Сравнительный анализ / С.А. Антипов, Д.С. Гнездилов, В.А. Козьмин, В.М. Стопкин // Радиотехника. 2014. № 3. С. 42-46.
16. Peter R. Effective measurements using digital signal analysis // IEEE Spectrum, 1971. Vol. 8. Is. 4. Pp. 62-70.
17. Minda, A.A., Barbinita C.-I., Gillich G. R. A Review of Interpolation Methods Used for Frequency Estimation // Romanian Journal of Acoustics and Vibration 17.1 (2020). Pp. 21-26.
18. Поздняков А.Д., Поздняков В.А. Многоуровневая интерполяция в компьютерных измерителях частоты биомедицинских сигналов // Биомедицинские технологии и радиоэлектроника. 2004. № 3. С. 41-45.
19. Альруbei М.А., Поздняков А.Д., Сравнительный анализ влияния оконной функции на оценку частоты дискретизированного гармонического сигнала, международная научно-практическая конференция «Fundamental and applied approaches to solving scientific problems»: сборник статей. Уфа: НИЦ Вестник науки, 2023. С. 47.
20. Поздняков А.Д., Поздняков В.А. Автоматизация экспериментальных исследований, испытаний и мониторинга радиосистем. М.: Радиотехника, 2004. 207 с.
21. Поздняков А.Д., Альруbei М.А. Определение частоты дискретизированного гармонического сигнала по положению энергетического пика спектра // Проектирование и технология электронных средств. 2022. № 2. С. 30–34.
22. Монаков А.А. Алгоритм обнаружения треков на основе вычисления корреляции следов в аккумуляторе Хафа // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2023. Т. 26. № 2. С. 65–77.
23. Альруbei М.А., Поздняков А.Д. Оценка частоты при симметричной и несимметричной структуре спектральных компонент дискретизированного гармонического сигнала // Труды МАИ. 2023. № 129.

Поступила 30.05.2023; принята к публикации 04.08.2023

Информация об авторах

Альруbei Мохаммед Абдалаббас – аспирант кафедры радиотехники и радиосистем, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87), тел.: +7 (960) 723-17-28, e-mail: inj.moh3@atu.edu.iq, ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0003-4434-0800>

Поздняков Александр Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор кафедры радиотехники и радиосистем, Владимирский государственный университет им. А.Г. и Н.Г. Столетовых (600000, Россия, г. Владимир, ул. Горького, 87), тел.: +7 (920) 628-53-81, e-mail: 11alexpoz@mail.ru

INFLUENCE OF NOISE ON THE FREQUENCY MEASUREMENT ERRORS FROM DISCRETE SAMPLES OF A HARMONIC SIGNAL BY THE METHOD OF MOMENTS

M.A. Alrubei, A.D. Pozdnyakov

Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs, Vladimir, Russia

Abstract: algorithms for measuring the deviation of the frequency of harmonic signals based on the use of an array of discrete samples, fast Fourier transform (FFT) and interpolation are known. The method of moments makes it possible to obtain a weighted average estimate of the position on the frequency axis of the energy spectrum peak taken as the measurement result. In this work, the determination of the limits of applicability of the method of moments is considered by estimating the methodological error due to the influence of the FFT frequency grid step, the type of window function used, the number of spectral lines taken into account, and the duration of the signal sampling interval. The experimental study is based on the method of semi-natural simulation in the Matlab 2016 environment with computer generation of a selected number of samples of a test harmonic or polyharmonic signal during real processing of the obtained data in the presence and absence of noise. The results of studying the influence of the number of samples, the number of spectral lines taken into account, the signal-to-noise ratio for the Nuttall, Chebyshev, and other windows are presented. Recommendations to optimize frequency control parameters are given. The influence of the number of samples, the number of spectral lines taken into account, the signal-to-noise ratio for the Nuttall, Chebyshev, Blackman, Kaiser, Hanna, Triangular, Planar vertex, Parsen, Blackman-Harris windows are presented. Recommendations in order to optimize the parameters of frequency control are given. A comparison of errors for different window functions with a signal-to-noise ratio of 60 dB shows that with 16 counts and taking into account three spectral lines, the Triangular window with an error of about $1E-03$ is the best, and the Nuttall window with an error of $1E-02$ is the worst. With 2048 counts and taking into account seven spectral lines, the best is the Nuttall window with an error of $1E-09$, the worst is the Triangular window with an error of $1E-06$. Analysis of the simulation data showed that when using the method of moments, it is first necessary to estimate what maximum amount of samples can be obtained and what number of spectral lines to use in calculations, and only after that choose the appropriate window. The correct choice of the type of window function allows you to reduce the error by an order of magnitude

Key words: method of moments, frequency, harmonic signal, reading, error, time window

References

1. Tereshkin D.O., Semibalamut V.M. "Modern methods for measuring frequency and phase in real time", *Automation and software engineering (Avtomatika i programnaya inzheneriya)*, 2018, no. 2 (24), pp. 117-130.
2. Vais S.N., Repina M.V. "Using + Interpolation Methods in the Development of Test Radar Signals", *Proc. of MAI (Trudy MAI)*, 2014, no. 74, available at: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=49333>
3. Baidarov S.Yu. et al. "Using the technology of virtual instruments to determine the frequency characteristics of elements and devices of control systems", *Proceedings of higher educational institutions. Volga region. Technical science (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Povolzhskii region. Tekhnicheskie nauki)*, 2012, no. 1, pp. 105-115.
4. Rozenberg V.Ya. "Introduction to the theory of accuracy of measuring systems" ("Vvedenie v teoriyu tochnosti izmeritel'nykh system"), Moscow, Sovetskoe radio, 1975, 304 p.
5. Harris Fredrick J. "Using Windows for Discrete Fourier Transform Harmonic Analysis", *IEEE*, 1978, vol. 66, no. 1. DOI: 10.1109/PROC.1978.10837
6. Serov A.N., Shatokhin A.A. "Using sample rate converters to measure the spectrum of a signal using the fast Fourier transform", *Digital Signal Processing Application Issues (Voprosy primeneniya tsifrovoy obrabotki signalov)*, 2018, vol. 8, no. 4, pp 79-84.
7. Eric Jacobsen, Peter Kootsookos. "Fast, Accurate Frequency Estimators", *IEEE Signal Processing Magazine*, 2007, vol. 24, iss. 3, pp. 123-125. DOI: 10.1109/MSP.2007.361611
8. Gnezdilov D.S., Matveev B.V. "Comparative analysis of digital interpolation algorithms for estimating the frequency of a radio signal", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no 2, pp. 37-39.
9. Kayukov I.V., Manelis V.B. "Comparative analysis of various methods for estimating the frequency of a signal", *Proc. of Higher Educational Institutions. Radioelectronics (Izvestiya vuzov. Radioelektronika)*, 2006, no. 7, pp. 42-55.
10. Bischl B., Ligges U., Weichs K. "Frequency Estimation by DFT Interpolation: A Comparison of Methods", *Journal of Signal Processing*, 2009, May. DOI: 10.17877/DE290R-588

11. Gasior M., Gonzalez J.L. "Improving the resolution of FFT frequency measurements with parabolic and Gaussian interpolation", 2004, November. DOI: 10.1063/1.1831158
12. Gnezdilov D.S. et al. "Digital Algorithm for High Accurate Frequency Estimation of a Harmonic Signal Against the Background of Additive Gaussian Noise", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 3-1, pp. 124-126.
13. Chang-Gui Xie "Frequency Estimation of Weighted Signals Based On DFT Interpolation Algorithm", *3rd International Conference on Wireless Communication and Sensor Networks*, 2016. DOI: 10.2991/icwscn-16.2017.99
14. Xiao Yangcan, Ping Wei "Novel frequency estimation by interpolation using Fourier coefficients", *8th international Conference on Signal Processing*, 2006, vol. 1. DOI: 10.1109/ICOSP.2006.344453
15. Antipov S.A., Gnezdilov D.S., Koz'min V.A., Stopkin V.M. "Digital interpolation algorithms for estimating the frequency of a harmonic signal. Comparative analysis", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 3, pp. 42-46.
16. Peter R. "Effective measurements using digital signal analysis", *IEEE Spectrum*, 1971, vol. 8, iss. 4, pp. 62-70. DOI: 10.1109/MSPEC.1971.5218046
17. Minda A.A., Barbinita C.-I., Gillich G.R. "A Review of Interpolation Methods Used for Frequency Estimation", *Romanian Journal of Acoustics and Vibration*, 2020, no. 17.1, pp. 21-26.
18. Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A. "Multilevel interpolation in computer frequency meters of biomedical signals", *Biomedical technologies and radio electronics (Biomeditsinskie tekhnologii i radioelektronika)*, 2004, no. 3, pp. 41-45.
19. Alrubei M.A., Pozdnyakov A.D. "Comparative analysis of the influence of the window function on the estimate of the frequency of a sampled harmonic signal", International scientific-practical conference "Fundamental and applied approaches to solving scientific problems" (Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya "Fundamental and applied approaches to solving scientific problems", Ufa, Vestnik nauki, 2023, pp. 47.
20. Pozdnyakov A.D., Pozdnyakov V.A. "Automation of experimental research, testing and control of radio systems" ("Avtomatizatsiya eksperimental'nykh issledovaniy, ispytaniy i monitoringa radiosistem"), Moscow, Radiotekhnika, 2004, 207 p.
21. Pozdnyakov A.D., Alrubei M.A. "Determination of the frequency of a sampled harmonic signal by the position of the energy peak of the spectrum", *Design and technology of electronic devices (Proyektirovaniye i tekhnologiya elektronnykh sredstv)* 2022, no. 2, pp. 30-34.
22. Monakov A.A. "Algorithm for detecting tracks based on calculating the correlation of traces in the Hough accumulator", *Proc. of Russian universities. Radioelectronics (Izv. vuzov Rossii. Radioelektronika)*, 2023, vol. 26, no. 2, pp. 65-77.
23. Alrubei M.A., Pozdnyakov A.D. "Estimation of the frequency with symmetric and asymmetric structure of the spectral components of a discretized harmonic signal", *Proc. of MAI (Trudy MAI)*, 2023, no. 129. DOI: 10.34759/trd-2023-129-15

Submitted 30.05.2023; revised 04.08.2023

Information about authors

Mohammed A. Alrubei – Postgraduate student, the Department of radio engineering and radio systems, Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs (87 Gorkogo str., Vladimir 600000, Russia), tel. +79607231728, e-mail: inj.moh3@atu.edu.iq, ORCID: <https://orcid.org/my-orcid?orcid=0000-0003-4434-0800>

Alexander D. Pozdnyakov – Dr. Sc. (Technical), Professor of the Department of radio engineering and radio systems, Vladimir State University named after Alexander and Nikolai Stoletovs (87 Gorkogo str., Vladimir 600000, Russia), tel. +79206285381, e-mail: 11alexpoz@mail.ru

МЕТОДИКА ОБОСНОВАНИЯ ТРЕБОВАНИЙ К АНАЛОГОВОЙ ЧАСТИ ПРИЕМНОГО ТРАКТА ЦИФРОВОГО РАДИОПРИЕМНИКА

Р.И. Буров, А.И. Гревцев, В.И. Зимарин, В.В. Капитанов

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

Аннотация: при проектировании аналоговой части приемного тракта цифрового радиоприемника, построенного по супергетеродинной схеме, применительно к узкополосным сигналам, возникает необходимость использовать методический аппарат, позволяющий учитывать влияние чувствительности, коэффициента шума, коэффициента усиления аналогового тракта, дискретизации при аналого-цифровом преобразовании, наложение спектров в процессе дискретизации и выбор номиналов промежуточных частот. Разработка методики обоснования требований к аналоговой части приемного тракта цифрового радиоприемника. Элементами новизны представленного подхода является учет многообразия факторов, влияющих на структуру элементов аналогового тракта, на основе предъявляемых требований к характеристикам разрабатываемых цифровых радиоприемников. Показано, каким образом на этапе проектирования осуществляется предварительный выбор структуры тракта принимаемой частоты, усилительных приборов, исходя из условий многосигнальной избирательности, выбор минимального значения первой промежуточной частоты с учетом обеспечения подавления помехи по побочным каналам первого преобразования частоты, значений частоты дискретизации и номинала второй промежуточной частоты, а также приводятся структурные схемы трактов. Предложенный подход позволяет обосновать требования к построению аналоговой части приемного тракта цифрового радиоприемника, а также к параметрам его элементов

Ключевые слова: цифровой радиоприемник, тракт принимаемой частоты, тракт промежуточных частот, чувствительность, избирательность

Актуальность

В настоящее время в системах приема и обработки дискретной и аналоговой информации широко используется цифровая обработка сигналов (ЦОС). Учитывая преимущества ЦОС [1,2], желательно осуществлять аналого-цифровое преобразование входного колебания как можно ближе к антенне, однако современная элементная база в большинстве случаев не позволяет реализовать эту процедуру, в связи с тем, что аналого-цифровые преобразователи (АЦП) не обладают достаточным быстродействием и необходимым динамическим диапазоном. Поэтому цифровой радиоприемник имеет как аналоговую часть приемного тракта (АЧПТ), обеспечивающую усиление принимаемого сигнала, предварительную частотную избирательность и преобразование частоты сигнала к частоте, на которой осуществляется аналого-цифровое преобразование, так и цифровую часть приемного тракта (ЦЧПТ), в которой реализуются основные функции радиоприемника (РПРм), избирательность по соседнему каналу и демодуляция. Обобщенная

структурная схема цифрового радиоприемника представлена на рис. 1.

Для обеспечения постоянства среднего уровня сигнала на входе АЦП, и таким образом расширения динамического диапазона РПРм и защиты тракта приема от перегрузки используют цепь автоматической регулировки усиления. К потребителю информации сигнал поступает в цифровом виде или после цифро-аналогового преобразования (ЦАП) в аналоговом. С помощью микропроцессорной системы управления (СУ) обеспечивается пользовательский интерфейс, осуществляются перестройка РПРм в диапазоне рабочих частот, необходимые коммутации и регулировки в тракте приема при изменении режима работы.

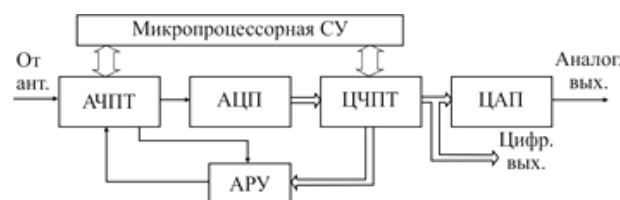


Рис. 1. Обобщенная структурная схема цифрового радиоприемника

Наиболее распространенными конструктивными решениями, определяющими структуру аналоговых трактов цифрового радио-

приемника (ЦРП), являются ЦРП прямого усиления, ЦРП прямого преобразования и супергетеродинные ЦРП [3, 4].

Существенным недостатком аналого-цифрового преобразования сигналов в диапазоне рабочих частот ЦРП прямого усиления является слабая защищенность РПрм от воздействия мощных внеполосных помех, приводящих к многосигнальным явлениям, а также повышенные требования к частоте дискретизации, широкополосности и динамическому диапазону АЦП. Многосигнальным эффектам в виде блокирования, перекрестных искажений и интермодуляции подвержены и приемники прямого преобразования на нулевую промежуточную частоту [3].

При разработке РПрм, в которых осуществляется конвертирование широкого диапазона рабочих частот в более узкий диапазон, в ЦРП диапазона сверхвысокой частоты, а также в ЦРП с повышенными требованиями к многосигнальной избирательности чаще используется супергетеродинная схема построения аналоговой части приемника. При этом осуществляется одно или несколько преобразований частоты, что обеспечивает высокое качество фильтрации близко расположенных помех, а также необходимое усиление и регулировку уровня полезного сигнала.

Отдельные задачи, требующие решения при проектировании аналоговых трактов ЦРП по супергетеродинной схеме, находят отражение в литературе. Например, в [3,4] проведен анализ зависимости чувствительности РПрм от шумовых показателей АЦП, в [4] раскрыты подходы к выбору значения частоты дискретизации с учетом ширины и средней частоты спектра полосового сигнала. Однако для этапа эскизного проектирования ЦРП необходима методика, позволяющая предъявлять требования к структуре тракта принимаемой частоты и к параметрам его функциональных элементов.

Цель работы – разработка методики обоснования требований к аналоговой части приемного тракта цифрового радиоприемника при приеме узкополосных сигналов.

При проведении расчетов в качестве исходных данных задаются (* – обозначены параметры, для которых необходимо выполнить требование): классы излучений; диапазон рабочих частот (ДРЧ) ($f_{\min} \div f_{\max}$); чувствительность ЦРП при приеме каждого вида сигнала с указанием требований к качеству приема (для сигналов с аналоговой модуляцией за-

дается требуемое отношение сигнал/шум на выходе демодулятора $\beta_{\text{вых д}}^* = \left(\frac{U_c}{U_{\text{ш}}} \right)_{\text{вых д}}^*$,

для сигналов с цифровой модуляцией – максимальная вероятность ошибочного приема бита информации $P_{\text{ош}}^*$); требуемое подавление помех по зеркальным каналам приема $D_{\text{зк}}^*$, побочным каналам приема на промежуточных частотах $D_{\text{пч}}^*$ и соседним каналам приема $D_{\text{ск}}^*$; полоса блокирования $\Delta f_{\text{бл}}$; допустимый коэффициент блокирования $K_{\text{бл}}^*$ при воздействии помехи на входе с амплитудой $E_{\text{па}}$ и частотной расстройке $\Delta f_{\text{п}}$; параметры сигналов, позволяющие проводить расчет ширины спектров (пределы спектра аналогового информационного сигнала $F_{\min} \div F_{\max}$, скорость передачи цифровой информации B , частотные разносы между несущими для сигналов с частотной манипуляцией и т.д.).

Рекомендации по выбору структуры тракта принимаемой частоты

Определение структуры преселектора с целью одновременного обеспечения требуемых показателей чувствительности и избирательности осуществляется путем выбора предпочтительного варианта структурной схемы, представляющего собой компромиссное решение между заданными требованиями к чувствительности и избирательности с учетом назначения РПрм и реальной помеховой обстановки. В этих условиях достоинства фильтровой схемы с использованием неперестраиваемых поддиапазонных фильтров, такие как минимальное число коммутаций и настроек, обеспечивающих малое время перестройки преселектора и РПрм в целом, минимальные массогабаритные характеристики, имеют существенное преимущество по сравнению со схемой с перестройкой поддиапазонных фильтров внутри поддиапазона. Таким образом, предпочтение при проектировании ЦРП отдается преселектору, построенному по фильтровой схеме, которая будет представлять собой широкополосную входную цепь (ВЦ) (для каждого частотного поддиапазона свой одноконтурный полосовой фильтр) и один - два каскада усилителей радиочастоты (УРЧ), нагруженных на фильтр нижних частот (ФНЧ)

с полосой пропускания, перекрывающей заданный ДРЧ. Фильтровая схема тракта принимаемой частоты изображена на рис. 2.

