

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Повышение качества управления сложными объектами на базе полиномиальных регуляторов с динамическим изменением настроек В.И. Захватов, С.Л. Подвальный, А.В. Михайлусов.....	7
Оптимизационное решение задачи увода ограниченно маневренного воздушного судна от столкновения с земной поверхностью А.В. Комаров, Е.К. Кичигин.....	16
Разработка модели для улучшения планирования задач в облачных вычислениях на основе оптимизации роя частиц Ходар Алмосана, Э.К. Алгазинов, Е.Н. Десятирикова, Ияд Алхаят.....	23
Исследование возможности моделирования усилителя мощности с использованием средств нейронных сетей С.Л. Подвальный, М.А. Лихотин.....	30
Система слежения беспилотного летательного аппарата с использованием монокулярной системы технического зрения в гиросtabilизированном подвесе В.Г. Бондарев, Д.А. Смирнов, Н.И. Майгурова, А.В. Николенко, К.Ю. Гусев, С.Ю. Вахмин.....	37
Исследование следящей системы с астатическим модальным регулятором и фильтром Калмана в качестве наблюдателя А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, Ю.Н. Каревская.....	45

Радиотехника и связь

Техническая реализация высокоскоростного информационного канала радиосвязи с беспилотного летательного аппарата на наземный пункт управления Д.Г. Пантенков, Н.В. Гусаков, А.Т. Егоров, А.А. Ломакин, В.П. Литвиненко, В.И. Великоиваненко, Е.Ю. Лю-Кэ-Сю.....	52
Использование пиролитических металлооксидных пленок для изготовления фотоэлектрических преобразователей энергии В.Е. Полковников, Д.С. Пермяков, М.А. Белых, Ш.Х. Юлчиев, С.И. Рембеза.....	72
Прогнозирование электромагнитных помех в ближнем поле методом Грина В.В. Глотов, Т.С. Глотова.....	78
Алгоритм устройства формирования тактового сигнала SDRAM памяти Д.Н. Чернов, А.С. Смирнов, Е.Д. Алперин.....	83
Локальная система навигации с использованием низкочастотного магнитного поля И.М. Голев, А.В. Сергеев.....	88
Применение методов полуопределенного программирования для решения задачи повышения помехоустойчивости OFDM систем связи О.Н. Чирков, М.А. Ромащенко, С.А. Слинчук	95
Моделирование печатных плат в закрытых конструкциях электронных средств методом длинной линии В.В. Глотов, Т.С. Глотова.....	100

Автоматизированная зондовая станция для испытания электрических параметров кристаллов диодов и транзисторов В.В. Кондусов, В.А. Кондусов.....	105
---	------------

Машиностроение и машиноведение

Обеспечение качества поверхностного слоя деталей при изготовлении отверстий в фильтрах ракетных двигателей А.Ю. Рязанцев, Е.В. Смоленцев, В.Г. Грицюк, А.А. Широкожухова.....	111
Исследование процесса изготовления комбинированного электрода-инструмента для электрохимической обработки в условиях единичного и опытного производства А.П. Суворов, А.В. Кузовкин.....	117
Оценка влияния технологической наследственности на процесс формирования параметров качества поверхностей деталей алмазным выглаживанием М.Н. Нагоркин.....	122
Информационная поддержка назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента А.В. Анцев.....	128
Анализ морфологии стружки, полученной методом высокопроизводительного фрезерования М.В. Вилкина.....	137

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Improving the quality of controlling complex objects on the basis of polynomial regulators with dynamically changing settings V.I. Zakhvatov, S.L. Podvalny, A.V. Mikhaylusov.....	7
Optimization solution to the problem of removing a limited maneuverable aircraft from collision with earth surface A.V. Komarov, E.K. Kichigin.....	16
Designing a model to improve task scheduling in cloud computing based on particle swarm optimization Almothana Khodar, E.K. Algazinov, E.N. Desyatirikova, Iyad Alkhayat.....	23
Research of the possibility of modeling the power amplifier using means of neural networks S.L. Podvalny, M.A. Likhotin.....	30
Unmanned aircraft tracking system using monocular technical vision system in a gyro-stabilized suspension V.G. Bondarev, D.A. Smirnov, N.A. Maygurova, A.V. Nikolenko, K.Yu. Gusev, S.Yu. Vakhmin.....	37
Research of servo system with astatic modal regulator and a Kalman filter as observer A.P. Kharchenko, Yu.S. Slepokurov, Yu.N. Karevskaya.....	45