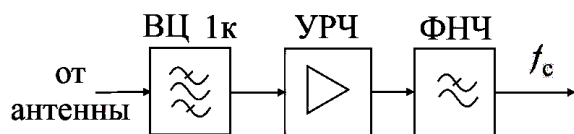


Рис. 2. Фильтровая схема тракта принимаемой частоты

Использование фильтровой схемы существенно повлияет на выбор значения первой промежуточной частоты, которую принимают выше ДРЧ РПРм, что удаляет побочные каналы приема первого преобразования частоты от частоты настройки приемника и позволяет избавиться от них с помощью ФНЧ.

Рекомендации по выбору усилительных приборов

К сожалению, процедура выбора усилительных приборов (УП) затрудняется тем, что современная справочная литература зачастую не дает полных данных, необходимых для проектирования каскадов РПРм (в основном, приводятся значения параметров для типового режима работы и предельные режимы эксплуатации УП). В частности, отсутствие значений параметров нелинейности приводит к невозможности оценки реальной избирательности РПРм по классической методике [3], отсутствие статических характеристик УП не позволяет оценить изменения показателей каскада при отходе от типового режима.

В любом случае при проектировании преселектора предпочтение стоит отдать тому УП, который обладает более протяженным линейным участком проходной характеристики, что позволит обеспечить высокое качество (линейность) обработки сигнала и противостоять действию мощных внеполосных помех (высокая реальная избирательность). Полевые транзисторы обладают более линейными характеристиками, поэтому их применение в линейных усилительных трактах приемника является более предпочтительным. Кроме того, высокие входное и выходное сопротивления ($R_{вх}$ и $R_{вых}$) упрощают согласование УП с высокодобротными резонансными системами. С использованием специализированной справочной литературы, ориентированной на проектирование приемопередающей аппаратуры и со-

державшей наиболее полный объем параметров УП, выбор УП осуществляется путем сопоставления шумовых, усилительных и нелинейных параметров: коэффициент шума N , параметры, характеризующие взаимную модуляцию $\frac{S'}{S}$, блокирование и перекрестную модуляцию $\frac{S''}{S}$ должны выбираться с как можно меньшим значением, а коэффициент усиления по мощности K_p , параметры характеризующие устойчивость усиления $\frac{S}{C_{прох}}$ и широкополосность усиления $\frac{S}{(C_{вх} + C_{вых})}$, как можно с большим значением.

Определение состава тракта исходя из условия обеспечения заданной чувствительности

В соответствии с теорией построения РПРм [3] чувствительность в полной мере определяется коэффициентом шума и шириной полосы пропускания приемника. В РПРм с аналоговой обработкой коэффициент шума в основном определяется шумами первых каскадов преселектора. Однако в ЦРП используется АЦП, который за счет шумов квантования имеет самый большой коэффициент шума в сравнении с другими элементами приемника [4]. Таким образом, обеспечение высокой чувствительности ЦРП сводится к снижению коэффициента шума преселектора АЧПТ, выбору АЦП с высокой разрядностью и частотой дискретизации, а также к реализации коэффициента усиления аналоговой части, снижающей влияние АЦП на общий коэффициент шума [3,4].

Дальнейшие рассуждения будем проводить не привязываясь к конкретному виду аналоговых или дискретных сигналов, тогда реальная чувствительность РПРм рассчитывается по общей формуле [3]

$$E_{a0} [\text{мкВ}] = \frac{1}{8} \sqrt{\Delta F_3 [\text{кГц}] \cdot N [\text{раз}] \cdot R_A [\text{кОм}]}, \quad (1)$$

где N – коэффициент шума приемника,
 ΔF_3 – эквивалентная шумовая полоса РПРм,
 R_A – активное сопротивление антенны.

Из выражения (1) можно получить соотношение расчета максимально допустимого

значения коэффициента шума ЦРП:

$$N^* = \frac{64 \cdot E_{a0}^2}{\Delta F_9 \cdot R_A}, \quad (2)$$

где E_{a0} – требуемая чувствительность РПрм.

Значение требуемой чувствительности E_{a0} и активного сопротивления антенны R_A задается в качестве исходных данных. Эквивалентная шумовая полоса РПрм связана с шириной спектра сигнала $\Delta F_{p/c}$ и абсолютной нестабильностью частоты радиолнии $\Delta F_{p/l}$ формулой [5]

$$\Delta F_9 = 1,1(\Delta F_{p/c} + 2\Delta F_{p/l}). \quad (3)$$

Таким образом, по формуле (2) определяется коэффициент шума N^* , величина которого не должно превышать значение коэффициента шума разрабатываемого цифрового РПрм $N^* \leq N_{црп}$.

Учитывая соотношение для коэффициента шума многокаскадной схемы [2], выражение для коэффициента шума ЦРП принимает вид:

$$N_{црп} = N_{ачпт} + \frac{N_{ацп} - 1}{K_{p\ ачпт}}, \quad (4)$$

где $N_{црп}$ – коэффициент шума цифрового радиоприемника,

$N_{ачпт}$ – коэффициент шума аналоговой части приемного тракта,

$N_{ацп}$ – коэффициент шума аналого-цифрового преобразователя,

$K_{p\ ачпт}$ – коэффициент передачи по мощности аналоговой части приемного тракта.

Для расчета коэффициента шума АЦП используется выражение [4]:

$$N_{ацп} = 1 + \frac{U_{пш}^2}{2^{2d} \cdot f_d \cdot 6 \cdot R_0 \cdot k \cdot T_0}, \quad (5)$$

где $U_{пш}$ – напряжение полной шкалы АЦП,

f_d – частота дискретизации АЦП,

d – разрядность АЦП,

R_0 – входное сопротивление АЦП в режиме согласования,

k – постоянная Больцмана

($k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ Дж/град),

$$T_0 = 293^\circ K.$$

Коэффициент шума АЧПТ $N_{ачпт}$ вычисляется по формуле [5]

$$N_{ачпт} = (1,1 \div 1,2)(N_{вц} + \frac{N_{урч} - 1}{K_{p_{вц}}}), \quad (6)$$

где $N_{урч}$ – коэффициент шума усилительного прибора в каскаде УРЧ,

$N_{вц} = 1 / K_{p_{вц}}$ – коэффициент шума пассивной входной цепи,

$K_{p_{вц}}$ – коэффициент передачи по мощности.

Таким образом, для обеспечения требуемой чувствительности ЦРП, в котором используется АЦП с указанными параметрами, для коэффициента передачи по мощности аналоговой части ЦРП должно выполняться неравенство:

$$K_{p\ ачпт} \geq \frac{N_{ацп} - 1}{N_{црп} - N_{ачпт}}. \quad (7)$$

Полученный минимальный коэффициент передачи по мощности АЧПТ в последующем распределяется между преселектором и трактами промежуточных частот.

Определение требований к усилительному прибору исходя из условий многосигнальной избирательности

В тракте принимаемой частоты эффекту блокирования подвержен каскад УРЧ. В соответствии с теорией [3] выражение для расчета коэффициента блокирования усилительного каскада имеет вид:

$$k_{бл} = \frac{1}{4} \frac{S''}{S} U_{mn}^2, \quad (8)$$

где U_{mn} – амплитуда напряжения помехи на входе каскада УРЧ,

S''/S – параметр нелинейности УП.

С учетом заданных требований к допустимому значению коэффициента блокирования $k_{бл}^*$, из выражения (8) можно определить максимально допустимый параметр нелинейности усилительного прибора $\left(\frac{S''}{S}\right)^*$:

$$\left(\frac{S''}{S}\right)^* = \frac{4 \cdot k_{\text{бл}}^*}{U_{\text{mn}}^2}, \quad (9)$$

Амплитуда помехи на входе каскада УРЧ рассчитывается с учетом избирательных свойств контура ВЦ:

$$U_{\text{мп}} = E_{\text{па}} \cdot \gamma_{\text{вц}}, \quad (10)$$

где $E_{\text{па}}$ – э.д.с помехи в антенне;

$\gamma_{\text{вц}}$ – коэффициент передачи помехи одно-контурной ВЦ:

$$\gamma_{\text{вц}} = \frac{K_{0\text{вц}}}{D_{\text{вц}}} = \frac{K_{0\text{вц}}}{\sqrt{1 + Q_{\text{вц}}^2 \left(\frac{f_{\text{п}}}{f_0} - \frac{f_0}{f_{\text{п}}} \right)^2}}, \quad (11)$$

где $K_{0\text{вц}}$ – коэффициент передачи по напряжению ВЦ на частоте настройки,

$D_{\text{вц}}$ – подавление помехи одноконтурной ВЦ,

$Q_{\text{вц}}$ – эквивалентная добротность контура ВЦ,

f_0 – максимальное значение частоты ДРЧ РПрм, на которой сложнее обеспечивать подавление помех, $f_{\text{п}} = f_{0\text{max}} + \Delta F_{\text{бл}} / 2$.

Расчет минимального значения первой ПЧ, при котором обеспечивается подавление помехи по побочному каналу приема на первой промежуточной частоте

Основной причиной, определяющей выбор двойного преобразования частоты, является необходимость разрешения противоречия между требованиями подавления помехи по зеркальному каналу и обеспечения высокой избирательности по соседним каналам. Поэтому дальнейшие вычисления будем проводить для двух преобразований частоты.

Расчет проводится для случая настройки РПрм на максимальную частоту ДРЧ, поскольку при выборе первой промежуточной частоты (ПЧ) выше диапазона рабочих частот помеха на первой промежуточной частоте имеет минимальную частотную расстройку от верхней границы диапазона рабочих частот. С учетом того, что избирательные свойства преселектора реализуются ПФ входной цепи и ФНЧ в нагрузке усилительного каскада, ослабление помехи на первой ПЧ определяется по формуле

$$D_{1\text{пч}} = D_{1\text{пч вц}} \cdot D_{1\text{пч фнч}}, \quad (12)$$

где $D_{1\text{пч вц}}$ – ослабление помехи на первой ПЧ в контуре входной цепи;

$D_{1\text{пч фнч}}$ – ослабление помехи на первой ПЧ фильтром нижних частот (ФНЧ).

Задача определения минимального значения первой промежуточной частоты сводится к определению частоты, на которой $D_{1\text{пч}}$ превысит требуемое значение ($D_{1\text{пч}} \geq D_{1\text{пч треб}}^*$).

Используя известные подходы для проектирования фильтров [2], можно получить характеристики избирательности для ФНЧ. При этом необходимо учитывать, что чем выше порядок фильтра, тем больше затухание сигнала, а это в свою очередь существенно повлияет на чувствительность цифрового РПрм. В качестве примера рассмотрим ВЦ, состоящую из ФНЧ четвертого порядка и одноконтурного ПФ. Для каждого из этих элементов получены характеристики ослабления и результирующее ослабление преселектора, которые представлены на рис. 3 и рис. 4.

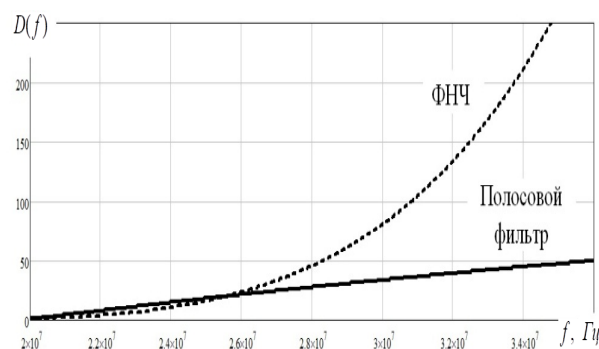


Рис. 3. Характеристики ослабления ФНЧ и полосового фильтра ВЦ

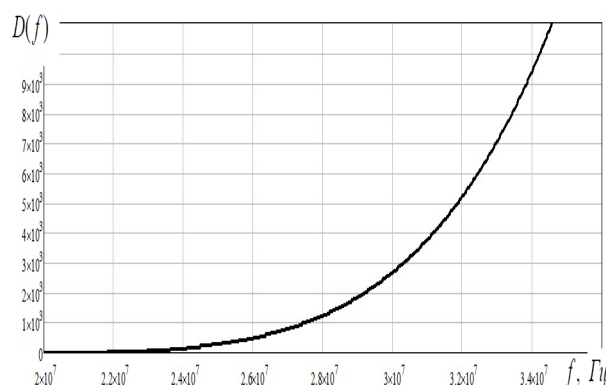


Рис. 4. Результирующая характеристика ослабления преселектора

По результирующей характеристике ослабления преселектора определяют минимальные требования по подавлению побочных каналов приема и выбирают номинальное значение частоты 1ПЧ. К примеру, для частот свыше 34 МГц (рис. 4) создано большое количество кварцевых, электромеханических, пьезоэлектрических фильтров и фильтров на поверхностно-акустических волнах, что позволит выбрать для тракта 1ПЧ фильтр с требуемыми параметрами. Таким образом, тракт первой ПЧ можно представить в виде, показанном на рис. 5. Требования к ПФ1 с позиции подавления побочных каналов 2ПЧ будут определяться после выбора 2ПЧ.

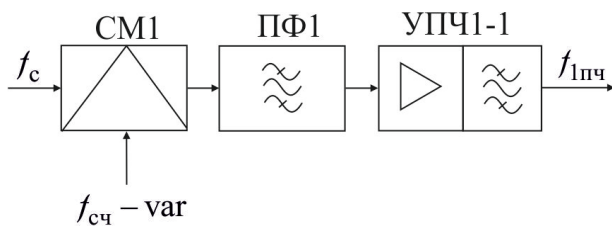


Рис. 5. Предварительная структура тракта первой ПЧ

Выбор значения частоты дискретизации и номинала второй ПЧ. Структурная схема тракта второй ПЧ

Вторая (основная) промежуточная частота выбирается исходя из требований к ослаблению побочных каналов приема второго преобразования частоты в тракте первой ПЧ и возможности аналого-цифрового преобразования сигнала в тракте второй ПЧ. В общем случае с учетом размножения спектра сигнала при дискретизации в АЦП, и устранения алиасинга (наложение спектров в процессе дискретизации), а также противоречивых требований: увеличение частоты дискретизации нежелательно, поскольку возрастает вычислительная сложность процедур ЦОС, уменьшение частоты дискретизации приводит к возрастанию коэффициента шума АЦП и снижению чувствительности приемника, целесообразно выбрать частоту 2ПЧ $f_{2пч} = 0.25f_d$ [1,4]. Структурная схема тракта 2ПЧ будет иметь вид, изображенный на рис. 6.

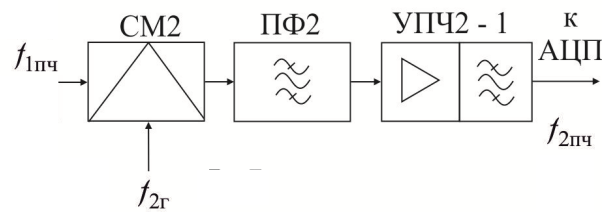


Рис. 6. Структурная схема тракта 2ПЧ

В разрабатываемом РПрм с ЦОС на вход АЦП вместе с полезным сигналом поступают все частотные составляющие, действующие в пределах АЧХ ПФ2. Проникновение этих спектральных составляющих в спектр низкочастотного отображения сигнала также недопустимо, как и соседнего отображения спектра. Подавить до требуемого уровня все помеховые составляющие в пределах спектра низкочастотного отображения сигнала является основным требованием предъявляемым к полосовому фильтру ПФ2, выполняющим функцию антиалиасингового фильтра.

В качестве ПФ2 целесообразно выбирать кварцевый фильтр с центральной частотой $f_u = f_{2пч}$, полосой пропускания не менее максимальной ширины полосы пропускания радиоприемника, ослаблением соседнего отображения спектра при дискретизации $D_{ск}^*$.

Распределение усиления между трактами приемника

Заданная чувствительность разрабатываемого ЦРП обеспечивается, если коэффициент усиления по мощности аналоговой части приемного тракта $K_{р ачпт} \geq \frac{N_{ачп} - 1}{N_{црп} - N_{ачпт}}$. Усиление

между трактами АЧПТ распределяем, руководствуясь следующими соображениями: широкополосный тракт преселектора и тракт 1 ПЧ должны обладать небольшим усилением, поскольку вместе с полезным сигналом происходит усиление помех (5÷15 дБ), что может повлечь ухудшение многосигнальной избирательности, избирательные цепи и преобразователи частоты вносят незначительное ослабление сигнала (-2÷-5 дБ) [4]. Основное усиление сигнала осуществляется в тракте второй ПЧ. Более точное распределение усиления между функциональными узлами трактов осуществляется при разработке принципиальной схемы АЧПТ.

Для наглядного представления распределения усиления между трактами приемника на рис. 7 представлен пример одного из варианта такого распределения: в качестве смесителей СМ1 и СМ2 используются диодные кольцевые смесители (минимальный коэффициент преобразования современных пассивных смесителей равен -5 дБ); контур ВЦ, обеспечивающий со-

гласование низкоомной антенны с высокоомным входом УРЧ, обладает сравнительно низким коэффициентом передачи (-3 дБ); ФНЧ на выходе преселектора ослабляет сигнал в зависимости от порядка фильтра (принято 2 дБ); кварцевые полосовые фильтры вносят потери в полосе пропускания от 1 до 5 дБ.

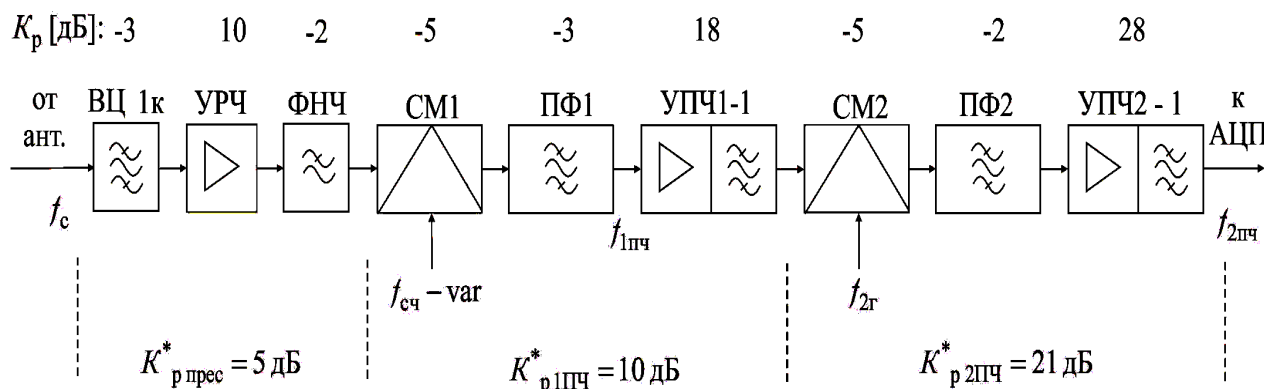


Рис. 7. Структурная схема АЧПТ и распределение усиления между трактами РПрм

Принимая указанные значения коэффициентов передачи пассивных устройств, можно предъявить требования к коэффициентам усиления УРЧ, УПЧ1 и УПЧ2 с учетом полученного по формуле (7) коэффициента передачи по мощности аналоговой части ЦРП, например, $K_{р\ урч}^* = 10$ дБ; $K_{р\ упч1}^* = 18$ дБ; $K_{р\ упч2}^* = 28$ дБ. Такие коэффициенты усиления способны обеспечить однокаскадные усилители.