Radio engineering and communication

Technical implementation of high-speed data radio channel from an unmanned aerial vehicle to ground control station D.G. Pantenkov, N.V. Gusakov, A.T. Egorov, A.A. Lomakin, V.P. Litvinenko, V.I. Velikoivanenko, E.Yu. Lu-Ke-Syu.....	52
Metal oxide pyrolytic films for the production of photo-electrical energy converters V.E. Polkovnikov, D.S. Permyakov, M.A. Belykh, Sh.Kh. Yulchiev, S.I. Rembeza.....	72
Forecasting electromagnetic interference in the near field using Green method V.V. Glotov, T.S. Glotova.....	78
Algorithm of generation clock signal for SDRAM memory D.N. Chernov, A.S. Smirnov, E.D. Alperin.....	83
Local navigation system using low-frequency magnetic field I.M. Golev, A.V. Sergeev.....	88
Application of semi-defined programming methods for the solution of the problem of improving interference stability of OFMD communication systems O.N. Chirkov, M.A. Romashchenko, S.A. Slinchuk	95
Modeling of printed circuit boards in the closed design of electronic products by the method of long line V.V. Glotov, T.S. Glotova.....	100
Automated probe station for testing the electric parameters of the crystals and diode of transistors V.V. Kondusov, V.A. Kondusov.....	105

Mechanical engineering and science of machines

Quality assurance of the part surface layer when drilling holes in the rocket engines filters A.Yu. Ryazantsev, E.V. Smolentsev, V.G. Gritsyuk, A.A. Shirokzhukhova.....	111
Study of the manufacturing process of a combined electrode-tool for electrochemical treatment in conditions of single and experimental production A.P. Suvorov, A.V. Kuzovkin.....	117
Assessment of the influence of technological heredity on the process of forming the parameters of the surface quality of parts by diamond burnishing M.N. Nagorkin.....	122
Information support of assigning the cutting tool efficient operating strategy A.V. Antsev.....	128
Morphology analysis of chips obtained after cutting with high performance milling method M.V. Vilkina.....	137

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.5.001

УДК 621.316.544.1

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРАВЛЕНИЯ СЛОЖНЫМИ ОБЪЕКТАМИ НА БАЗЕ ПОЛИНОМИАЛЬНЫХ РЕГУЛЯТОРОВ С ДИНАМИЧЕСКИМ ИЗМЕНЕНИЕМ НАСТРОЕК

В.И. Захватов, С.Л. Подвальный, А.В. Михайлулов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена задача повышения качества управления сложными объектами на базе полиномиального регулятора с динамическим изменением настроек на примере обратного маятника на каретке. Построена математическая модель объекта управления, синтезирован полиномиальный регулятор с помощью метода символьных вычислений систем дифференциальных уравнений с дополнительным входом для задания среднегеометрического корня извне и подобраны настройки ПИД-регулятора для управления положением каретки стандартными средствами MATLAB Simulink. Для анализа качества и параметров созданной системы управления были созданы модель обратного маятника на каретке и модели регуляторов с помощью визуальной среды моделирования MATLAB Simulink. В результате моделирования была получена прямая зависимость времени установки положения маятника от значения среднегеометрического корня, что подтверждает возможность внешнего управления быстродействием представленной системы управления. Также исследована и подтверждена возможность контроля уровня управляющих воздействий для предотвращения насыщения исполнительных устройств. В результате анализа работы системы управления были выделены несколько направлений для дальнейших исследований: повышение качества предотвращения насыщения исполнительных устройств, управление полосой пропускания исходя из спектральных характеристик помех измерений, управление быстродействием систем без перенастройки регулятора, динамическое управление областью притяжения систем, разработка многоальтернативных систем. Фактически была создана система внешнего параметрического управления динамикой процессов, причем описанный регулятор не требует адаптации и обучения

Ключевые слова: система управления, полиномиальный регулятор, параметрическое управление, обратный маятник, сложный объект

Введение

В связи с постоянным ростом сложности проектируемых систем усложняются и средства управления протекающими в них динамическими процессами. И уже не обойтись без применения компьютерной поддержки на всех этапах разработки, отладки и эксплуатации. Вовлечение современных информационных и компьютерных технологий в сферу управления динамическими объектами происходит по многим взаимосвязанным направлениям, включающим как использование в качестве инструментальных средств проектирования, так и применение в режиме реального масштаба времени. Кроме того, существенно расширяется объем требований к системам автоматизации технических процессов, протекающих обычно в условиях значительной структурно-параметрической и информационной неопределенности.

Особенную сложность представляет управление сложными объектами, так как оно обуславливает необходимость в создании регу-

ляторов, способных работать в различных режимах для обеспечения специфических требований к используемым техническим средствам.

Например, иногда задача повышения качества управления сложными объектами возможна при условии контроля управляющих воздействий для предотвращения насыщения исполнительных устройств при использовании определенного типа электроприводов [1, 2].

Классическим примером сложного объекта является обратный маятник на каретке, который рассматривается в настоящей работе. Разные положения маятника требуют различного режима управления, что делает невозможным использование статичного регулятора в случае необходимости в максимальной области притяжения.

Постановка задачи

Требуется синтезировать полиномиальный регулятор с возможностью динамического изменения настроек.

Кроме обеспечения необходимого времени установки, регулятор должен решать ряд наиболее важных и актуальных проблем управления подобными объектами.

При этом актуальными является задача предотвращения насыщения исполнительных устройств, управление полосой пропускания без перенастройки регулятора для контроля шумов датчика и для изменения быстродействия системы.

Еще одной задачей является синтез регулятора минимального порядка с максимальной областью притяжения (возможно динамическое изменение области притяжения) для упрощения конечного вида системы управления.

Методы исследования

В рамках поставленной задачи для синтеза регулятора и последующего моделирования и оценки его качества будет использоваться средство визуального моделирования MATLAB Simulink.

MATLAB Simulink позволяет моделировать работу линейных и нелинейных объектов, что актуально для моделирования обратного маятника на каретке.

Для анализа результатов работы системы управления будут использованы стандартные средства визуализации Simulink.

Начальные условия

Тележка с обратным маятником, показанная на рис. 1, управляется силой F . На модели указаны действующие силы, и нужно отметить, что направление отсчета угла маятника относительно вертикальной оси направлено против часовой стрелки. А рост горизонтальной координаты перемещения каретки направлен слева направо (подобная система рассмотрена в [3]).

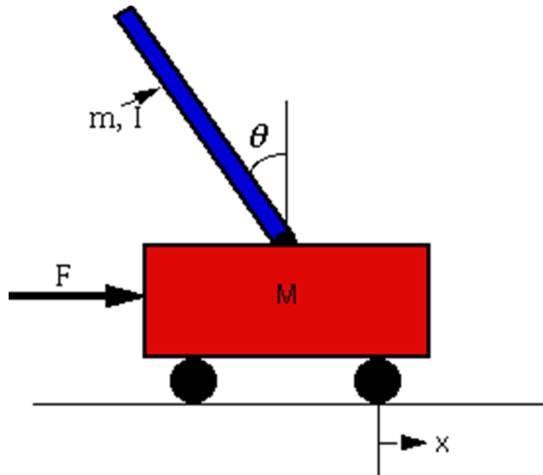


Рис. 1

Далее приведем физические параметры системы:

- M (масса тележки – 0,5 кг);
- m (масса маятника – 0,2 кг);
- b (трение тележки – 0,1 Н/м/с);
- L (длина до центра масс маятника – 0,3 м);
- I (инерция маятника – 0,006 кг м²);
- F (сила, приложенная к тележке);
- x (координата положения корзины);
- θ (угол маятника от вертикали).

Построение математической модели маятника

На рис. 2 и 3 показаны силы, действующие на маятник и на каретку.

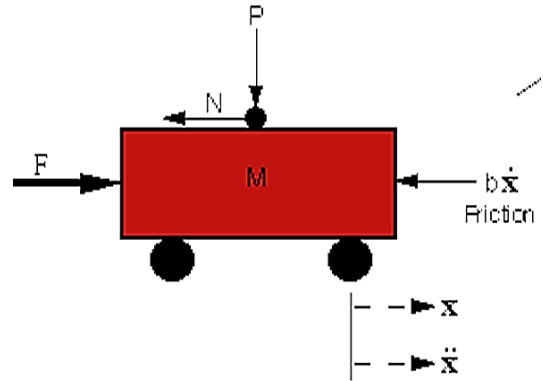


Рис. 2

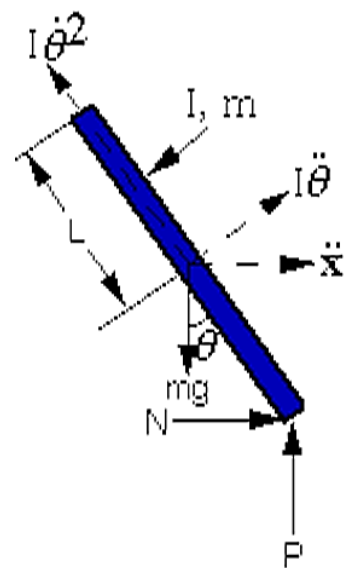


Рис. 3

Опишем указанные параметры:

- \dot{x} (скорость каретки);
- \ddot{x} (ускорение каретки);
- $\dot{\theta}$ (угловая скорость маятника);
- $\ddot{\theta}$ (угловое ускорение маятника);
- P (сумма вертикально действующих сил);
- N (сумма горизонтально действующих сил);
- g (ускорение свободного падения).