Заключение

Таким образом, разработана методика обоснования требований к аналоговой части приемного тракта цифрового радиоприемника узкополосных сигналов, построенного по супергетеродинной схеме, позволяющая осуществить выбор структуры тракта принимаемой частоты, усилительных приборов, исходя из условий многосигнальной избирательности, выбор минимального значения первой промежуточной частоты с учетом обеспечения подавления по-

мехи по побочным каналам первого преобразования частоты, значений частоты дискретизации и номинала второй промежуточной частоты, распределить усиление между трактами приемника, сформировать структурную схему АЧПТ и предъявить требования к функциональным элементам трактов радиоприемника.

Литература

1. Скляр Б. Цифровая связь. Теоретические основы и практическое применение. Пер. с англ. М.: Издательский дом «Вильямс», 2003. 1104 с.
2. Лайонс Р. Цифровая обработка сигналов. Пер. с англ. М.: Бином-Пресс, 2007. 379 с.
3. Радиоприемные устройства / Н.Н. Фомин, Н.Н. Буга, О.В. Головин [и др.]. М.: Горячая линия – Телеком, 2007. 520 с.
4. Волков Л.Н., Немировский М.С., Шинаков Ю.С. Системы цифровой радиосвязи: базовые методы и характеристики: учебное пособие. М.: Эко-Трендз, 2005. 392 с.
5. Зимарин В.И., Козирацкий А.Ю., Капитанов В.В. Прием и обработка сигналов: учебник. Воронеж ВУНЦ ВВС «ВВА», 2019. 325 с.

Поступила 28.04.2023; принята к публикации 04.08.2023

Информация об авторах

Буров Роман Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, 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.: +7 (908) 130-67-09, e-mail: bri555@mail.ru

Гревцев Александр Иванович – канд. техн. наук, заместитель начальника кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, 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.: +7 (951) 850 59 22, e-mail: gref555@mail.ru

Зимарин Виктор Иванович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, 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.: +7 (920) 428-16-10, e-mail: zim555@mail.ru

Капитанов Владимир Валерьевич – канд. техн. наук, доцент кафедры радиотехники и антенно-фидерных устройств, 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.: +7 (904) 211-47-08, e-mail: kvv256@rambler.ru

TECHNIQUE OF THE SUBSTANTIATION OF DEMANDS TO THE ANALOG PART OF THE DIGITAL RADIORECEIVER RECEPTION SECTION

R.I. Burov, A.I. Grevtsev, V.I. Zimarin, V.V. Kapitanov

The military educational and scientific center of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin, Voronezh, Russia

Abstract: when designing of an analogue part of a digital radioreceiver reception section based on superheterodyne principle, with reference to narrow-band signals, there is a necessity to use the methodical apparatus, allowing to consider agency of sensitivity, a noise factor, coefficient of amplification of an analogue section, a digitization at an analogue-digital conversion, superposition of spectra in the course of a digitization and sampling of face values of intermediate frequencies. The paper is devoted to the development of a technique for substantiating the requirements for the analog part of the receiving path of a digital radio receiver. The novelty of the presented approach is the consideration of the variety of factors that affect the structure of the elements of the analog path, based on the requirements for the characteristics of the developed digital radio receivers. It is shown how, at the design stage, the preliminary selection of the structure of the received frequency path, amplifying devices, based on the conditions of multi-signal selectivity, the choice of the minimum value of the first intermediate frequency, taking into account the suppression of interference in the side channels of the first frequency conversion, frequency values sampling and nominal value of the second intermediate frequency, as well as block diagrams of the paths. The proposed approach allows justifying the requirements for the construction of the analog part of the receiving path of a digital radio receiver, as well as for the parameters of its elements

Key words: the digital radioreceiver, section of accepted frequency, section of intermediate frequencies, sensitivity, selectivity

References

1. Sklyar B. "Digital communication. Theoretical bases and practical application" ("Tsifrovaya svyaz'. Teoreticheskiye osnovy i prakticheskoye primeneniye"), Moscow, Williams, 2003, 1104 p.
2. Laions R. "Digital machining of signals" ("Tsifrovaya obrabotka signalov"), Moscow, Binom-Press, 2007, 379 p.
3. Fomin N.N., Bug H.H., Golovin O.V. "Radio receivers" ("Radiopriyemnyye ustroystva"), Moscow, Goryachaya liniya – Telekom, 2007, 520 p.
4. Volkov L.N., Nemirovsky M.C., Shinakov Yu.S. "The system of digital radio communication: base methods and characteristics" ("Sistemy tsifrovoy radiosvyazi: bazovyye metody i kharakteristiki"), Moscow, Eko-Trendz, 2005, 392 p.
5. Zimarin V.I., Koziratsky A.Yu., Kapitanov V.V. "Reception and processing of signals: student's book" ("Priyem i obrabotka signalov: uchebnik"), Voronezh, VUNC VVS "VVA", 2019, 325 p.

Submitted 28.04.2023; revised 04.08.2023

Information about authors

Roman I. Burov – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of radio technics, The military educational and scientific center of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel.: +7 (908) 130-67-09, e-mail: bri555@mail.ru

Alexander I. Grevtsev – Cand. Sc. (Engineering), Deputy Chief of the Department of radio technics, The military educational and scientific center of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel.: +7 (951) 850-59-22, e-mail: gref555@mail.ru

Victor I. Zimarin – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of radio technics, The military educational and scientific center of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel.: +7 (920) 428-16-10, e-mail: zim555@mail.ru

Vladimir V. Kapitanov – Cand. Sc. (Engineering), Associate Professor of the Department of radio technics, The military educational and scientific center of the Air Force Academy named after Professor N.E. Zhukovsky and Yu.A. Gagarin (54a Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel.: +7 (904) 211-47-08, e-mail: kvv256@rambler.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ФИЛЬТРУЮЩИХ КОНДЕНСАТОРОВ НА РАБОЧИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УПРАВЛЯЕМОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

С.М. Фёдоров^{1,2}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: исследуется характер влияния фильтрующих конденсаторов на рабочие характеристики фазовращателя на основе управляемого метаматериала, построенного в виде электромагнитного кристалла, в узлах которого размещены коммутирующие *pin*-диоды. Фильтрующие конденсаторы были добавлены в конструкцию фазовращателя для фильтрации постоянной составляющей электрического тока, управляющей *pin*-диодами. Представлены графики реализуемых сдвигов фазы и уровень вносимых потерь, полученные с помощью математического моделирования. Применение управляемого метаматериала позволяет добиться изменения значения фазы отраженной волны в широкой полосе частот в пределах от 0 до 360 градусов, при этом частотные зависимости фазы, соответствующие различным сечениям расположения плоскости отражения, имеют регулярный характер. Кроме того, отражения от структуры управляемого метаматериала при выключенных коммутаторах незначительны, а в силу изотропности метаматериала поляризация волн может быть произвольной. Перспективным представляется применение оптически управляемых коммутаторов на основе микроэлектромеханических систем (МЭМС) и наноэлектромеханических систем (НЭМС), в которых замыкание контактов осуществляется в результате давления силы света на одну из пластин устройства. Данный вид коммутирующих элементов обладает высокой степенью достижимой изоляции, достигающей 70 дБ в закрытом состоянии и малым ослаблением (сотые доли децибела) в открытом состоянии. Также возможно применение в качестве коммутатора фотоуправляемого полупроводника, характеризующегося низкой проводимостью при отсутствии освещения и высокой проводимостью при его освещении

Ключевые слова: отражательный фазовращатель, фильтрующие конденсаторы, управляемый метаматериал

Введение

Развития современных систем связи является все более широкое использование устройств с управляемым лучом. Это создает спрос на технологии сканирования лучом, обладающие низкой ценой и весом, и позволяющие реализовать функцию поиска и удержания в луче приемопередатчика. Традиционным способом управления диаграммой направленности является использование фазовращателей, способные обеспечить несколько сдвиг фазы на несколько фиксированных значений в рабочей полосе частот.

Существует конструкция недорогого фазовращателя, построенного на основе каскада реконфигурируемых дефектных микрополосковых линий, способного реализовать сдвиг фазы на 17° с помощью управления *pin*-диодами [1]. Подобная же конструкция фазовращателя на основе микрополосковой линии и *pin*-диодах, выполняющих роль переключателей предложена в работе [2]. Аналоговый фазовращатель в виде копланарного волновода, нагруженного на варикап представлена в работе [3]. В статье [4] предложен фазовращатель на основе 90° гибридного моста с подключенным варикапом, реализующий фазовый сдвиг 18°.

Также существуют отражательные фазовращатели на основе SiGe с низкими вносимыми потерями и управляемые всего лишь одной точкой напряжения [5]. В этой конструкции используется диагональная конфигурация гибридного моста, позволяющая использовать отражательную реактивную нагрузку и уменьшающая потери. Общим недостатком рассмотренных фазовращателей является достаточно узкая рабочая полоса. Для решения этой проблемы может быть использованы каскадные отражательные фазовращатели, построенные на основе 90° гибридных мостов и варикапах с цифровым управлением [6].

В качестве решения проблемы узкой полосы в данной статье, рассматривается конструкция отражательного фазовращателя на основе управляемого метаматериала в виде электромагнитного кристалла с *pin*-диодами, расположенными в узлах [7]. Для управления *pin*-диодами используется постоянное напряжение, которое негативно сказывается на рабочих характеристиках отражательного фазовращателя. Применение конденсаторов для фильтрации постоянной составляющей тока должно решить эту проблему, но может повлиять на работу фазовращателя. Исследованию характера этого влияния и посвящена данная статья.

Отражательный фазовращатель на основе управляемого метаматериала с конденсаторами

В данной статье рассматривается конструкция фазовращателя, реализованная как волновод с размещенным внутри управляемым метаматериалом (рис. 1). Метаматериал представляет собой электромагнитный кристалл, образованный тонкими металлическими проволоками, соединяющимися друг с другом через коммутационное устройство (например, pin-диод). Принцип действия фазовращателя заключается в замыкании отдельных плоскостей метаматериала после чего от них начинает отражаться электромагнитная волна. При замыкании плоскости, расположенной на другом расстоянии от входа волновода, мы изменяем расстояние, которое проходит волна, а значит и ее фазу.

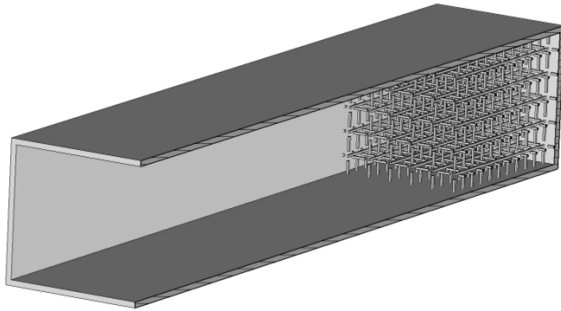


Рис. 1. Продольное сечение отражательного фазовращателя с управляемым метаматериалом в виде электромагнитного кристалла

Как известно, конденсатор является реактивным устройством, чье сопротивление сильно зависит от частоты – на высоких частотах сопротивление конденсатора мало, а на низких оно достигает очень больших значений, согласно известной формуле $X_C = 1/(2\pi fC)$. Исходя из этого следует, что конденсатор играет роль резистора для низких частот, т.е. конденсатор

является фильтром верхних частот. Данное свойство может быть полезно в системах, использующих постоянный и переменный ток одновременно в определенные временные интервалы или участки цепи. Это значит, что по истечении этого временного интервала (или за пределами некоторого участка цепи) нам будет больше не нужна переменная или постоянная компонента тока. В разработанной конструкции метаматериала постоянный ток используется для управления коммутирующими элементами, а отражаемое поля является переменным. Для отсекающей постоянной составляющей тока, негативно влияющей на характеристики метаматериала, предлагается разместить в разрывах каждого из плеч диполей конденсатор номиналом (модель), как показано на рис. 2.

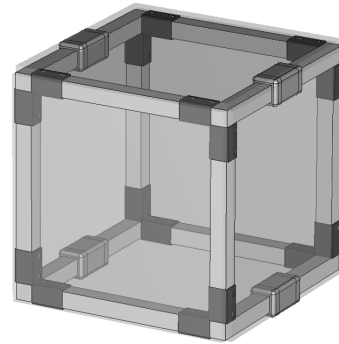


Рис. 2. Элементарная ячейка управляемого метаматериала с фильтрующими конденсаторами

В результате математического моделирования были получены зависимости фазы отраженной волны от частоты для различных замыкаемых поверхностей. На рис. 3 приведены эти графики для случая метаматериала с конденсаторами. Как видно из рисунка, после добавления в конструкцию метаматериала фильтрующих конденсаторов, отражательный фазовращатель не утратил способность обеспечивать сдвиг фазы в широкой полосе частот.

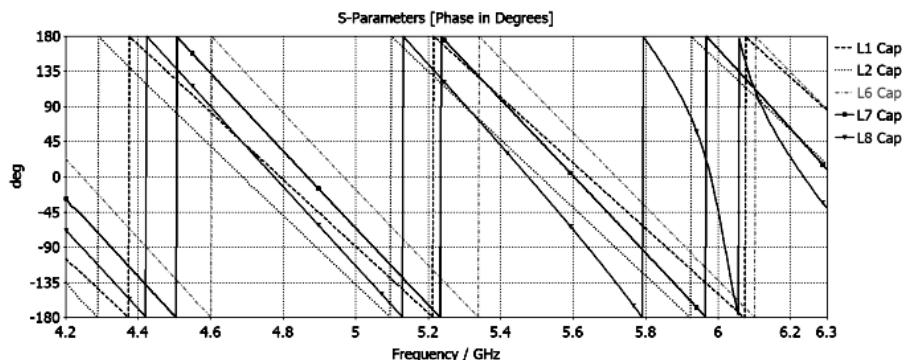


Рис. 3. Зависимости фаз от частоты при различном расположении замыкаемого слоя метаматериала с фильтрующими конденсаторами

На рис. 4 приведены графики фаз S_{11} -параметров для метаматериала с фильтрующими конденсаторами и без них. Из данного

рисунка видно, что хотя добавление конденсаторов приводит к незначительному изменению кривых, но их общий характер сохраняется.

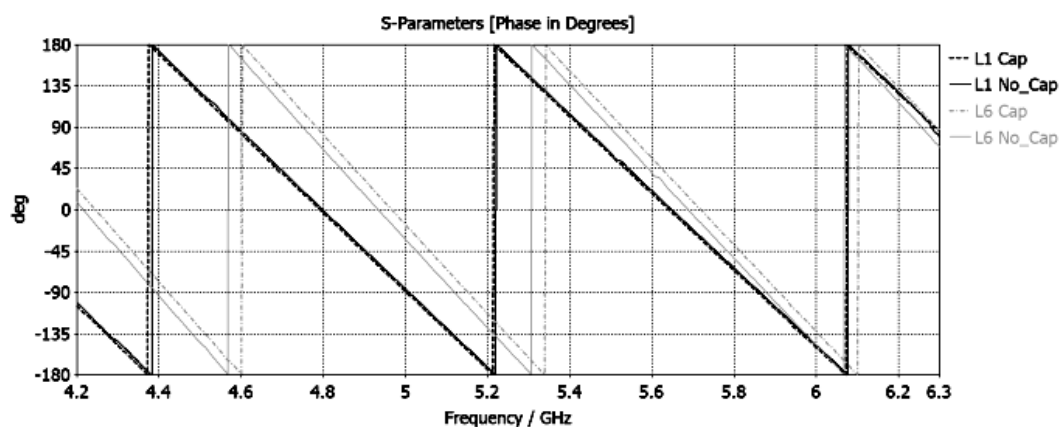


Рис. 4. Зависимости фаз от частоты для двух вариантов расположения замыкаемого слоя с фильтрующими конденсаторами и без них

На рис. 5 показаны графики потерь энергии, вызванные добавлением в конструкцию фильтрующих конденсаторов, для случая отсутствия замкнутых поверхностей – так волна проходит сквозь метаматериал два раза и накапливает максимальные потери. На вход фазовращателя подавалась мощность равная 0,5 Вт, а наибольшее значение потерь в конденсаторах составило 0,01 Вт, что свидетельствует о лишь незначительном снижении эффективности отражательного фазовращателя.

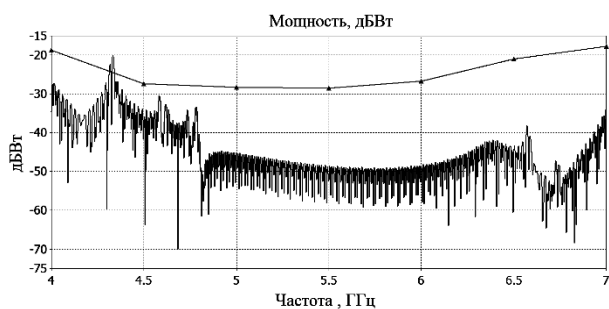


Рис. 5. График зависимости потерь от частоты в металлах и конденсаторах

Заключение

В данной статье показано, что добавление фильтрующих конденсаторов в конструкцию отражательного фазовращателя на основе управляемого метаматериала не приводит к существенному снижению его рабочих характеристик. В тоже время, фильтрующие конденсаторы позволяют убрать постоянную компоненту тока, управляющего коммутационными диодами, и тем самым уменьшить искажения электромагнитного поля.

Литература

1. A Novel Phase Shifter Based on Reconfigurable Defected Microstrip Structure (RDMS) for Beam-Steering Antennas / Can Ding Y. Jay Guo, Pei-Yuan Qin, Trevor S. Bird, Yintang Yang // 2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation (ISAP). 2013. Vol. 02. Pp. 993 - 996.
2. Design of Compact Reconfigurable Switched Line Microstrip Phase Shifters for Phased Array Antenna / P. Anand, S. Sharma, D. Sood, C.C. Tripathi // 2012 1st international conference on emerging technology trends in electronics, communication and networking (ET2ECN). 2012. Pp. 1-3.
3. Circuit Simulation of Varactor Loaded Line Phase Shifter / M. Ould-Elhassen, M. Mabrouk, A. Ghazel, P. Benech // Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings, Marrakesh. 2011. Pp. 987-990.
4. Design of electrically tunable phase shifter for antenna arrays operating in Ku-band / R. Ouali, L. Osman, T. Razban, Y. Mahe // 2015 IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). 2015. Pp. 1-5.
5. SiGe based Ka-band reflection type phase shifter for integrated phased array transceivers / N. Mazor, O. Katz, R. Ben-Yishay, D. Liu, A.V. Garcia, D. Elad // 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS). 2016. Pp. 1-4.
6. Voisin S., Knopik V., Kerhervé E. A 25-50 GHz Digitally Controlled Phase-Shifter // 2021 16th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC). 2022. Pp. 305-308.
7. Использование активного метаматериала в качестве интегрированного в волновод фазовращателя / Ю.Г. Пастернак, Е.А. Ищенко, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров // Труды учебных заведений связи. 2021. Т. 7. № 1. С. 54-62.