Описанная физическая система имеет две степени свободы, которые представлены координатой положения каретки и углом отклонения маятника. И руководствуясь законами Ньютона, составим уравнения (1, 2) для обеих степеней свободы.

$$\frac{d^2x}{dt^2} = \frac{1}{M} \sum_{cart} F_x = \frac{1}{M} \left(F - Nb \frac{dx}{dt} \right), \quad (1)$$

$$\frac{d^2\theta}{dt^2} = \frac{1}{I} \sum_{pend} \tau = \frac{1}{I} (NL \cos(\theta) + PL \sin(\theta)), \quad (2)$$

$$P = m \left(\frac{d^2y_p}{dt^2} + g \right), \quad (3)$$

$$N = m \frac{d^2x_p}{dt^2}, \quad (4)$$

$$\frac{d^2x_p}{dt^2} = \frac{d^2x}{dt^2} + L \sin(\theta) \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - L \cos(\theta) \frac{d^2\theta}{dt^2}, \quad (5)$$

$$\frac{d^2y_p}{dt^2} = -L \cos(\theta) \left(\frac{d\theta}{dt} \right)^2 - L \sin(\theta) \frac{d^2\theta}{dt^2}. \quad (6)$$

После построения математической модели требуется ее линеаризовать для последующего синтеза регулятора.

Линеаризация системы

Так как стабилизация происходит около нулевого угла отклонения маятника, то можно произвести ряд замен:

- $\cos(\theta) = 1$;
- $\sin(\theta) = \phi$;
- $\dot{\theta}^2 = 0$.

После подстановки замен получи новые уравнения движения (7) и (8).

$$(I + ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = ml\ddot{x} \quad (7)$$

$$(M + m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\phi} = u \quad (8)$$

Далее для осуществления линеаризации проведем преобразования Лапласа для уравнений (9) и (10).

$$(I + ml^2)\Phi(s)s^2 - mgl\Phi(s) = mlX(s)s^2, \quad (9)$$

$$(M + m)X(s)s^2 + bX(s)s - ml\Phi(s)s^2 = U(s). \quad (10)$$

Получение передаточной функции

Имея линеаризованные уравнения, мы можем составить передаточную функцию системы обратного маятника на каретке, которая необходима в дальнейшем для синтеза регулятора.

Так как входом системы является $U(s)$ (прикладываемая сила), $X(s)$ – положение каретки, а выходом $\Phi(s)$ (угол отклонения маятника), составим уравнение координаты (11).

$$X(s) = \left[\frac{(I + ml^2)}{ml} - \frac{g}{s^2} \right] \Phi(s). \quad (11)$$

Для более удобной записи произведем замену (12).

$$q = [(M + m)(I + ml^2) - (ml)^2]. \quad (12)$$

И после подстановки имеем передаточную функцию (13).

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q} s^2}{s^4 + \frac{b(I + ml^2)}{q} s^3 - \frac{(M + m)mgl}{q} s^2 - \frac{bmgl}{q} s}. \quad (13)$$

Проведя сокращение, получим законченный вид передаточной функции маятника (14).

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q} s}{s^3 + \frac{b(I + ml^2)}{q} s^2 - \frac{(M + m)mgl}{q} s - \frac{bmgl}{q}}. \quad (14)$$

И в уравнении (15) показана передаточная функция каретки:

$$\frac{X(s)}{U(s)} = \frac{\frac{(I + ml^2)s^2 - mgl}{q}}{s^4 + \frac{b(I + ml^2)}{q} s^3 - \frac{(M + m)mgl}{q} s^2 - \frac{bmgl}{q} s}. \quad (15)$$

Несложный анализ уравнений (14) и (15) показывает, что мы имеем дело с объектами неминимально-фазового типа, вопросам управления которыми посвящена обширная литература при подробном моделировании средствами Matlab [4]. При этом, как правило, строятся системы адаптивного управления с наблюдателем или эталонной моделью [5, 6].

Особую сложность представляют в этих системах задачи идентификации таких моделей, что существенно усложняет итоговый вариант замкнутой системы управления. В силу указанных обстоятельств, поиск более простых алгоритмов управления постоянно ведется. Именно поиску упрощенных вариантов управления и посвящено дальнейшее рассмотрение.

Метод полиномиальных уравнений и символьных вычислений при проектировании алгоритмов управления

Несмотря на то, что методы компьютерной математики широко используются в современной теории и практике автоматического управления, символьные (аналитические) вычисления на основе компьютерной алгебры здесь пока еще не получили распространения. Между тем, алгебраические методы и символьные вычисления активно используются и нашли применение в различных научно-технических областях, открывают в них новые возможности.

В современной теории динамических систем разработан разнообразный арсенал мощных, аналитических и численных методов синтеза. Так, алгоритмы проектирования, рекомендуемые сегодня ТАУ, в качестве базовой основы становятся все более сложными, но методы оптимизации и адаптации так и не смогли в полной мере оправдать возлагавшиеся на них большие надежды. В настоящее время не существует ни одного вполне удовлетворительного, способного стать инженерным стандартом, каким, например, был в свое время метод логарифмических частотных характеристик. На этапе реализации важно уложиться в предписанные ограничения и выбрать параметры желаемых характеристик системы в форме, пригодной для осуществления имеющимися техническими средствами.

Синтез систем является многокритериальной проблемой, которую трудно вместить в узкие рамки какого-то одного, пусть и удачно выбранного, критерия оптимизации. Применение в качестве координатного базиса при синтезе пространства состояний также не всегда приемлемо, поскольку предполагает наличие точной модели объекта управления. Синтез традиционными, классическими операторными методами, в пространстве изображений в последнее время получает новое развитие, привлекает внимание исследователей [6, 7]. Попытки выявить в нем новые возможности с

учетом достижений классической алгебры, и особенно ее новой ветви - алгебры компьютерной, насколько известно, применительно к задачам ТАУ, пока еще не предпринимались. Ввиду этого очевидного и явного дефицита сегодня приемлемых для инженерной практики методов проектирования и соответствующих алгоритмов, способных обеспечить высокую эффективность и точность управляемых систем, существует насущная потребность в их разработке.

В развитии известных алгебраических методов синтеза управляемых систем рассматриваются возможности численно-аналитического подхода на основе решения систем нелинейных алгебраических уравнений и неравенств [8]. Математическим инструментарием нового подхода являются методы компьютерной алгебры и полиномиальных уравнений.

Стандартная постановка задачи синтеза регуляторов методом численного решения систем линейных полиномиальных уравнений относительно комплексной переменной p , для объекта с передаточной функцией $W_0(p)=B(p)/A(p)$ и желаемого эталона (характеристического полинома) системы управления $C(p)$, заданных в численном виде, заключается в следующем [7, 8]. Требуется найти численные значения неизвестных параметров регулятора $W(p)=Y(p)/X(p)$, доставляющего ту или иную степень приближения свойств замкнутой системы к желаемому эталону. Все желаемые полюсы системы, являющиеся корнями полинома $C(p)$, назначаются заранее. Полиномиальное уравнение синтеза (16) решается в численном виде относительно неизвестных полиномов $X(p), Y(p)$:

$$A(p)X(p)+B(p)Y(p)=C(p). \quad (16)$$

Новая постановка задачи численно-аналитического синтеза состоит в замене численных значений параметров объекта и эталона на аналитические эквиваленты. Для объекта и желаемого эталона системы управления $Z(p, \alpha_i, \beta_j, \gamma_j)$, заданных в аналитическом либо в численно-аналитическом виде, найти численно-аналитические значения параметров регулятора $W(p)=Y(p)/X(p)$, а затем, в результате анализа полученных аналитических соотношений, можно определить те численные значения параметров, которые отвечают комплексу технических требований к управляемой системе при ее текущем состоянии в данный момент времени. Полиномиальное уравнение синтеза

(17) решается в символьном либо в численно-аналитическом виде относительно неизвестных полиномов $X(p), Y(p)$ и $Z(p)$:

$$A(p)X(p) + B(p)Y(p) = Z(p, \alpha_i, \beta_j, \gamma_j),$$

$$Z(p, \alpha_i, \beta_j, \gamma_j) = \prod_{i,j} (p + \alpha_i) * (p^2 + \beta_j p + \gamma_j). \quad (17)$$

При этом параметры эталона $\alpha_i, \beta_j, \gamma_j$, определяющие величины желаемых полюсов синтезируемой замкнутой системы, должны иметь вещественные положительные значения. С учетом этого, и приравнявая коэффициенты при различных степенях переменной p в уравнении синтеза (16), получаем систему нелинейных уравнений и неравенств. Решение последней позволяет определить, существует ли в пространстве варьируемых параметров эталона и регулятора заданного порядка такая точка или область, которая удовлетворяет построенной системе нелинейных уравнений и неравенств.

Метод полиномиальных уравнений позволяет рассчитать регулятор для объекта сколь угодно высокого порядка и с любым порядком астатизма.

Особенность аналитически заданного эталона – области локализации корней характеристического полинома являются в общем случае неопределенными и рассредоточенными в комплексной полуплоскости. При необходимости обеспечения требуемых динамических свойств проектируемой системы часть доминирующих корней эталона $Z(p, \alpha_i, \beta_j, \gamma_j)$ может быть назначена в численном виде.

Синтез регулятора

В рамках поставленной задачи требуется синтезировать полиномиальный регулятор, который удовлетворял бы всем необходимым условиям и имел минимальный порядок [11, 12].