Информация об авторах

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

STUDY OF THE INFLUENCE OF FILTER CAPACITORS ON THE PERFORMANCE OF CONTROLLED METAMATERIAL

S.M. Fedorov^{1,2}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: this article investigates the nature of the influence of decoupling capacitors on the performance of a phase shifter based on a controlled metamaterial built in the form of an electromagnetic crystal at the nodes of which switching pin-diodes are placed. Decoupling capacitors were added to the design of the phase shifter to filter the DC component of the electric current that drives the pin diodes. Graphs of realizable phase shifts and the level of insertion losses obtained using mathematical modeling are presented. The use of a controlled metamaterial makes it possible to achieve a change in the phase value of the reflected wave in a wide frequency band ranging from 0 to 360 degrees, while the frequency dependences of the phase corresponding to different sections of the reflection plane have a regular character. In addition, reflections from the structure of the controlled metamaterial with switched off switches are insignificant, and due to the isotropy of the metamaterial, the polarization of waves can be arbitrary. It seems promising to use optically controlled MEMS and NEMS switches, in which the contacts are closed as a result of light pressure on one of the device plates. This type of switching elements has a high degree of achievable isolation, reaching 70 dB in the closed state and low attenuation (hundredths of a decibel) in the open state. Also, it is possible to use a photocontrolled semiconductor as a switch, which is characterized by low conductivity in the absence of illumination and high conductivity when it is illuminated

Key words: reflective phase shifter, decoupling capacitors, controlled metamaterial

References

1. Can Ding Y., Jay Guo, Pei-Yuan Qin, Trevor S. Bird, Yintang Yang. "A Novel Phase Shifter Based on Reconfigurable Defected Microstrip Structure (RDMS) for Beam-Steering Antennas", *Proc. of the International Symposium on Antennas & Propagation (ISAP)*, 2013, vol. 02. pp. 993 - 996.
2. Anand P., Sharma S., Sood D., Tripathi C.C. "Design of Compact Reconfigurable Switched Line Microstrip Phase Shifters for Phased Array Antenna", *The 1st international conference on emerging technology trends in electronics, communication and networking (ET2ECN)*, 2012, pp. 1-3.
3. Ould-Elhassen M., Mabrouk M., Ghazel A., Benech P. "Circuit Simulation of Varactor Loaded Line Phase Shifter", *Progress in Electromagnetics Research Symposium Proceedings*, Marrakesh, 2011, pp. 987-990.
4. Ouali R., Osman L., Razban T., Mahe Y. "Design of electrically tunable phase shifter for antenna arrays operating in Ku-band", *IEEE 15th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, 2015, pp. 1-5.
5. Mazor N., Katz O., Ben-Yishay R., Liu D., Garcia A.V., Elad D. "SiGe based Ka-band reflection type phase shifter for integrated phased array transceivers", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS)*, 2016, pp. 1-4.
6. S. Voisin V. Knopik, Kerhervé E. "A 25-50 GHz Digitally Controlled Phase-Shifter", *The 16th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)*, 2022, pp. 305-308.
7. Pasternak Yu.G., Ishchenko E.A., Pendyurin V.A., Fedorov S.M. "The use of active metamaterial as a phase shifter integrated into the waveguide", *Proceedings of educational institutions of communication (Trudy uchebnykh zavedeniy svyazi)*, 2021, vol. 7, no. 1, pp. 54-62.

Submitted 31.05.2023; revised 04.08.2023

Information about authors

Sergei M. Fedorov – Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

МЕТОДИКА КОНТРОЛЯ ВЛИЯНИЯ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНУЮ СИСТЕМУ РАДИОПЕРЕДАЧИ

И.В. Свиридова, Р.Н. Хорошайлов, Д.В. Лялин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: системы радиосвязи между поездом и путями передают необходимую для движения поездов информацию (такую как управление поездом, голосовая диспетчеризация, команды, оперативная информация, а также данные мониторинга) между бортовым радиооборудованием и соответствующей инфраструктурой радиосвязи, расположенной вдоль путей. В условиях высокоскоростных железных дорог электромагнитные помехи (EMI) представляют серьезную угрозу для систем радиосвязи между поездом и путями и могут привести к критическим проблемам безопасности железнодорожного транспорта и даже пассажиров. Учитывая сложный сценарий развития высокоскоростной железной дороги, важно отслеживать влияние помех, чтобы гарантировать качество системы радиосвязи между поездом и путями. С одной стороны, системы радиосвязи между поездом и путями работают в сложной электромагнитной среде, где временные помехи сосуществуют постоянно, и резко изменяются во время движения поезда. С другой стороны, для применения на железных дорогах использовались различные технологии радиосвязи, включающие коды прямой коррекции ошибок для защиты от электромагнитных помех. Таким образом, предлагается новый подход к оценке воздействия на радиопередачу, основанный на совместных статистических характеристиках, изменяющихся во времени электромагнитных помех. В этом подходе применяется динамическая модель отображения эффективного отношения сигнал/помеха плюс шум для установления связи между показателями блочной ошибки бортовой радиосвязи и общими статистическими характеристиками помех с использованием взаимной информационной метрики. Моделирование радиопередачи с использованием турбокодирования и кодирования с низкой плотностью проверки четности при различных помехах показывает, что этот подход эффективен для оценки ухудшения качества передаваемого сигнала при прямом кодировании с исправлением ошибок из-за электромагнитных помех с различными характеристиками

Ключевые слова: электромагнитное воздействие, распределение вероятности амплитуды, распределение длительности импульса, радиопередача между поездом и путями

Введение

Европейская система управления железнодорожным движением (ERTMS) и объединенная Европейская система управления поездом (ETCS) — это важный промышленный проект, направленный на улучшение трансграничной совместимости путем создания единого стандарта железнодорожной сигнализации. Для успешного перехода необходимо больше знать о влиянии этой новой системы сигналов на пропускную способность, их планирование и расписание. Изучение проблем, связанных с поведением машинистов, имеет большое значение до полного развертывания ERTMS, и поэтому важно зафиксировать опыт пилотных линий. Система радиосвязи ERTMS показана на рис. 1.

Железнодорожные системы радиосвязи между поездом и путями (RSTT) передают управление поездом, голосовую диспетчеризацию, команды, оперативную информацию, а также данные мониторинга между бортовым

радиооборудованием и соответствующей радиоинфраструктурой, расположенной вдоль пути. В системе высокоскоростной железной дороги (HSR) RSTT обеспечивает улучшенное управление железнодорожным движением, безопасность пассажиров и повышенную безопасность движения поездов [1]. Таким образом, RSTT считаются критически важными для эксплуатации поездов в целом и управления аварийными ситуациями. Например, среди функций диспетчерской связи, указанных для железной дороги, Глобальная система мобильной связи для железных дорог (GSM-R) предоставляет железнодорожную службу экстренного вызова (REC) для машинистов, чтобы предупредить все поезда, когда часть назначенного им маршрута может быть занята и возникает опасность столкновения, чтобы они могли немедленно начать снижение скорости или торможение, в зависимости от правил эксплуатации. Следовательно, доступность частот GSM-R необходима для безопасной и функциональной работы [2].

Технические уровни ERTMS состоят из Европейской системы управления поездом (ETCS) и поставщика услуг передачи данных

Global System for Mobile Communications-Railway (GSM-R). Эта концепция представляет собой стандартизированное поколение систем управления поездом и сигнализации, которое включает в себя автоматическую защиту, кон-

тролирует его скорость и торможение. Практически ETCS является бортовой системой, которая сравнивает максимально разрешенную скорость с фактической скоростью поезда.

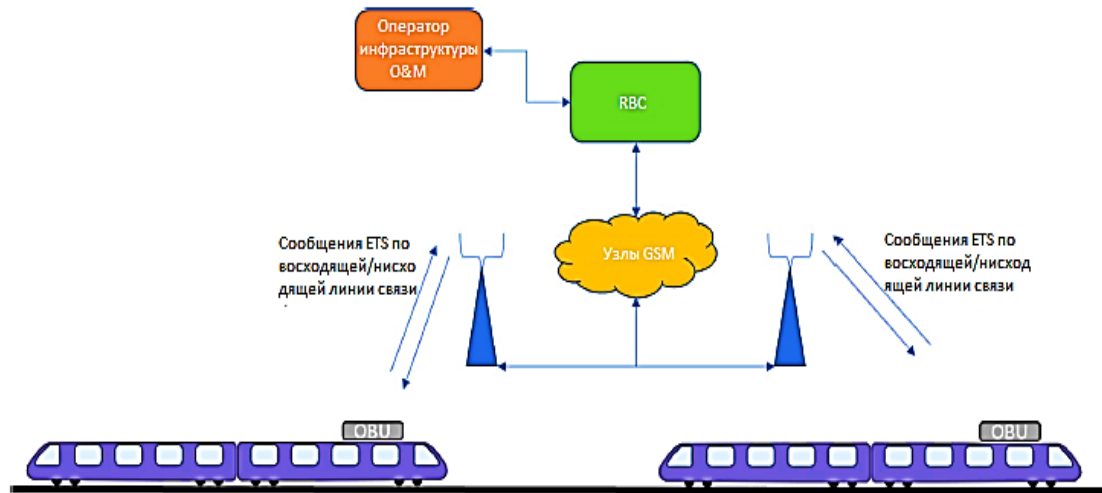


Рис. 1. Обзор радиосвязи ERTMS

Служба переноса данных GSM-R работает как канал передачи данных для соединения бортового устройства (OBU) и центра радио блокировки (RBC). Канал обеспечивает передачу данных для восходящих и нисходящих сообщений ETCS между OBU и RBC.

В системе сигнализации ERTMS связь между поездом и RBC осуществляется посредством сообщений ETCS. Она основана на переменных и пакетах, определена в спецификации системных требований.

Постановка задачи

К сожалению, железнодорожная инфраструктура функционирует в суровой и сложной электромагнитной среде, где помехи генерируются как внутри, так и за пределами системы HSR. При обеспечении движения поездов система электрической тяги и мощные электроприборы излучают сильное электромагнитное излучение при некоторых неизбежных обстоятельствах, таких как дуги, возникающие при разъединении пантографа и контактного провода.

Было предложено несколько методов для мониторинга влияния помех на RSTT на основе различных методик измерения принимаемых помех, таких как классификация на основе формы сигнала во временной области, моделирование и расчет на основе распределения амплитуды вероятности (APD), детектор и ги-

стограмма мгновенной частоты. Среди этих методов измерения APD отражает статистику электромагнитных помех во временной области и может фиксировать динамическое поведение изменяющихся во времени электромагнитных помех с помощью измерительного оборудования.

Здесь предлагается новый подход к оценке влияния комплексных помех на RSTT на основе статистики во временной области. Поскольку помехи обычно рассматриваются как импульсы, продолжительность и амплитуда импульсов являются основными факторами, влияющими на работу радиооборудования. Поэтому используем распределение длительности импульса (PDD) и APD вместе для характеристики электромагнитных помех, чтобы проанализировать производительность системы в условиях импульсного шума. Кроме того, предлагается модель отображения динамического эффективного соотношения сигнал/помеха плюс шум (SINR) для установления связи между характеристикой блочной ошибки бортовой радиосвязи и совместными статистическими характеристиками помех с помощью показателя, основанного на взаимной информации (MI).

Методика контроля систем радиосвязи между поездом и путями

Для контроля воздействия помех на RSTT во время движения поездов предлагается ме-

тодика бортового контроля качества связи. В этом методе помехи на входе приемной антенны должны отслеживаться с помощью ответителя, независимого от существующего радиоприемника. Таким образом, снижение производительности передачи RSTT может быть оценено на основе измерения помех. Кроме того, по сравнению с указанными требованиями в соответствующих нормативных актах можно было бы определить, является ли помеха достаточно интенсивной, чтобы угрожать надежности RSTT. Таким образом, оператор может получать информацию о качестве радиопередачи в режиме реального времени и даже получать раннее предупреждение до того, как произойдет отключение связи, через интерфейс водитель–машина (DMI). Тогда

возникает вопрос: как установить связь между измерением электромагнитных помех и ухудшением характеристик радиопередачи с помехами в реальном времени.

В сложной среде HSR систем радиосвязи между поездом и путями страдает от возмущений с различными статистическими характеристиками. В движущихся поездах радиоприемнику в основном мешают кратковременные помехи, возникающие между контактной сетью и пантографом, а также постоянные помехи, исходящие от базовых станций сети мобильной связи общего пользования. На месте были выполнены измерения типичных электромагнитных помех в диапазоне частот GSM-R на выходном порту антенны GSM-R, и результаты показаны на рис. 2.

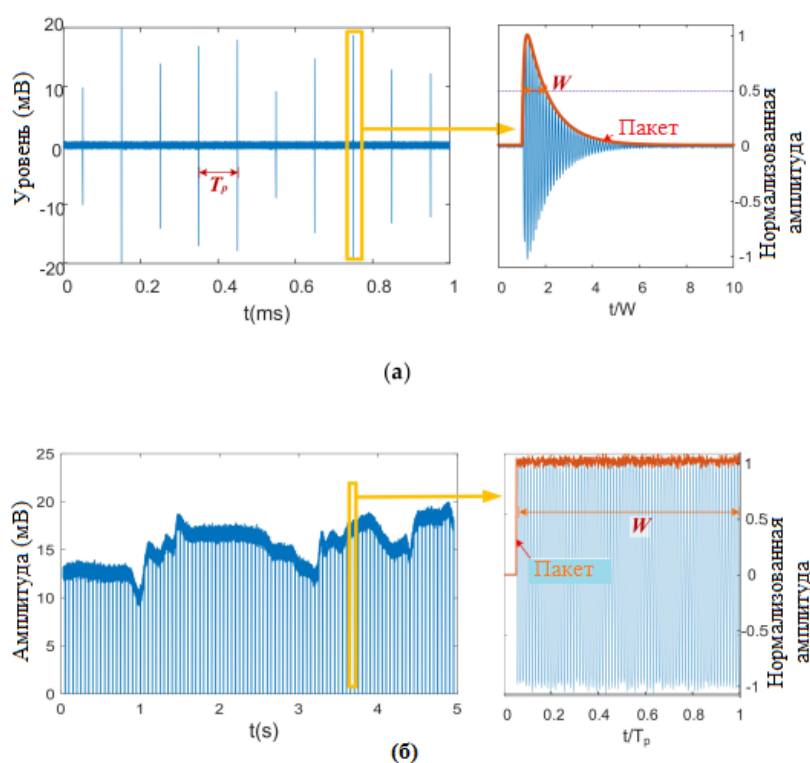


Рис. 2. Измерение помех на месте в диапазоне глобальной системы мобильной связи-железная дорога (GSM-R) во временной области, (а) помехи от излучения пантографа с данными и (б) помехи от сигнала GSM в соседнем канале с данными

Нарушение искрения пантографа, показанное на рис. 2, а) является наиболее типичной помехой, создаваемой в системе HSR, и имеет широкий частотный диапазон до нескольких ГГц, покрывающий большинство рабочих диапазонов RSTT. Кроме того, бортовая антенна некоторых сетей RSTT, таких как GSM-R и LTE-R, обычно закрепляется на крыше поезда рядом с контактной сетью, что делает ее подверженной излучению от скользящего контакта между пантографом и контактной сетью. Также сигнал от общественной базовой станции вблизи железной дороги представляет собой критическую внешнюю помеху, когда он использует соседнюю полосу частот железнодорожной радиослужбы, как показано на рис. 2, б). Как правило, как переходные, так и постоянные возмущения можно смоделировать как серию импульсов с повторяющимся циклом T_p , амплитудой импуль-

са.

са A_i и длительностью импульса W_i во временной области, выраженной как

$$n(t) = n_w(t) + \sum_{i=0}^{\infty} A_i p\left(\frac{t - iT_p}{W_i}\right), \quad (1)$$

где $n_w(t)$ относится к фоновому аддитивному белому гауссовскому шуму (AWGN), а $p(t)$ является функцией единичного прямоугольного импульса, которая относится к одиночному пакету. Как и в (1), как импульсные, так и неимпульсные возмущения могут характеризоваться статистикой амплитуды и шириной импульса. Поэтому статистические параметры APD и PDD совместно используются для описания и характеристики помех в рабочих полосах частот RSTT.

Как правило, влияние помех на RSTT зависит как от MCS передаваемого сигнала, так

и от статистических характеристик принимаемой помехи. Учитывая разнообразие помех, а также сигналов RSTT, особенно с коэффициентом кодирования кодов FEC, влияние на радиопередачу сильно различается [3]. Поэтому требуется универсальный метод для оценки качества передачи в реальном времени в такой сложной ситуации.

Следовательно, предлагается динамическая модель качества для достижения показателя качества передачи (MI) на основе взаимного информационного канала (CQI) при изменяющихся во времени помехах, как показано на рис. 3, где приняты обозначения BLER - частота ошибок блока, PDD - распределение длительности импульса, RBIR - скорость приема битовой информации. Во-первых, показатель производительности каждого отдельного блока кода получается путем отображения информации, основанной на статистических характеристиках EMI.

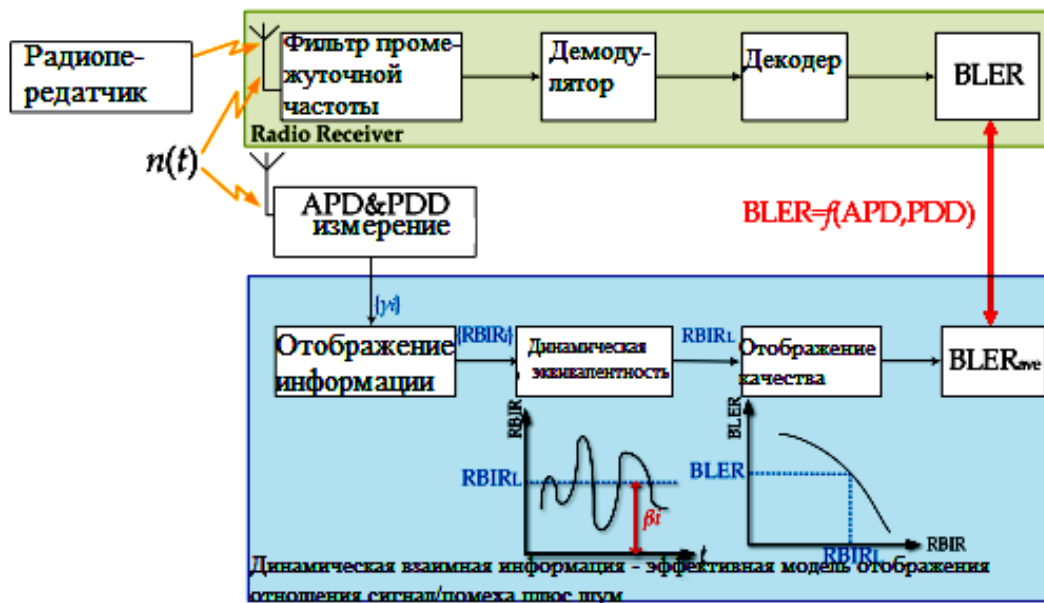


Рис. 3. Пример схемы контроля качества при воздействии изменяющихся во времени возмущений

Важно отметить, что APD и PDD и $n(t)$ должны измеряться с использованием эквивалентной полосы пропускания железнодорожной беспроводной службы, подлежащей мониторингу. В соответствии с алгоритмом MI-ESM скорость принятой битовой информации (RBIR) определяется как CQI для указания качества передачи. Затем предлагается новый показатель, долгосрочный эффективный RBIR ($RBIR_L$), для отражения общей производительности передачи в присутствии динамиче-

ского возмущения. Чтобы объединить RBIR каждого блока в изменяющихся во времени ситуациях, $RBIR_L$ достигается взвешенной суммой ряда RBIR. Следовательно, $RBIR_L$ является эквивалентом CQI RBIR в стабильном канале. Поскольку $RBIR_L$ можно сопоставить со средним значением BLER ($BLER_{ave}$) через справочную таблицу в канале AWGN, качество радиопередачи, таким образом, оценивается по значению $RBIR_L$.

Отображение информации о кодированной радиопередаче в условиях изменяющихся во времени помех

Предполагается, что информационный поток закодирован некоторыми кодами FEC в блоки длиной Q символов. Учитывая переданное с конечным алфавитом соединение

$Q = \{q_i\} (i = 1, 2, \dots, M)$, символы Q выбираются в соответствии с равномерным распределением вероятностей. Чтобы оценить влияние помех на один блок кода, модель качества, основанная на взаимной информации, показана на рис. 4, где блок SI обозначает символ взаимной информации.

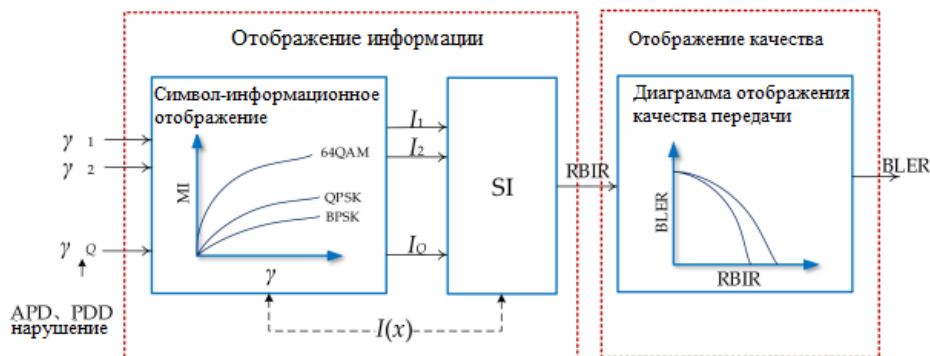


Рис. 4. Пример модели качества, основанной на MI

Для RSTT каждый символ полученного сигнала может быть выражен как

$$y = h x + n, \quad (2)$$

где h — коэффициент усиления канала,
 x — передаваемый сигнал,
 n — стохастическая помеха в среде HSR.
 Взаимная информация символа (SI) каждого символа определяется как

$$SI = I(X; Y) = \sum_i p(y | q_i) P(q_i) \log_2 \frac{p(y | q_i)}{p(y)}, \quad (3)$$

где q_i представляет i -й ($i = 1, 2, \dots, M$) символ в передаваемом множестве Q .

Для расчета SI передаваемого символа в первую очередь необходимо определить соответствующий SINR этого символа. Для современных кодов FEC в сочетании с технологией перемежения, таких как турбокоды и коды с низкой плотностью контроля четности (LDPC), обычно разумно предположить равномерное распределение ошибок в кодовом блоке [4]. Для решения проблемы перемежающихся кодов в негауссовском канале используется модель канала с блочным замиранием. Канал блочного замирания представляет собой канал без памяти со случайным усилением канала или случайной помехой, которая является постоянной для блока символов, а затем изменяется на новое независимое значение от одного блока к другому [5]. Это означает,

что SINR каждого символа в этом блоке остается неизменным, несмотря на пакетный шум. Следовательно, SINR эффективного символа принятого символа q_i равен

$$\gamma_i = \frac{|q_i|^2}{\sigma_w^2 + \sigma_A^2}, \quad (4)$$

где σ_w и σ_A относятся к стандартному отклонению AWGN и импульсной помехи соответственно. Поскольку фоновый AWGN относительно слаб по сравнению с импульсами, эффективную мощность шума этого символа можно оценить по средней мощности шума в течение одного кодового блока

$$\sigma_e^2 = \sigma_w^2 + \sigma_A^2 \approx \int_0^\infty n^2 dAPD_n(n), \quad (5)$$

где n ограничено шумом в пределах длины одного кодового блока. Для упрощения вычислений информация о сигнале при передаче символа q_i приблизительно выглядит как

$$SI_i(\sigma_e, m) = -\log_2 \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M \exp \left(-\frac{d_{ij}^2 / \sigma_e^2}{3 - \exp(-d_{ij}^2 / (4\sigma_e^2))} \right), \quad (6)$$

где m — количество информационных битов, составляющих i -й символ, а d_{ij} — евклидова мера между i -й и j -й сигнальными точками в созвездии Q .

Кроме того, скорость приема битовой информации (RBIR) вычисляется из значения SI символов, составляющих кодовый блок [6], которое получается из SINR γ_k в течение одного блока. Таким образом, RBIR задается как

$$RBIR = \frac{\sum_{k=1}^Q SI(\gamma_k)}{\sum_{k=1}^Q m_k} = \frac{E[SI_k]}{E[m_k]}, \quad (7)$$

где SI_k – взаимная информация k -го ($k = 1, 2, \dots, Q$) передаваемого символа в блоке.

Воздействие на системы кодированной радиосвязи при импульсных помехах

Каждое значение RBIR (σ_e) принятого сигнала и соответствующая ему вероятность анализируются на основе статистических характеристик возмущений, и $RBIR_L$. Таким образом, частота ошибок блока (BLER) бортового приемника достигается как показатель производительности радиопередачи через $RBIR_L$. Что касается импульсных возмущений, влияющих на RSTT, то ширина в основном зависит от свойств источника во временной области, а на амплитуду также влияет путь связи. В результате амплитуда обычно распределяется произвольно без особых правил, а ширина — дискретно. Следовательно, всплески можно сгруппировать по ширине импульса $\{W_i\}$ ($i = 0, 1, \dots, N_w$), где $W_i = 0$ относится к AWGN, а амплитуда импульсов в каждой группе распределена произвольно. Учитывая запас времени θ , вероятность каждого пакета, ширина импульса которого $W \in [W_i - \theta, W_i + \theta]$ определяется как

$$p_i = \Pr(W_i - \theta < W < W_i + \theta) = \int_{W_i - \theta}^{W_i + \theta} \int_0^\infty dPDD(r, \tau) dAPD(r), \quad (8)$$

и соответствующий APD каждого набора пакетов

$$APD_{w_i}(r) = \frac{\int_r^\infty \int_{W_i - \theta}^{W_i + \theta} dPDD(r, \tau) dAPD(r)}{\int_0^\infty \int_{W_i - \theta}^{W_i + \theta} dPDD(r, \tau) dAPD(r)}. \quad (9)$$

Поскольку сумма мощности помех в одном кодовом блоке определяет фактическую

ошибку передачи, а относительное положение пакета практически не влияет на способность исправления ошибок кодирования FEC, длительность и амплитуда импульса в каждом кодовом блоке при $n(t)$ следует проанализировать, чтобы получить значение RBIR. Что касается RBIR блоков, содержащих импульсные помехи, то решающими факторами являются количество, ширина и амплитуда всплесков в одном блоке. Чтобы отличить ситуацию, когда затронутые блоки содержат разное количество пакетов, следует учитывать соотношение между T_p и длиной кодового блока Q . Таким образом, расчет $RBIR_L$ рассматривается в следующих трех случаях.

1. Случай $T_p \approx Q$

Как показано на рис. 5, где ЕМІ обозначает электромагнитные помехи, каждый кодовый блок содержит один пакет, и доля блоков, содержащих пакет с шириной импульса W_i , составляет

$$a_i = \begin{cases} \frac{p_i}{1 - p_0}, & i = 1, 2, \dots, N_w \\ 0, & i = 0 \end{cases}. \quad (10)$$

Эффективный шум блоков, содержащих пакет с длительностью импульса W_i и амплитудой r , равен

$$\sigma_e(W_i, r) = \sqrt{\frac{Q - W_i}{Q} \int_0^\infty r^2 dAPD_{w_0}(r) + \frac{W_i}{Q} r^2}. \quad (11)$$

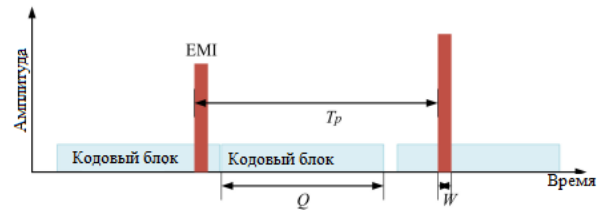


Рис. 5. Пояснение к случаю, когда повторяющийся цикл T_p почти равен длине блока кода Q

2. Случай $T_p \gg Q$

Как показано на рис. 6, существует вероятность того, что на некоторые блоки импульсы не повлияют, и их вероятность равна α_0 , при этом мощность шума будет $\sigma_0^2 = \int_0^\infty r^2 dAPD_{w_0}(r)$. Другие кодовые блоки содержат только один пакет, поэтому отношение блоков, содержащих пакет шириной W_i , равно α_i , выраженному как

$$\alpha_i = \begin{cases} \frac{Qp_i}{T_p(1-p_0)} & , i = 1, 2, \dots, N_W \\ 1 - \frac{Q}{T_p} & , i = 0 \end{cases}, \quad (12)$$

и соответствующее эффективное значение шума совпадает с (11).



Рис. 6. Пример случая, когда повторяющийся цикл T_p намного больше длины блока кода Q

3. Случай $T_p \ll Q$

Как показано на рис. 7, количество пакетов в одном кодовом блоке почти $K = Q / T_p$, где x обозначает наименьшее целое число, большее или равное x . Предполагается, что ширина и амплитуда всплесков в одном блоке одинаковы. Следовательно, отношение блоков, содержащих всплески с шириной импульса W_i , совпадает с (12), а эффективный шум блоков, содержащих всплески с длительностью импульса W_i и амплитудой r , равен

$$\sigma_e(KW_i, r) = \sqrt{\frac{Q - KW_i}{Q} \int_0^\infty r^2 dAPD_{w_0}(r) + \frac{KW_i}{Q} r^2}. \quad (13)$$

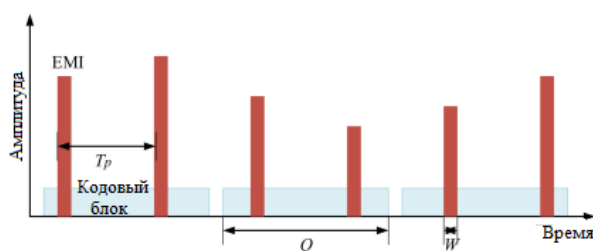


Рис. 7. Пример случая, когда повторяющийся цикл T_p намного меньше длины блока кода Q

Заключение

Поскольку электромагнитные помехи представляют собой серьезную угрозу надежности систем железнодорожной связи, в данной статье предложена новая методика кон-

троля работы RSTT в режиме реального времени при нарушениях в среде HSR. Основываясь на совместных статистических характеристиках импульсных помех, предлагается динамическая модель MI для прогнозирования ухудшения RSTT с использованием кодов FEC. Эта модель преобразует совместные статистические характеристики во временной области, т.е. APD и PDD возмущений, в показатель MI, с помощью которого получается среднее значение BLER. Согласно результатам моделирования, метод, основанный на совместных статистических характеристиках, действителен при различных помехах, даже если они имеют одинаковое распределение амплитуды, а максимальные оценочные ошибки SINR при 1 % BLER не превышают 1,2 дБ. Иными словами, этот метод эффективен в более сложных ситуациях, когда на передаваемые сигналы с различными MCSS воздействуют различные помехи. Более того, поскольку этот метод не требует предварительной статистической информации о помехах, он потенциально может быть применен для оценки эффективности помех в более практических приложениях, таких как наблюдение в режиме реального времени, анализ рисков и раннее предупреждение в будущем.

Литература

1. Geng, X.; Wen, Y.; Zhang, J. An APD-Based Evaluation on the Effect of Transient Disturbance over Digital Transmission. Chin. J. Electron. 2020. pp. 57–65.
2. Стохастическое итеративное декодирование на факторных графах / А.В. Башкиров, В.М. Питолин, И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 122-126.
3. Низкоплотностные коды малой мощности декодирования / А.В. Башкиров, А.В. Муратов, М.В. Хорошайлова [и др.] // Радиотехника. 2016. № 5. С. 32-37.
4. Свиридова И.В. Сравнение сложности аппаратной реализации и исправляющей способности стохастических декодеров с памятью отслеживания прогнозов (TFM) и внешней памятью (ЕМ) // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 120-124.
5. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.
6. Хорошайлова М.В. Разработка и реализация симметричного самоорганизующегося нейросетевого декодера // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 3. С. 60-64.

Информация об авторах

Свиридова Ирина Владимировна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Хорошайлов Роман Николаевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: hrn3001@mail.ru

Лялин Дмитрий Витальевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: dmitrylialin95@gmail.com

METHOD FOR CONTROL OF THE EFFECT OF PULSED INTERFERENCE ON A RAILWAY RADIO TRANSMISSION SYSTEM

I.V. Sviridova, R.N. Horoshaylov, D.V. Lyalin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: train-to-track radio communication systems transmit the information necessary for train operation between on-board radio equipment and the associated radio infrastructure along the track, such as train control, voice dispatch, commands, operational information, and monitoring data. In high-speed rail environments, electromagnetic interference (EMI) poses a serious threat to radio communication systems between the train and the tracks and can lead to critical safety issues for rail vehicles and even passengers. Given the complex development scenario of high-speed rail, it is important to monitor the impact of interference to ensure the quality of the Radio Communication System between the train and the tracks. On the one hand, radio communication systems between the train and the tracks operate in a complex electromagnetic environment where temporary interference coexists constantly and changes dramatically during the movement of the train. On the other hand, various radio technologies have been used for railway applications, including forward error correction codes to protect against electromagnetic interference. Thus, this article proposes a new approach to assessing the impact on radio transmission, based on the joint statistical characteristics of time-varying electromagnetic interference. This approach uses a dynamic mapping model of the effective signal-to-interference plus noise ratio to establish a relationship between airborne radio block error performance and overall interference statistics using a mutual information metric. Simulation of radio transmission using turbo coding and low-density parity-check coding under various interferences shows that this approach is effective for estimating the degradation of the transmitted signal in direct error correction coding due to electromagnetic interference with different characteristics

Key words: electromagnetic effect, amplitude probability distribution, pulse duration distribution, radio transmission between train and tracks

References

1. Geng X., Wen, Y., Zhang J. "An APD-Based Evaluation on the Effect of Transient Disturbance over Digital Transmission", *Chin. J. Electron*, 2020, pp. 57–65
2. Bashkirov A.V., Pitolin V.M., Sviridova I.V., Khoroshaylova M.V. "Stochastic iterative decoding on factor graphs", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 122–126.
3. Bashkirov A.V., Muratov A.V., Khoroshaylova M.V. et al. "Low-density codes of low decoding power", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2016, no. 5, pp. 32–37.
4. Sviridova, I.V. "Comparison of difficulty of hardware implementation and corrective capacity of stochastic decoders with TFM and EM memory", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 120–124.
5. Horoshaylova M.V. "FPGA-based channel coding architecture for a 5G wireless network using high-level synthesis", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99–105.
6. Horoshaylova M.V. "Development and implementation of a symmetrical self-organizing neural network decoder", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 60–64.

Submitted 08.06.2023; revised 14.08.2023

Information about the authors

Irina V. Sviridova – Senior Lecturer, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: ri-ss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>

Roman N. Horoshaylov – Master's student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: hrn3001@mail.ru

Dmitry V. Lyalin – Student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: dmitrylialin95@gmail.com

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.36622/VSTU.2023.19.4.016

УДК 621.791

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОХЛАЖДАЮЩЕЙ СИСТЕМЫ СТОЛА УСТРОЙСТВА ДЛЯ АДДИТИВНОГО ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ПЛАЗМЕННОЙ ДУГОЙ В СРЕДЕ ДИНАМИЧЕСКОГО ВАКУУМА

В.В. Куц¹, А.Н. Гречухин¹, Д.А. Павлов¹, И.А. Чернышев²

¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

²Региональный центр инжиниринга, г. Курск, Россия

Аннотация: рассмотрены вопросы проектирования системы охлаждения рабочего стола устройства для аддитивного формообразования изделий плазменной дугой в среде динамического вакуума. Обозначены условия работоспособности системы охлаждения по температуре теплоносителя, температуре рабочего стола и объему теплоносителя в системе охлаждения. Построены математические зависимости температуры теплоносителя и температуры рабочего стола устройства от конструктивных параметров системы охлаждения рабочего стола устройства для аддитивного формообразования плазменной дугой. Проведена серия экспериментов методом компьютерного моделирования при помощи модуля Flow Simulation системы моделирования SolidWorks. Обработка результатов экспериментов, построение уравнений для расчета температуры теплоносителя и температуры рабочего стола были выполнены с применением программы Statistica. На основе полученных данных определены рациональные конструктивные параметры проектируемой системы охлаждения рабочего стола, обеспечивающие работоспособность устройства для аддитивного формообразования изделий плазменной дугой в среде динамического вакуума: количество каналов охлаждения – 4, диаметр одного канала охлаждения – 8 мм. Сочетание таких параметров обеспечит максимальную температуру теплоносителя на уровне 34 °С, максимальную температуру на обратной поверхности рабочего стола на уровне 300 °С, что соответствует условиям работоспособности системы охлаждения рабочего стола устройства

Ключевые слова: аддитивные технологии, формообразование, плазменная наплавка, метод конечных объемов

Введение

Аддитивные технологии (Additive Manufacturing) — метод создания объемных объектов посредством послойного наращивания материала. В настоящее время аддитивные технологии стремительно набирают популярность и становятся предметом изучения по всему миру. Поскольку процесс послойного создания изделий в значительной мере отличается от традиционных методов производства, то это дает следующие преимущества при использовании аддитивных технологий: возможность изготовления изделий со сложной геометрией, экономия материала при производстве, улучшенные свойства конечных деталей [1-3, 12, 13].