Для снижения порядка системы мы можем пренебречь трением каретки, что позволит получить передаточную функцию маятника второго порядка (18).

$$\frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{ml}{q}}{s^2 - \frac{(M+m)mgI}{q}}. \quad (18)$$

Подставим значения и получим передаточную функцию (19).

$$W_0 = \frac{50}{11s^2 - 343}. \quad (19)$$

Так как итоговая передаточная функция имеет второй порядок, то мы можем синтезировать полиномиальный регулятор первого порядка, используя символьные методы решения систем дифференциальных уравнений по методике, представленной в [7].

Используя методику синтеза полиномиального регулятора, представленную в [12], была получена передаточная функция регулятора W_p .

В ходе синтеза был введен дополнительный параметр, который будет являться дополнительным входным параметром итогового регулятора. Этот параметр представляет собой среднегеометрический корень характеристического уравнения (Ω), который, в свою очередь, будет задавать полосу пропускания системы.

Итоговая передаточная функция регулятора W_p с дополнительным параметром Ω показана в (20).

$$W = \frac{(0.66\Omega^2 + 6.86)s + (0.22\Omega^3 + 20.58\Omega)}{s + 3\Omega}. \quad (20)$$

Введение возможности динамического изменения настроек регулятора дает целый ряд разнообразных возможностей, изучение которых необходимо произвести с помощью моделирования.

Моделирование системы

Для анализа результатов использования синтезированного полиномиального регулятора требуется построить модель обратного маятника на каретке и модель системы управления с обратной связью по углу отклонения маятника и по положению каретки средствами MATLAB Simulink.

После подстановки физических параметров системы и добавления дополнительного входа установки начальных условий у Integrator1, который отвечает за начальный угол отклонения маятника, получим работоспособную модель, которая показана на рис. 4.

На рис. 4 показана модель полиномиального регулятора, где присутствуют входы для подключения обратной связи по углу отклонения маятника и вход для установки среднегеометрического корня.

После создания моделей регулятора и обратного маятника требуется их объединить в общую модель с обратными связями. Общая

модель показана на рис. 5. Настройки регулятора каретки получены с помощью стандартного инструмента настройки Simulink.