Среди большого многообразия способов аддитивного формообразования особое место занимают технологии, использующие, либо плазменную дугу, поскольку высокая температура плазменной дуги позволяет выполнять построение деталей из металлов с высокой температурой плавления. Сочетание таких источников энергии с

мехатронной системой Пруша с числовым программным управлением, позволяют производить послойное построение изделий с высокой производительностью.

Создание динамического вакуума способствует удалению продуктов, образующихся в результате расплавления материала построения, формируя при этом достаточный уровень защиты ванны расплава от действия составляющих элементов воздуха, путем его замещения инертным газом, исключая процессы окисления. Это позволяет получить высокое качество изготавливаемых изделий [4-6, 11].

Для создания динамического вакуума применяют специальные устройства – вакуумные камеры различного объема и конфигурации. Представлена конструкция вакуумной камеры цилиндрической конфигурации, созданная на базе Юго-Западного государственного университета (рис. 1). Вакуумная камера содержит отверстия для выгрузки готовых изделий, герметичные вводы для подачи инертного газа, присадочного материала, а также кабелей управления мехатронной системой.



Рис. 1. Общий вид вакуумной камеры

Мехатронная система (рис. 2), которая расположена внутри объема вакуумной камеры состоит из рамы 1, ходовых винтов 2, шаговых электродвигателей 3, рабочего стола 4 и кронштейна для крепления оборудования 5. Рабочий стол, на котором располагается деталь в процессе аддитивного формообразования, представляет собой плиту с размерами 100x100x20 мм с каналами, по которым циркулирует охлаждающая жидкость. Управление мехатронной системой осуществляется программой Mach3.

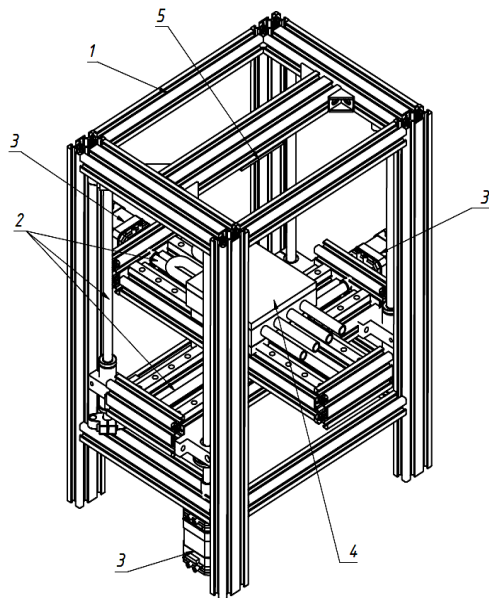


Рис. 2. Общий вид мехатронной системы: 1 – рама; 2 – ходовые винты; 3 – электродвигатели; 4 – рабочий стол; 5 – кронштейн для крепления оборудования

Процесс аддитивного формообразования с помощью плазменной дуги сопровождается значительным выделением тепловой энергии, поэтому с целью исключения влияния высокотем-

пературного воздействия на элементы мехатронной системы, прежде всего рабочего стола, для послыонного построения в условиях динамического вакуума, необходимо снабдить конструкцию рабочего стола системой охлаждения, применение которой обеспечит достаточный теплоотвод [14-20]. Система охлаждения рабочего стола включает в себя рабочий стол, внутри которого расположены каналы, по которым перемещается теплоноситель – дистиллированная вода, а также устройство охлаждения и циркуляции (рис. 3).

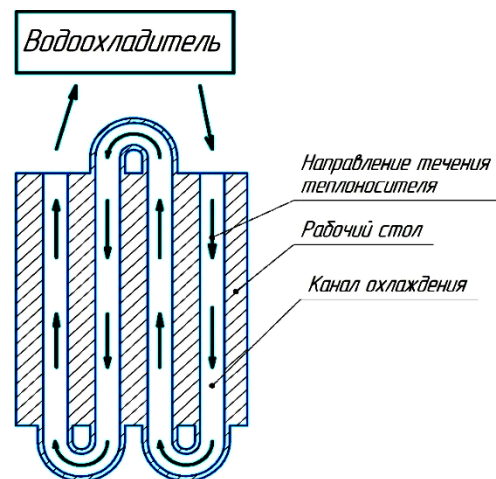


Рис. 3. Схема охлаждающей системы рабочего стола

Постановка задачи

Для обеспечения работоспособности системы охлаждения рабочего стола, необходимо обеспечить следующие условия: температура теплоносителя не должна превышать значение температуры кипения воды 95 °С; температура рабочего стола не должна превышать температуру плавления материала, из которого изготовлены элементы, на которых закреплен рабочий стол, в частности, температуру плавления алюминиевого сплава, порядка 660 °С; объем теплоносителя в системе охлаждения должен быть минимальным.

Необходимо построить модель нагрева и охлаждения рабочего стола концентрированным источником энергии-плазменной дугой, установить зависимость температуры охлаждающей жидкости и рабочего стола от ее параметров, определить их рациональные значения.

Методы выполнения исследования

Для решения задач была проведена серия экспериментов методом компьютерного модели-

рования. Исследование проводилось при помощи модуля Flow Simulation системы SolidWorks. Данный модуль используется для моделирования воздушных и жидкостных потоков методом конечных объемов (FMV). К преимуществам метода FMV относят: легкость решения задач со сложной геометрией, высокая скорость расчета, сохранение основных величин по всей области эксперимента.

В качестве исследуемых параметров системы охлаждения рабочего стола были обозначены диаметр охлаждающего канала и количество каналов рабочего стола. При моделировании эксперимента в Flow Simulation были заданы следующие начальные условия (табл. 1).

Таблица 1
Начальные условия проведения эксперимента

Наименование условия	Значение
Тип решаемой задачи	Внутренняя
Теплопроводность в твердых телах	Включено
Действие гравитационной силы	Включено
Температура теплового источника	3000 °C
Диаметр зоны теплового воздействия	10 мм
Начальная температура воды	20 °C
Начальная температура твердых тел	20 °C
Объемный расход воды при охлаждении	8,5 л/мин

Так как моделировалась среда динамического вакуума, то теплообмен с окружающей средой отсутствовал, была задана теплопроводность в телах и учтены гравитационные силы. Для по-

строения компьютерной модели была создана подобласть течения жидкости, со следующим граничным условием - объемный расход на входе 8.5 л/мин, что соответствует заявленной характеристике водоохладителя WRA-300S по максимальному объему охлаждения жидкости.

Характеристики поверхностного теплового источника (температура 3000 °C и диаметр 10 мм) соответствуют параметрам плазменной дуги. После генерации расчетной сетки и запуска расчета была получена траектория потока жидкости (рис. 4).

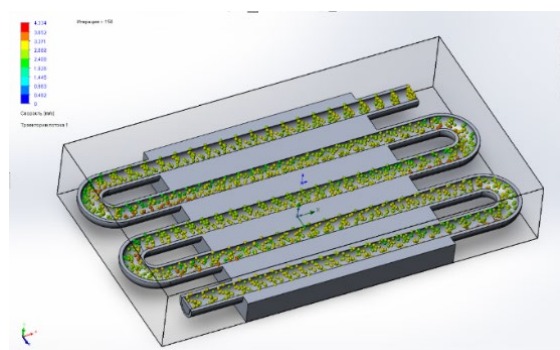


Рис. 4. Результат моделирования

Обработка результатов моделирования

При выполнении эксперимента с различными параметрами рабочего стола были получены следующие результаты [7-10] (табл. 2).

Таблица 2

План и результаты эксперимента

Изменяемые параметры охлаждающей системы		Результаты проведенных экспериментов:							
Кол-во каналов	Диаметр канала, мм	Температура воды на выходе, °C			Температура рабочего стола, °C			Среднеквадратическое отклонение, S_T , °C	
		max	min	среднее	max	min	среднее	воды	стола
4	8	32,442	33,84	32,98	291,32	293,29	292,166	0,49079	0,73003
4	10	33,077	34,997	33,7	285,57	287,41	286,48	0,692	0,65034
4	12	33,862	36,277	34,62	278,52	280,88	279,8	0,87660	0,81536

Окончание табл.2

Изменяемые параметры охлаждающей системы		Результаты проведенных экспериментов							
Кол-во каналов	Диаметр канала, мм	Кол-во каналов			Диаметр канала, мм			Кол-во каналов	
		max	min	среднее	max	min	среднее	воды	стола
5	8	35,71	37,316	36,39	266,03	268,65	267,39	0,53348	0,94008
5	10	37,225	38,528	37,71	260,42	262,26	261,71	0,45166	0,67503
5	12	38,112	39,645	38,69	253,12	255,8	254,724	0,58922	0,98138
6	8	40,474	41,493	40,97	241,55	243,43	242,394	0,36484	0,64927
6	10	41,208	42,872	41,8	234,71	236,41	235,682	0,62399	0,71495
6	12	42,34	43,448	42,98	229,49	232,82	230,772	0,43113	1,16870

Оценки параметров (Таблица данных1) Сигма-ограниченная параметризация											
Эффект	Т Парам.	Т Ст. Ош.	Т t	Т p	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт	Т Бета (?)	Т Ст.Ош.?	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт	
Св.член	2,483061	0,044230	56,14031	0,000000	2,393802	2,572320					
n	0,531971	0,015823	33,62024	0,000000	0,500039	0,563903	0,955289	0,028414	0,897947	1,012631	
d	0,128820	0,015823	8,14137	0,000000	0,096888	0,160752	0,231330	0,028414	0,173988	0,288672	

SS модели и SS остатков (Таблица данных1)											
Зависим. Перемен.	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
T	0,982899	0,966091	0,964476	0,370645	2	0,185322	0,013009	42	0,000310	598,3013	0,00

Рис. 5. Оценка уравнения регрессии натурального логарифма температуры охлаждающей жидкости

Уравнение (рис. 5), описывающее зависимость натурального логарифма температуры воды от исследуемых параметров, имеет вид:

$$\ln(T_{\text{воды}}) = 2,483061 + 0,531971 \ln(n) + 0,12882 \ln(d). \quad (1)$$

В результате преобразования уравнение регрессии, показывающее зависимость температуры воды в системе от количества охлаждающих каналов и их диаметра внутри вакуумной камеры, при аддитивном формообразовании плазменной дугой примет вид:

вании плазменной дугой примет вид:

$$T_{\text{воды}} = 11,98n^{0,532}d^{0,129}, \quad (2)$$

где n – количество каналов охлаждающей системы;

d – диаметр охлаждающего канала (мм).

На основании полученного уравнения были построены графики, отражающие влияние параметров системы охлаждения на температуру теплоносителя (рис. 6, рис. 7).

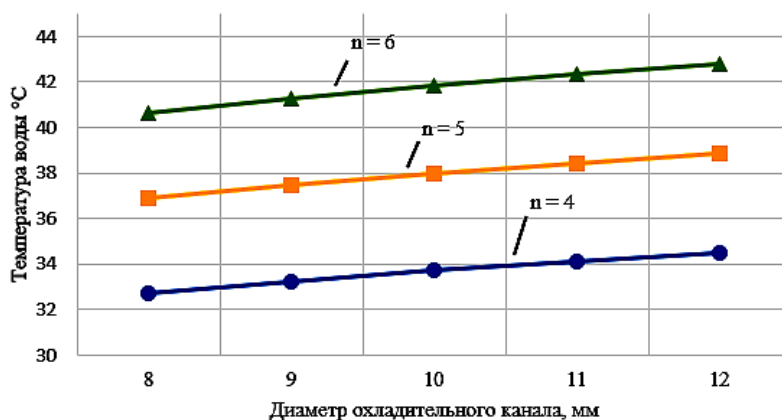


Рис. 6. Графики зависимости температуры воды от диаметра охлаждающего канала

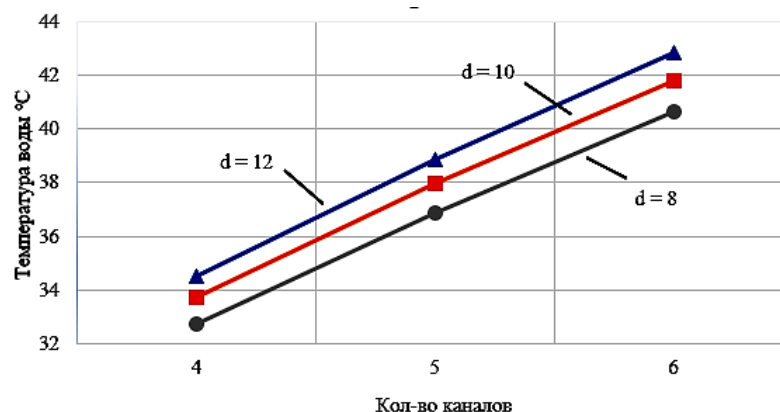


Рис. 7. Графики зависимости температуры воды от количества каналов рабочего стола

Исходя из полученных графиков зависимости температуры охлаждающей жидкости от количества каналов рабочего стола и их диаметра можно сделать вывод, что каждый канал рабочего стола повышает температуру воды в

среднем на 4 °С, а при увеличении диаметра канала на 1 мм повышается температура воды в среднем на 0,5 °С. Результаты определения уравнения регрессии по определению температуры рабочего стола представлены на рис. 8.

	Оценки параметров (Таблица65) Сигма-ограниченная параметризация									
Эффект	Т Парам.	Т Ст. Ош.	Т t	Т p	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт	Т Бета (?)	Т Ст.Ош.?	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт
Св.член	6,576406	0,020600	319,2488	0,00	6,534834	6,617978				
n	-0,469811	0,007369	-63,7513	0,00	-0,484683	-0,454939	-0,966254	0,015157	-0,996841	-0,935667
d	-0,115782	0,007369	-15,7111	0,00	-0,130654	-0,100910	-0,238128	0,015157	-0,268715	-0,207540

	SS модели и SS остатков (Таблица65)										
Зависим. Перемен.	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
Т	0,995164	0,990352	0,989892	0,289658	2	0,144829	0,002822	42	0,000067	2155,534	0,00

Рис. 8. Оценка уравнения регрессии по определению логарифмированных значений температуры охлаждающей жидкости

Уравнение, описывающее зависимость логарифмированных значений температуры рабочего стола от диаметра и количества в охлаждающих каналов имеет вид:

$$\ln(T_{\text{стола}}) = 6,576406 - 0,469811 \ln(n) - 0,115782 \ln(d). \quad (3)$$

В результате преобразования, уравнение регрессии, показывающее зависимость температуры рабочего стола в системе от диаметра и количества каналов рабочего стола, внутри

вакуумной камеры, при аддитивном формообразовании плазменной дугой примет вид:

$$T_{\text{стола}} = \frac{717,95}{n^{0,47} d^{0,115}}, \quad (4)$$

где n – количество каналов охлаждающей системы;

d – диаметр охлаждающего канала.

На основании полученного уравнения были построены графики, отражающие влияние параметров системы охлаждения на температуру рабочего стола (рис. 9, рис. 10).

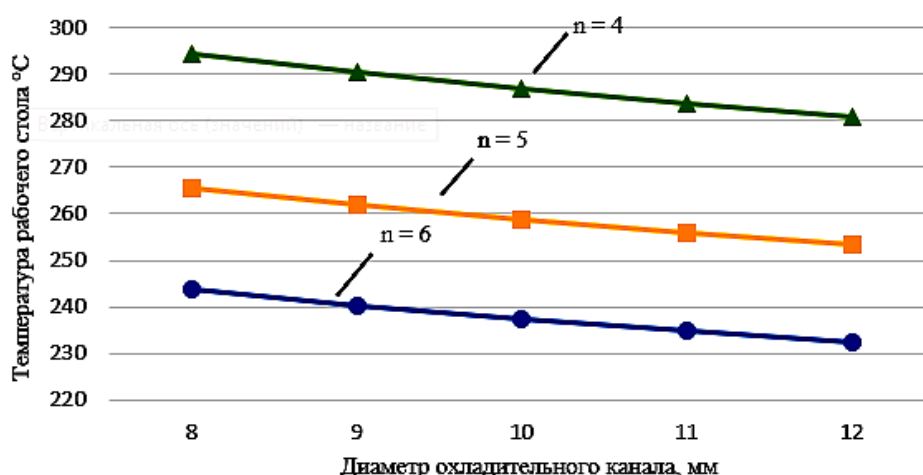


Рис. 9. Графики зависимости температуры рабочего стола от диаметра охлаждающего канала

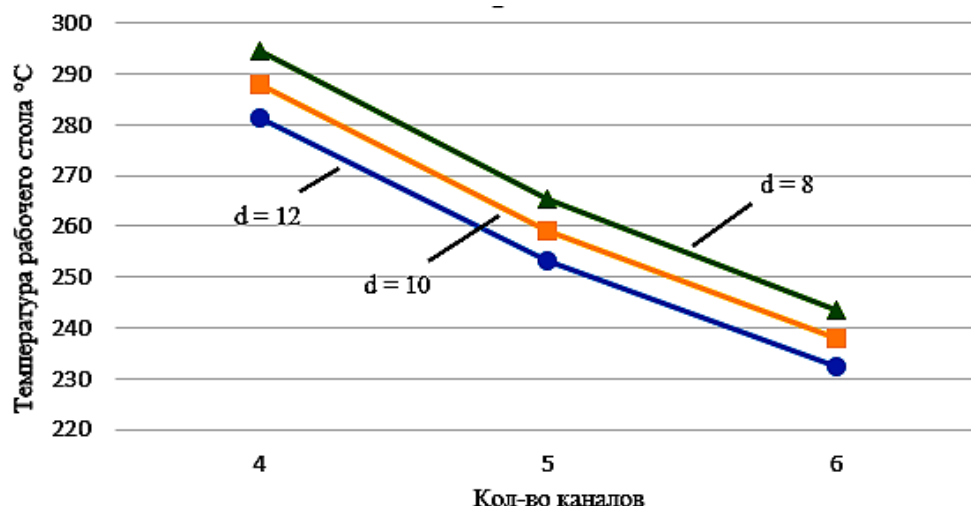


Рис. 10. Графики зависимости температуры рабочего стола от количества каналов рабочего стола

Исходя из полученных графиков зависимости температуры рабочего стола количества каналов охлаждения можно сделать вывод, что с каждым каналом температура стола понижается в среднем на 28 °С, а при увеличении диаметра канала на 1мм температура стола понижается в среднем на 3,3 °С.

Закключение

Система охлаждения рабочего стола является одним из контуров общей системы охлаждения устройства для аддитивного формообразования изделий плазменной дугой в среде динамического вакуума, другими контурами которой является контуры охлаждения шаговых электродвигателей, контур охлаждения электрической проводки. Циркуляцию и охлаждение теплоносителя во всех контурах проектируемой системы охлаждения обеспечивает устройство охлаждения, которое имеет ограниченную производительность. Поэтому при расчете конструктивных параметров системы охлаждения рабочего стола устройства необходимо обеспечить соблюдение условия минимума объема теплоносителя.

Таким образом, проектируемая система охлаждения рабочего стола устройства для аддитивного формообразования плазменной дугой в среде динамического вакуума будет включать в себя рабочий стол с четырьмя каналами охлаждения диаметром восемь миллиметров каждый. Сочетание таких параметров обеспечит максимальную температуру теплоносителя на уровне 34 °С, максимальную температуру на обратной поверхности рабочего стола на уровне 300 °С, что соответствует условиям

работоспособности системы охлаждения рабочего стола устройства.

Литература

1. Трансфер аддитивных технологий: промышленность Курской области: монография / Л.М. Червяков, Н.А. Бычкова, Н.В. Елисеева [и др.] Курск: ЗАО «Университетская книга», 2016. 168 с.
2. Расширение технологических возможностей методов аддитивного формообразования с применением механизмов параллельно-последовательной структуры / А.Н. Гречухин, В.В. Куц, А.В. Олешицкий, М.С. Разумов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 6. С. 34-44.
3. Кругляков Ю.А. Гречухин А.Н. Исследование технологии формообразования изделий плазменной дугой в среде динамического вакуума: 2-я Международная научная конференция перспективных разработок молодых ученых. 2021. С.113-117.
4. Физика и техника низкотемпературной плазмы / С.В. Дресвин [и др.]. М.: Атомиздат, 1972. 352 с.
5. Лыков А.В. Теория теплопроводности. М.: Высшая школа, 1967. 599 с.
6. Зарапин А.Ю., Чиченев Н.А. Технологическое вакуумное оборудование. В 2-х частях. М.: Издательский дом «Руда и металлы», 2001. 416 с.
7. Макаров Р.И. Основы планирования и обработки экспериментальных данных, Владимир: ВлГУ, 2014. 37 с.
8. Зленко М.А., Нагайцев М.В., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М.: ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.
9. Куц В.В., Разумов М.С. Обработка результатов эксперимента при равномерном дублировании: методические указания по проведению практической и самостоятельной работы. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2018. 14 с.
10. Технология изготовления деталей в автоматизированном производстве / А.М. Рудской, В.В. Куц, М.С. Разумов, А.Н. Гречухин, А.А. Горюхов. Курск, 2019. 265 с.
11. Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии. Руководство для инженеров. СПб.: ПТУ. 2008. 406 с.

12. Сидоров А.И. Восстановление деталей машин напылением и наплавкой. М.: Машиностроение, 1987. 189 с.

13. Гречухин А.Н., Куц В.В., Разумов М.С. Управление пространственной ориентацией узлов робота в процессе аддитивного формообразования изделий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 122-129.

14. Баташов С.И., Людаговский А.В., Полухин В.А. Расчёт температурных полей в зависимости от толщины наплавляемого слоя и подложки при наплавке // Современные материалы, техника и технологии. 2018. № 5. С. 89-94.

15. Построение математической модели температурного поля при наплавке / А.В. Людаговский, А.А. Локтев, В.А. Полухин, В.С. Соколов, К.Д. Степанов // Сборник вопросов прикладной математики и проблема взаимодействия

твердых тел с жидкой и газовой средой. М.: ИПМех РАН, 2017. С. 52-55.

16. Спиридонов Н.В. Кобяков О.С., Куприянов И.Л. Плазменные и лазерные методы упрочнения деталей машин. Мн.: Высшая школа, 1988. 155 с.

17. Теоретические исследования температурных полей при воздействии плазменной струи по результатам экспериментальных данных / А.И. Веремейчик, М.И. Сазонов, В.М. Хвисевич, И.Г. Томашев // Теоретическая и прикладная механика. 2017. Вып. 32. С. 94-99.

18. Симонян Л.М., Кац Я.Л. Измерение температуры анодного пятна плазменно-дугового разряда // Электротехника. 2018. № 8. С. 14-20.

19. Малаховский В.А. Плазменная сварка. М.: Высшая школа, 1987. 80 с.

20. Физика и техника низкотемпературной плазмы / С. В. Дресвин [и др.]. М.: Атомиздат, 1972. 35 с.

Поступила 25.06.2023; принята к публикации 21.08.2023

Информация об авторах

Куц Вадим Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел.: +7 (4712) 22-26-69, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Гречухин Александр Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры машиностроительных технологий и оборудования Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел.: +7 (4712) 22-26-69, e-mail: Agrechuhin@mail.ru

Павлов Дмитрий Анатольевич – магистрант, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел.: +7 (4712) 22-26-69, e-mail: dpavlov2021@mail.ru

Чернышев Илья Андреевич – руководитель, Региональный центр инжиниринга (305000, Россия, г. Курск, ул. Максима Горького, 34), тел. +7 (4712) 70-33-77, e-mail: rci46@mail.ru

RESEARCH OF THE PARAMETERS OF THE COOLING SYSTEM OF THE TABLE OF A DEVICE FOR ADDITIVE SHAPING BY A PLASMA ARC IN A DYNAMIC VACUUM ENVIRONMENT

V.V. Kuts¹, A.N. Grechuhin¹, D.A. Pavlov¹, I.A. Chernyshov²

¹Southwest State University, Kursk, Russia

²Regional engineering center, Kursk, Russia

Abstract: the article is devoted to studying the issues of designing the cooling system of the working table of a device for additive shaping of products by a plasma arc in a dynamic vacuum environment. The design parameters of the desktop cooling system, namely the diameter and number of cooling channels, are determined. The conditions for the operability of the cooling system are determined. To build mathematical dependencies to determine the design parameters of the desktop cooling system, a series of experiments was carried out using the computer simulation method. The study was carried out using the Flow Simulation module of the SolidWorks system. To construct equations for determining the temperature of the coolant, the temperature of the desktop, the initial data were simulated using the Statistica program. Equations are obtained that express the mathematical dependence of the temperature of the coolant and the surface of the working table on the design parameters of the cooling system - the diameter of the cooling channels and the number of channels for cooling the working table. The criterion for optimizing the design parameters of the cooling system of the working table of the device is determined - the minimum volume of coolant in the cooling system. Based on the data obtained, rational design parameters of the designed cooling system of the desktop were determined, which ensure the operability of the device for additive shaping of products by a plasma arc in a dynamic vacuum environment: the number of cooling channels is 4, the diameter of one cooling channel is 8 mm

Key words: additive technologies, shaping, plasma welding, finite volume method

References

1. Chervyakov L.M., Bychkova N.A., Eliseeva N.V. et. al. "Transfer of additive technologies: industry of the Kursk region: monograph" ("Transfer additivnykh tekhnologiy: promyshlennost' Kurskoy oblasti: monografiya"), Kursk, Universitetskaya kniga, 2016, 168 p.
2. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Oleshitsky A.V., Razumov M.S. "Expansion of the technological capabilities of additive shaping methods using the mechanisms of a parallel-sequential structure, *Proc. of the South-Western State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2019, vol. 23, no. 6, pp. 34-44.
3. Kruglyakov Yu.A., Grechukhin A.N. "Study of the technology of shaping products by a plasma arc in a dynamic vacuum environment", The 2nd International scientific conference of promising developments of young scientists, 2021, pp.113 – 117.
4. Dresvin S.V. et. al. "Physics and technology of low-temperature plasma" ("Fizika i tekhnika nizkoterperaturnoy plazmy"), Moscow, Atomizdat, 1972, 352 p.
5. Lykov A.V. "Theory of thermal conductivity" ("Teoriya teploprovodnosti"), Moscow, Vysshaya shkola, 1967, 599 p.
6. Zarapin A.Yu., Chichenev N.A. "Technological vacuum equipment" ("Tekhnologicheskoye vakuumnoye oborudovaniye"), Moscow, Ruda i metally, 2001, 416 p.
7. Makarov R.I. "Fundamentals of planning and processing of experimental data" ("Osnovy planirovaniya i obrabotki eksperimental'nykh dannyykh"), Vladimir, VIGU, 2014, 182s.
8. Zlenko M.A., Nagaytsev M.V., Dovbysh V.M. "Additive technologies in mechanical engineering. Handbook for engineers" ("Additivnyye tekhnologii v mashinostroyenii: posobiye dlya inzhenerov"), Moscow, GNTS RF FGUP NAMI, 2015, 220 p.
9. Kuts V.V., Razumov M.S. "Processing the results of the experiment with uniform duplication: guidelines for practical and independent work" ("Obrabotka rezul'tatov eksperimenta pri ravnomernom dublirovanii: metodicheskiye ukazaniya po provedeniyu prakticheskoy i samostoyatel'noy raboty"), Kursk, 2018, 14 p.
10. Rudskoy A.M., Kuts V.V., Razumov M.S., Grechukhin A.N., Gorokhov A.A. "Manufacturing technology of parts in automated production" ("Tekhnologiya izgotovleniya detaley v avtomatizirovannom proizvodstve"), Kursk, 2019, 265 p.
11. Ermakov S.A., Topolyansky P.A. "Plasma technologies. Guide for engineers" ("Plazmennyye tekhnologii. Rukovodstvo dlya inzhenerov"), St. Petersburg, PTU, 2008, 406 p.
12. Sidorov A.I. "Restoration of machine parts by spraying and surfacing" ("Vosstanovleniye detaley mashin napyleniyem i naplavykoy"), Moscow, Mashinostroenie, 1987, 189 p.
13. Grechukhin A.N., Kuts V.V., Razumov M.S. "Control of the spatial orientation of robot nodes in the process of additive shaping of products", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 122-129.
14. Batashov S.I., Lyudagovsky A.V., Polukhin V.A. "Calculation of temperature fields depending on the thickness of the deposited layer and the substrate during surfacing", *Modern materials, equipment and technologies (Sovremennyye materialy, tekhnika i tekhnologii)*, 2018, no. 5, pp. 89-94.
15. Ludagovsky A.V., Loktev A.A., Polukhin V.A., Sokolov V.S., Stepanov K.D. "Construction of a mathematical model of the temperature field during surfacing", Collection of issues of applied mathematics and the problem of the interaction of solids with liquid and gaseous media (Sbornik voprosov prikladnoy matematiki i problema vzaimodeystviya tverdykh tel s zhidkoy i gazovoy sredoy), Moscow, 16-18.10. 2017.
16. Spiridonov N.V., Kobyakov O.S., Kupriyanov I.L. "Plasma and laser methods for hardening machine parts" ("Plazmennyye i lazernyye metody uprochneniya detaley mashin"), Minsk, Vysshaya shkola, 1988, 155 p.
17. Veremeychik A.I., Sazonov M.I., Khvisevich V.M., Tomashev I.G. "Theoretical studies of temperature fields under the influence of a plasma jet based on the results of experimental data", *Theoretical and Applied Mechanics (Teoreticheskaya i prikladnaya mekhanika)*, 2017, iss. 32, pp. 94-99.
18. Simonyan L.M., Kats Ya.L. "Measurement of the temperature of the anode spot of a plasma-arc discharge", *Electrometallurgy (Elektrometallurgiya)*, 2018, no. 8, pp. 14-20.
19. Malakhovskiy V.A. "Plasma welding" ("Plazmennaya svarka"), Moscow, Vysshaya shkola, 1987, 80 p.
20. Dresvin S.V. et. al. "Physics and technology of low-temperature plasma" ("Fizika i tekhnika nizkoterperaturnoy plazmy"), Moscow, Atomizdat, 1972, 352 p.

Submitted 25.06.2023; revised 21.08.2023

Information about the authors

Vadim V. Kuts – Dr. Sc. (Engineering), Professor of the sub-department "Engineering technologies and equipment", Southwest State University (94 50 Let Oktiabrya str., Kursk 305000, Russia), tel.: +7 (4712) 22-26-69, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Aleksandr N. Grechukhin – Cand. Sc. (Engineering), Associate professor of the sub-department "Engineering technologies and equipment", Southwest State University (94 50 Let Oktiabrya str., Kursk 305000, Russia), tel.: +7 (4712) 22-26-69, e-mail: Agrechuhin@mail.ru

Dmitry A. Pavlov – Master's student, Southwest State University (94 50 Let Oktiabrya str., Kursk 305000, Russia), tel.: +7 (4712) 22-26-69, e-mail: dpavlov2021@mail.ru

Ilya A. Chernyshev – Head, Regional Engineering Center (34 Maxima Gorkogo str., Kursk 305000, Russia), tel.: +7(4712) 703377, e-mail: rci46@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АБРАЗИВНОГО ИНСТРУМЕНТА НА ОСНОВЕ ФОТОПОЛИМЕР-АБРАЗИВНОГО КОМПОЗИТА В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО И МЕЛКОСЕРИЙНОГО ПРОИЗВОДСТВА

Д.А. Голобурдин, А.М. Козлов

Липецкий государственный технический университет, г. Липецк, Россия

Аннотация: шлифование - один из наиболее распространенных методов обработки ответственных поверхностей деталей в современном машиностроении. Среди большого количества факторов, влияющих на процесс шлифования, одними из наиболее важных являются характеристики и свойства абразивного инструмента. В связи с внедрением в производство новых конструкционных материалов разработка и производство современного абразивного инструмента являются одними из приоритетных задач. Описана технология изготовления абразивного инструмента с использованием SLA технологии 3D-печати (стереолитография). Приведены основные технологические этапы изготовления абразивного инструмента по предлагаемой технологии, представлено описание используемого в работе оборудования, программного обеспечения (CAD-системы, системы генерации управляющих работой 3D-принтера программ), а также расходных материалов и режимов печати образцов. Представлены возможности предлагаемой технологии, в частности, изготовление инструмента со сложной геометрией рабочих поверхностей, изменяемой геометрии от периферии к центру инструмента, а также с изменяемыми характеристиками, например, с разной зернистостью абразивного материала. Рассмотрены преимущества и недостатки предложенной технологии, проанализированы полученные результаты. Представлены результаты регрессионного анализа, на основании которых выведена зависимость параметра времени засветки слоя от плотности фотополимерно-абразивной композиции

Ключевые слова: аддитивные технологии, 3D-печать, фотополимер-абразивный композит, SLA технология, шлифовальный инструмент

Введение

Шлифование является одним из самых производительных методов финишной обработки. Качественные показатели зависят от многих факторов, таких как режимы резания, возможности оборудования, свойств режущего инструмента и т.д. Режущий, или абразивный инструмент, являет собой совокупность характеристик, в сумме оказывающих определяющее влияние на конечный результат обработки. Проектирование и технология изготовления шлифовального круга представлены в работах [1, 2]. Расширение требований к эксплуатационным характеристикам деталей в ряде случаев вызывает необходимость быстрого изготовления и испытаний технологических возможностей абразивного инструмента. Следует отметить, что такие инструменты, как правило, не изготавливаются серийно, но определить их возможности крайне важно. Например, для формирования на цилиндрической поверхности определённого направления микронеровностей предложен некруговой торцовый абразивный инструмент [3]. Отечественными исследователями предложено множество конструкций абразивного инструмента,

как составных [4-6], так и цельных [7-11], которые нацелены на интенсификацию процесса шлифования, снижение теплонапряжённости в зоне резания, улучшение качества обработанной поверхности.

Таким образом, при разработке нового абразивного инструмента необходимо проведение экспериментальных исследований предложенных конструкций, что требует изготовления их опытных образцов.

Постановка задачи

Классическая технология изготовления абразивного инструмента - шлифовальный круг, или абразивный сегмент - как правило, нацелена на массовое, либо крупносерийное производство, когда средняя партия производимого абразивного инструмента составляет от одной тысячи до 10 тысяч штук, со сроком поставки от нескольких месяцев. Для условий мелкосерийного или единичного производства, при частой смене объекта выпуска, это неприемлемо. В то же время изготовление единичных, или мелкосерийных экспериментальных образцов, приводит к большим временным и, как следствие, экономическим затратам.

Для решения проблемы предлагается технология изготовления абразивного инструмен-

та на основе фотополимер-абразивного композита с помощью аддитивных технологий, в частности, SLA технологи 3D-печати.

Методы исследования

Аддитивные технологии находят всё большее применение в современном производстве от аэрокосмической отрасли до приборостроения и медицины [12-14].

SLA технология представляет собой процесс аддитивного производства, основанный на полимеризации смолы. В SLA печати модель создаётся путём селективного отверждения фотополимерной смолы с использованием ультрафиолетового излучения. Формирование контура модели происходит в плоском 2D сечении, тогда как объём формируется за счёт перемещения по оси Z.

Предлагаемая технология печати шлифовального инструмента включает следующие этапы:

формирование 3D-модели изготавливаемого шлифовального инструмента;

подготовка управляющей программы печати;

подготовка композиции из абразивного материала и фотополимерной смолы [15];

печать шлифовального инструмента по ранее заданной модели/программе;

промывка полученной заготовки в изопропиловом спирте;

дополнительная фотополимеризация изделия (сушка) в ультрафиолетовом излучении.

Формирование 3D-модели происходит в любой системе проектирования, такой как Компас 3D, SolidWorks, Inventor, Fusion 360 и т.д., с использованием различных математических инструментов [16]. Также имеется возможность формирования 3D-модели изготавливаемого инструмента на основе его математической модели, учитывающей различные его параметры, например, внутреннюю структуру [17].

На рис. 1 представлена блок-схема предлагаемого технологического процесса изготовления шлифовального инструмента.

На этапе формирования 3D-модели закладывается главное преимущество предлагаемого метода изготовления шлифовального инструмента, а именно - возможность проектирования и запуска в печать изделий со сложной геометрией, отвечающей требуемым технологическим задачам. Форму и размеры инструмента можно описать рядом параметров,

что даёт большое поле для подбора необходимой геометрии рабочих поверхностей, подходящих под конкретные задачи. Примеры 3D-моделей шлифовального инструмента со сложной геометрией представлены на рис. 2.

После формирования 3D-модели необходимо создать управляющую программу печати с помощью специализированного программного обеспечения.