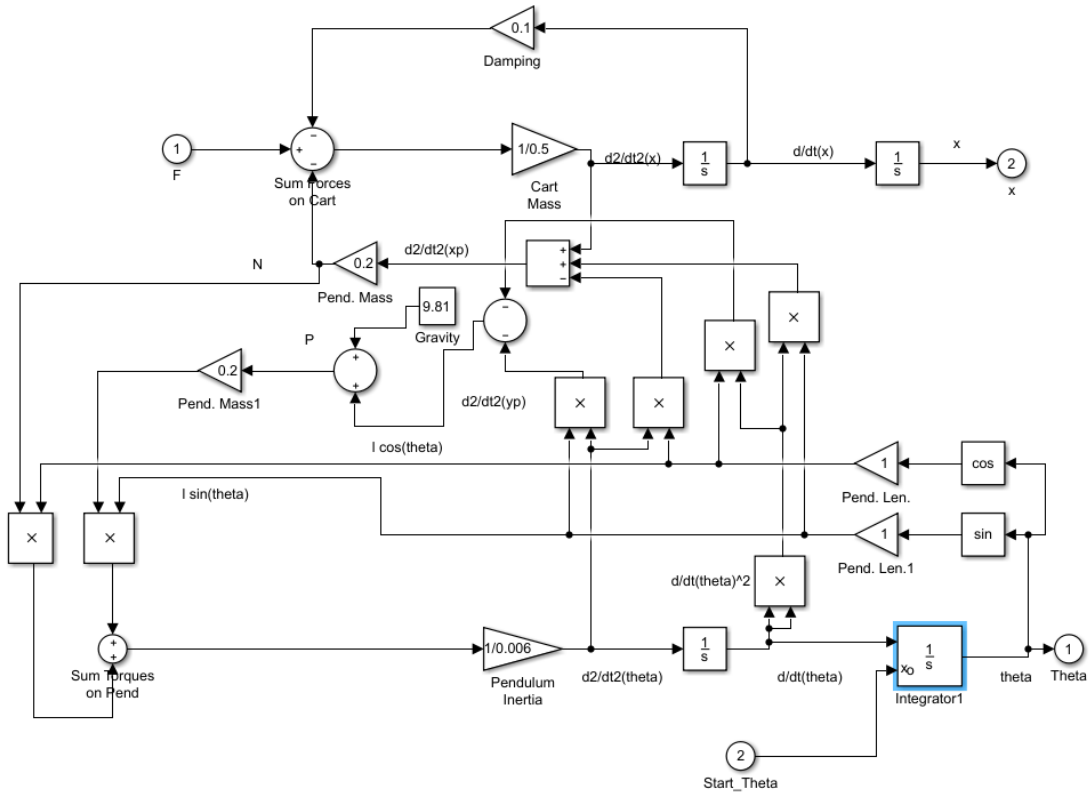


Рис. 4. Модель обратного маятника

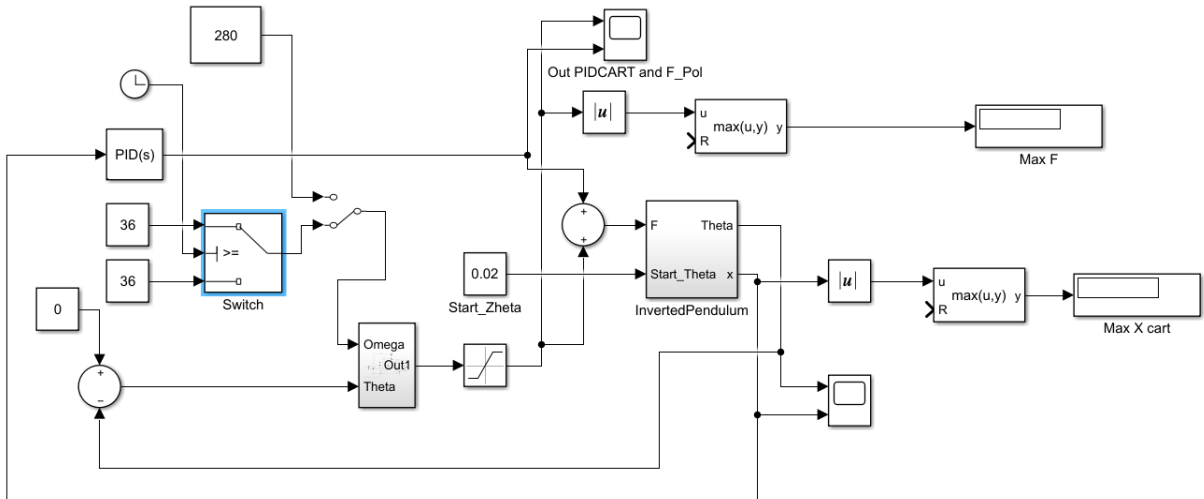


Рис. 5. Общая модель системы управления

Анализ работы системы

После создания работоспособной модели всей системы управления требуется провести анализ ее работы и проверить, удовлетворяют ли ее свойства поставленным условиям и задачам.

Одной из важных задач созданной системы управления является установка угла отклонения маятника в ноль за минимальное время. Потому требуется построить зависимость времени установки от начального угла, а также зависимость времени установки от полосы пропускания.

Стоит отметить, что временем установки будет считаться время, за которое маятник устанавливается в положение с углом отклонения <0.01 радиан.

На рис. 6 показана осциллограмма, посредством которой производится оценка времени установки маятника. В данном случае начальный угол составляет 0.5 радиан, а среднегеометрический корень равен 36.

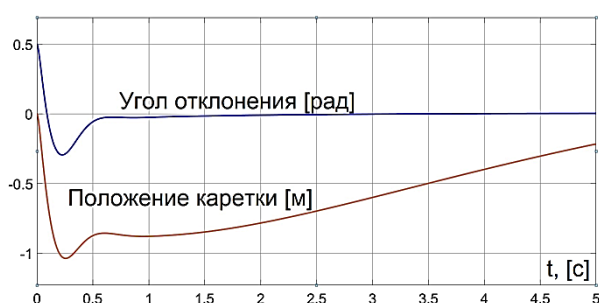


Рис. 6. Осциллограмма выхода маятника

Анализируя рис. 6, мы видим, что время установки составляет 2 секунды. Это значение обусловлено большим значением начального отклонения и малым значением среднегеометрического корня.

Рассмотрим зависимость времени установки от среднегеометрического корня. Для этого проведем серию экспериментов и запишем результаты при начальном угле отклонения равном 0.3 радианы. Результирующий график зависимости представлен на рис. 7.

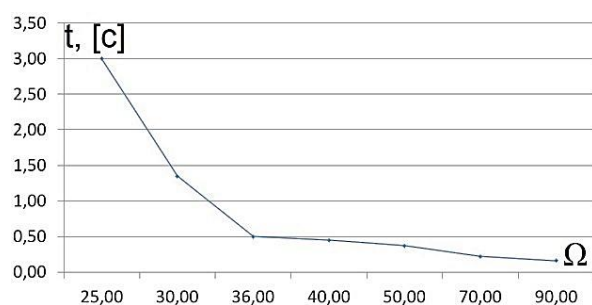


Рис. 7

Результаты экспериментов подтверждают зависимость времени установки от значения среднегеометрического корня.

Далее требуется рассмотреть управление уровнем управляющих воздействий.