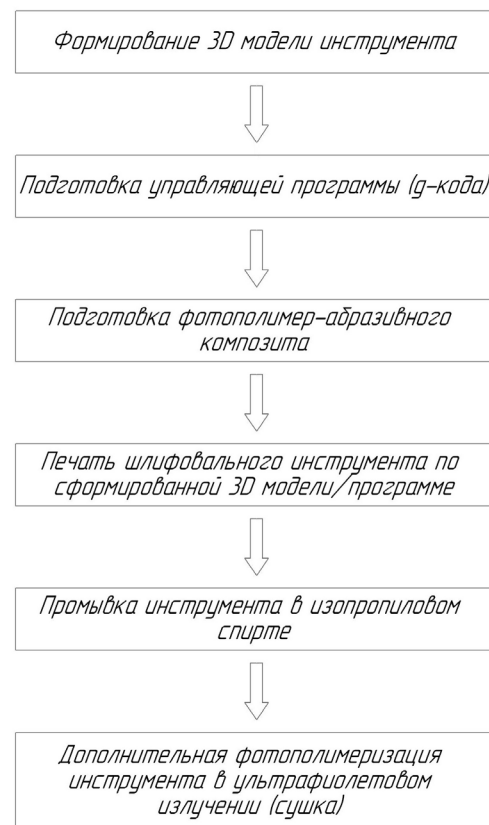


Рис. 1. Блок-схема предлагаемого технологического процесса печати инструмента

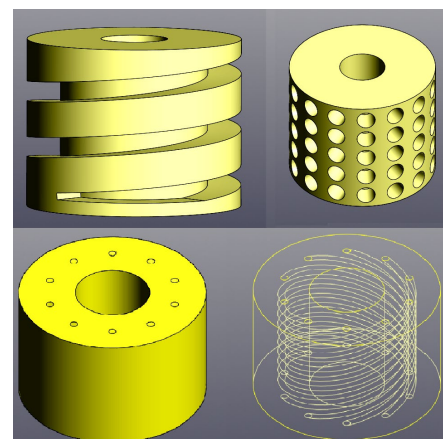


Рис. 2. 3D-модели шлифовальных кругов со сложной геометрией

Эксперименты проводились с использованием программного обеспечения Photon Workshop и Chitubox. Данное программное обеспечение позволяет настраивать режимы печати - толщину слоя, нормальное время экспозиции (засветки слоя), период отключения (засветки слоя), время экспозиции первого слоя, толщину первого слоя.

Печать производилась на принтере модели Anycubic Photon Mono и Mono 4k (далее «принтер»).

Печать образцов, представленных на рис. 1 и рис. 2, производилась на режимах, указанных в табл. 1. Примеры напечатанных образцов представлены на рис. 3.

Таблица 1

Режимы 3D-печати	
Наименование параметра	Значение
Толщина слоя, мм	0,05
Нормальное время экспозиции, с	3
Период отключения, с	0,5
Время экспозиции первого слоя, с	40
Толщина первого слоя, мм	6
Количество использованного фотополимера, мл	34,33
Время печати, мин	91

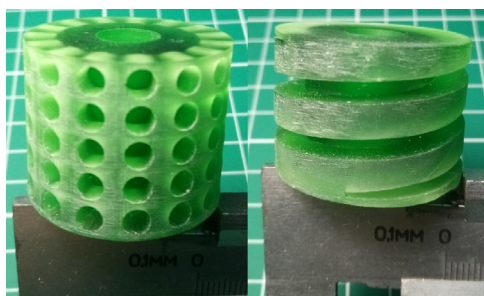


Рис. 3. Напечатанные модели шлифовальных кругов

Печать показала высокую точность линейных размеров образцов, а также высокое качество напечатанной поверхности, что позволит снизить время на последующую механическую обработку посадочных поверхностей под оправки или планшайбы.

Следующим этапом экспериментов является получение напечатанного образца из фотополимер-абразивного композита, представленного в работе [15]. Режимы печати образцов представлены в табл. 2.

Таблица 2

Режимы 3D-печати композитных образцов			
Наименование параметра	Значение		
	Образец 1	Образец 2	Образец 3
1. Толщина слоя, мм	0,1	0,1	0,1
2. Нормальное время экспозиции, с	10	15	20
3. Период отключения, с	0,5	1	2
4. Время экспозиции первого слоя, с	40	45	50
5. Толщина первого слоя, мм	6	8	10
6. Количество использованного фотополимера, мл	4,32	4,32	4,32
7. Время печати, мин	94	125	156

В результате был получен ряд образцов круглой формы с центральным отверстием (рис. 4). Структура полученных образцов представлена на рис. 5.

Напечатанные образцы обеспечили требуемую геометрию в плоскости X-Y (плоскости формирования контура), наружный и внутренний (посадочный) диаметры.

Существует технология изготовления абразивного инструмента на эпоксидных связках, например, шлифовального шевера [1]. Однако в таком методе необходимо изготавли-

вать эталонную матрицу, что значительно усложняет изготовление инструмента и повышает его себестоимость.

Сравнение полученных образцов с шлифовальным кругом заводского исполнения, на образование риска на поверхности металлической детали, показало одинаковые результаты.

Главной целью проведения данного эксперимента является изучение способности фотополимера удерживать в своём объёме абразивные зерна, то есть возможность применения его в качестве связки.



Рис. 4. Напечатанный образец шлифовального круга из фотополимер-абразивного композита

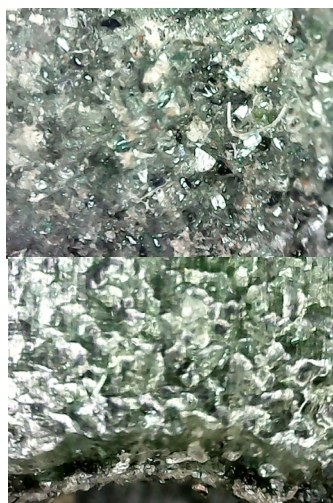


Рис. 5. Структура образцов, напечатанных из фотополимер-абразивного композита

И заводской, и экспериментальный образцы выкрашивались примерно с одинаковой интенсивностью, что свидетельствует о достаточно надёжном удержании абразивных зёрен в связке из фотополимерной смолы.

Ввиду значительного отличия свойств фотополимер-абразивного композита от базовой фотополимерной смолы, режимы печати также будут значительно отличаться. Наличие абразива в фотополимерной смоле меняет плотность состава, светопрозрачность, конечную массу изделия и т.д. [15]. В связи с этим возникает необходимость в подборе режимов, а также прогнозировании результатов печати. На основе проведенных экспериментов зависимость времени засветки слоя от плотности фотополимер-абразивной композиции может быть представлена в виде уравнения регрессии.

Уравнение линейной регрессии будет иметь следующий вид:

$$T = a + b\rho, \quad (1)$$

где T – время засветки слоя, с;

ρ – плотность фотополимер-абразивного композита, г/см³;

а и b – коэффициенты регрессии.

На основе экспериментальных данных были определены значения коэффициентов регрессии, и уравнение (1) примет вид:

$$T = -95 + 89,6861\rho. \quad (2)$$

Таким образом, выбор величины времени засветки слоя напрямую зависит от значения плотности применяемого для печати фотополимер-абразивного композита.

Результаты

На основе результатов экспериментальных исследований можно выделить следующие перспективы использования предложенного метода изготовления шлифовального инструмента:

- возможность изготовления абразивного инструмента любой конфигурации, требуемой под конкретные задачи производства;
- гибкая настройка параметров абразивного инструмента (геометрия, размеры и т.д.), на основе компьютерной модели;
- значительное снижение экономических затрат на изготовление абразивного инструмента. Так, например, партия абразивного инструмента (за основу расчёта взята стоимость шлифовального круга размером 200х400х32 мм, прямого профиля, с зернистостью F150) из одной тысячи штук будет стоить около 556 тысяч рублей. Тогда как 3D-печать абразивного инструмента обойдётся по себестоимости материалов, входящих в состав фотополимер-абразивного композита, с учётом энергетических затрат на сам процесс 3D-печати;
- снижение трудоёмкости изготовления абразивного инструмента. Предложенный метод не требует серьёзной технологической подготовки производства, позволяя в короткие сроки запустить мелкосерийные партии инструмента;
- технология позволяет регулировать внутреннюю структуру шлифовального инструмента, за счёт послойного компьютерного моделирования. Появляется возможность программного задания наличия и концентрации пор, их расположение, форма;
- метод позволяет регулировать как внешнюю, так и внутреннюю геометрию. Это даёт возможность, например, совмещать прерывистое и непрерывное шлифование, открывая в процессе работы шлифовального круга, на сплошной рабочей поверхности участки прерывистого резания, тем самым динамически регулируя условия шлифования (рис. 6).

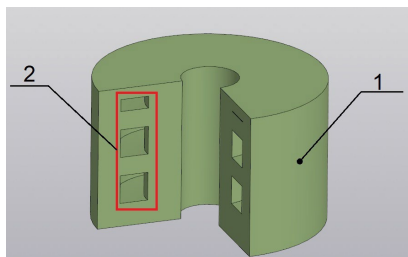


Рис. 6. Структура образцов, напечатанных из фотополлимер-абразивного композита: 1) участок сплошной периферийной поверхности; 2) зона с поверхностью прерывистого резания

Выводы

Применение SLA технологии в производстве шлифовального инструмента позволяет изготавливать инструменты со сложной геометрией рабочих поверхностей (периферии, торца).

Предложенная технология даёт возможность контролировать как внешнюю, так и внутреннюю геометрию рабочей поверхности изготавливаемого инструмента, тем самым позволяя динамически регулировать условия шлифования.

Технология позволяет сократить экономические и временные затраты на изготовление шлифовального инструмента в условиях единичного и мелкосерийного производства.

Высокая степень гибкости характеристик печатаемого шлифовального инструмента, за счёт применения связок на основе фотополлимерных смол с различными физико-механическими свойствами, а также абразива с различными характеристиками (материал, твёрдость, зернистость).

Литература

1. Основы проектирования и технология изготовления абразивного инструмента: уч. пособие / Ю.М. Ковальчук, В.А. Букин, Б.А. Глаговский [и др.]; под общ. ред. Ю.М. Ковальчука. М.: Машиностроение, 1984. 288 с.

2. Шлифовальные инструменты с наполнителями и из смесей абразивов разных по форме и зернистостям: уч. Пособие / С.А. Крюков, Н.В. Байкова, А.И. Мироседи, Е.М. Ревзина. СПб., 2018. 155 с.

3. Kozlov A.M., Kozlov A.A., Vasilenko Y.V. Modeling a Cylindrical Surface Machined by a Non-Circular Face Tool. J Procedia Engineering. 1501081–1088.

4. Патент РФ 2300455. Сборный торцовый абразивный круг / Л.В. Худобин, Ю.М. Правиков, С.М. Михайлин, Г.Р. Муслина. 10 июня 2007.

5. Патент РФ 2294277. Торцовый абразивный круг / Л.В. Худобин, Г.Р. Муслина, Ю.М. Правиков, И.М. Показаньев. 27 февраля 2007.

6. Патент РФ 2249500. Сборный торцошлифовальный круг / А.М. Козлов, О.Н. Пономарев, В.В. Ефремов. 10 апреля 2005.

7. Патент РФ 2008190. Шлифовальный круг / О.Н. Ушанев, Л.В. Приданникова. 28 февраля 1994.

8. Патент РФ 1755494. Шлифовальный круг / О.Н. Ушанев, В.Н. Заболотский. 10 марта 1995.

9. Бутенко В.И., Гусакова Л.В., Кулинский А.Д. Перспективные направления повышения эффективности шлифования поверхностей деталей машин // Вестник Брянского государственного технического университета №2(50), 2016. С. 112-120.

10. Патент РФ 2201865. Шлифовальный инструмент / В.И. Бутенко, Д.И. Диденко, Д.С. Дуров. 10 апреля 2003.

11. Патент РФ 2395381. Шлифовальный инструмент / В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, Л.В. Гусакова. 27 июля 2010.

12. Зленко М.А., Довбыш В.М. Аддитивные технологии в машиностроении: пособие для инженеров. М. ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», 2015. 220 с.

13. Зленко М.А., Попович А.А., Мутылина И.Н. Аддитивные технологии в машиностроении: учебное пособие. СПб.: СПбГУ, 2013 221 с.

14. Валетов В.А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы): учебное пособие. СПб.: Университет ИТМО, 2015. 63 с.

15. Голобурдин Д.А., Козлов А.М., Козлов А.А. Разработка фотополлимер-абразивного композита для 3D-печати инструмента // Воронежский научно-технический вестник. 2022. №3(41). С. 4-10.

16. Амбросимов С.К., Поддубных И.Ю. Решение некоторых задач обработки резанием методами алгебры логики // Вестник ЛГТУ. 2020. № 2 (43). С. 20-29.

17. Голобурдин Д.А., Козлов А.М., Козлов А.А. Моделирование единичного слоя абразивного инструмента для 3D-печати // Фундаментальные основы физики, химии и механики наукоёмких технологических систем формообразования и сборки изделий: сб. науч. тр. Международного научного симпозиума технологических машиностроителей. Дивноморское, 2022. С. 83-87.

Поступила 19.06.2023; принята к публикации 17.08.2023

Информация об авторах

Голобурдин Дмитрий Алексеевич – аспирант кафедры технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), тел.+7 (919) 259-70-03, e-mail: dimagoloburдин@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3535-4119>

Козлов Александр Михайлович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой технологии машиностроения, Липецкий государственный технический университет (398055, Россия, г. Липецк, ул. Московская, 30), тел. 8 (905) 044-90-10, e-mail: kam-48@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7650-0616>

TECHNOLOGY OF ABRASIVE TOOLS MANUFACTURING ON THE BASIS OF PHOTOPOLYMER-ABRASIVE COMPOSITE, IN CONDITIONS OF SINGLE AND SMALL-SCALE PRODUCTION

D.A. Goloburdin, A.M. Kozlov

Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract: grinding is one of the most common methods for processing critical surfaces of parts in modern mechanical engineering. Among the large number of factors affecting the grinding process, one of the most important are the characteristics and properties of the abrasive tool. In connection with the introduction of new structural materials into production, the development and production of modern abrasive tools are one of the priority tasks. The technology of manufacturing an abrasive tool using SLA 3D printing technology (stereolithography) is described. The main technological stages of manufacturing an abrasive tool according to the proposed technology are given, a description of the equipment used in the work, software (CAD systems, systems for generating programs that control the operation of a 3D printer), as well as consumables and sample printing modes are presented. The possibilities of the proposed technology are presented, in particular, the manufacture of tools with complex geometry of working surfaces, variable geometry from the periphery to the center of the tool, as well as with variable characteristics, for example, with different grain sizes of abrasive material. The advantages and disadvantages of the proposed technology are considered, the results obtained are analyzed. The results of regression analysis are presented, on the basis of which the dependence of the layer exposure time parameter on the density of the photopolymer-abrasive composition is derived

Key words: additive technologies, 3D printing, photopolymer-abrasive composite, SLA technology, grinding tools

References

1. Kovalchuk Yu.M., Bukin V.A., Glagovsky B.A. "Fundamentals of designing and manufacturing technology of abrasive tools: a training manual for technical schools on the specialty "Production of abrasive and diamond tools" ("Osnovy proyektirovaniya i tekhnologiya izgotovleniya abrazivnogo instrumenta: uch. posobiye dlya tekhnikov po spetsial'nosti "Proizvodstvo abrazivnogo i almaznogo instrumenta", ed. by Kovalchuk Yu.M., Moscow, Mashinostroyeniye, 1984, 288 p.
2. Kryukov S.A., Baikova N.V., Mirocedi A.I., Revzina E.M. "Grinding tools with fillers and from mixtures of abrasives of different shapes and grits. Tutorial" ("Shlifoval'nyye instrumenty s napolnitelyami i iz smesey abrazivov raznykh po forme i zernistostyam: uch. Posobiye"), St. Petersburg, 2018, 155 p.
3. Kozlov A.M., Kozlov A.A., Vasilenko Y.V. "Modeling a Cylindrical Surface Machined by a Non-Circular Face Tool", *Procedia Engineering*, 2016, 1501081 – 1088, DOI: 10.1016/j.proeng.2016.07.218.
4. Khudobin L.V., Pravikov Y.M., Mikhailin S.M., Muslina G.R. "Assembled face abrasive wheel" ("Sbornyy tortsovyi abrazivnyy krug"), Patent of RF no. 2300455, June 10, 2007.
5. Khudobin L.V., Muslimina G.R., Pravikov Yu.M. "A face abrasive wheel" ("Tortsovyi abrazivnyy krug"), Patent of RF no. 2294277, February 27, 2007.
6. Kozlov A.M., Ponomarev O.N., Efremov V.V. "Prefabricated face grinding wheel" ("Sbornyy tortsoshlifoval'nyy krug"), Patent of RF no. 2249500, April 10, 2005.
7. Ushanev O.N., Pridannikova L.V. "Grinding-shaft wheel" ("Shlifoval'nyy krug"), Patent of RF no 2008190, February 28, 1994.
8. Ushanev O.N., Zabolotsky V.N. "Grinding-shaft wheel" ("Shlifoval'nyy krug"), Patent of RF no. 1755494, March 10, 1995.
9. Butenko V.I., Gusakova L.V., Kulinsky A.D. "Perspective directions of increasing the efficiency of grinding surfaces of machine parts", *The Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, no.2 (50), 2016, pp. 112-120.
10. Butenko V.I., Didenko D.I., Durov D.S. "Grinding tool" ("Shlifoval'nyy instrument"), Patent of RF no. 2201865, April 10, 2003.
11. Butenko V.I., Durov D.S., Gusakova L.V. "Grinding tool" ("Shlifoval'nyy instrument"), Patent of RF no. 2395381, July 27, 2010.
12. Zlenko M.A., Nagaitsev M.V., Dovbysh V.M. "Additive Technology in Machine-Building. Handbook for Engineers" ("Additivnyye tekhnologii v mashinostroyenii: posobiye dlya inzhenerov"), Moscow, GNTS RF FGP "NAMI", 2015, 220 p.
13. Zlenko M.A., Popovich A.A., Mutylina I.N. "Additive Technologies in Mechanical Engineering. Textbook" ("Additivnyye tekhnologii v mashinostroyenii. uchebnoye posobiye"), St. Petersburg, SPbGU, 2013, 221 p.
14. Valetov V.A. "Additive technologies (state and prospects). Tutorial" ("Additivnyye tekhnologii (sostoyaniye i perspektivy): uchebnoye posobiye"), St. Petersburg, Universitet ITMO, 2015, 63 p.
15. Goloburdin D.A., Kozlov A.M., Kozlov A.A. "Development of photopolymer-abrasive composite for 3D-printing tools", *Voronezh Scientific and Technical Bulletin (Voronezhskiy nauchno-tekhnicheskiiy vestnik)*, no. 3 (41), Voronezh, 2022, pp. 4-10.
16. Ambrosimov S.K., Poddubnykh I.Yu. "The solution of some problems of machining by methods of algebra of logic" *The Bulletin of Lipetsk State Technical University (Vestnik Lipetskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, №2 (43), 2020, pp. 20-29.
17. Goloburdin D.A., Kozlov A.M., Kozlov A.A. "Modeling of single layer of abrasive tool for 3D-printing", *Fundamental bases of physics, chemistry and mechanics of high technology systems of shaping and assembling products*, proc. of the International Scientific Symposium of Machine-Building Technologists, Divnomorskoye, 2022, pp. 83-87.

Submitted 19.06.2023; revised 17.08.2023

Information about the authors

Dmitriy A. Goloburdin – Postgraduate student, Department of Mechanical Engineering Technology, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), tel. +7 (919) 259-70-03, e-mail: dimagoloburdin@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3535-4119>

Aleksandr M. Kozlov – Dr. Sc. (Technical), Professor, Lipetsk State Technical University (30 Moskovskaya str., Lipetsk 398055, Russia), tel. +7 (905) 044-90-10, e-mail: kam-48@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7650-0616>