В рамках разработанной системы есть возможность управлять уровнем управляющих воздействий с помощью изменения среднегеометрического корня. На рис. 8 показаны результаты экспериментов при изменении Ω и при неизменном стартовом угле в виде зави-

симости максимального уровня управляющих воздействий от значения Ω .

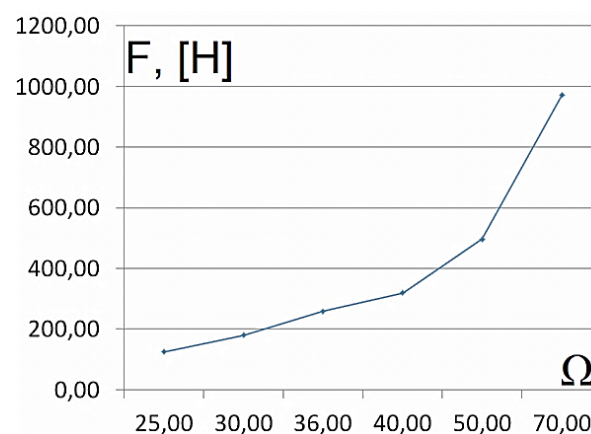


Рис. 8

После аппроксимации полученных данных с помощью типовых регрессий было выяснено, что минимальную ошибку аппроксимации (1.1720%) обеспечивает кубическая регрессия (21).

$$y = -0.0001x^3 + 0.0796x^2 - 0.8741x + 13.5443. \quad (21)$$

Проведенная серия экспериментов подтвердила возможность управления максимальным уровнем воздействия через изменения среднегеометрического корня характеристического уравнения.

Еще одной важной задачей было исследование области притяжения системы управления. Область притяжения является важным параметром, так как иллюстрирует универсальность регулятора.

Для проверки области притяжения был проведен ряд экспериментов, которые показали, что при применении регулятора каретки, оказывающего существенное воздействие на ее положение, она ограничена углом отклонения в 1 радиан.

При превышении данного угла система становится нестабильной и происходит насыщение исполнительного устройства.

Эксперименты, проведенные без использования регулятора каретки, показали, что область притяжения в таком случае меняется. И система начинает работать в двух областях, а именно в окрестности 0 рад и в окрестности π рад.

Но в окрестности угла отклонения в 180 градусов стабилизация происходит около нулевого угла на некотором постоянном значе-

нии, в случае с начальным углом отклонения в 3 рад и Ω равном 40 маятник фиксируется в положении 0.1 рад.

Заключение

В представленной работе была создана система управления сложным объектом (обратный маятник на каретке) на базе полиномиального регулятора с возможностью динамического изменения настроек.

В ходе моделирования синтезированной системы управления и последующих экспериментов была установлена прямая зависимость скорости установки от среднегеометрического корня.

Использование современных инструментов моделирования в виде MATLAB Simulink позволило вести максимально эффективную разработку с последующим анализом качества полученной системы.

Также подтверждена возможность управления уровнем управляющих воздействием, что позволило контролировать насыщение исполнительных устройств.

Дополнительно была исследована область притяжения разработанной системы управления и установлена зависимость ее от регулятора каретки. С применением регулятора каретки область притяжения составляет от 0 рад до 1 рад.

Сравнение полиномиального регулятора с ПИД-регулятором показало, что при малых углах отклонения регулятор работает с сопоставимым качеством, но при увеличении начального угла маятника полиномиальный регулятор работает лучше.

При анализе параметров рассматриваемого регулятора были выделены несколько перспективных направлений для последующих исследований:

- повышение качества предотвращения насыщения исполнительных устройств;
- управление полосой пропускания исходя из спектральных характеристик помех измерений;
- управление быстродействием систем без перенастройки регулятора;

- динамическое управление областью притяжения систем;
- разработка многоальтернативных систем.

Фактически была подтверждена возможность внешнего параметрического управления динамикой процессов, причем описанный регулятор не требует адаптации и обучения (настройки изменяются мгновенно).

Все поставленные задачи были выполнены, и итоговые параметры системы управления удовлетворяют заданным условиям.

Литература

1. Boubaker O. The Inverted Pendulum Benchmark in Nonlinear Control Theory: A Survey // International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013. Volume 10. Issue 5. pp. 1-9.
2. Krishna N. Modeling and controller design of cart inverted pendulum system using MRAC scheme // Frontiers of current trends in engineering and technology. 2016. SI:1, pp. 21 – 24.
3. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления: пер. с англ. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
4. Андриевский Б.Р., Фрадков А.Л. Избранные главы теории автоматического управления с примерами на языке Matlab. СПб.: Наука, 1999. 467 с.
5. Изерман Р. Цифровые системы управления. М.: Мир, 1984. 541 с.
6. Круглов С.П. Адаптивное управление неминимально-фазовым скалярным объектом второго порядка с обеспечением заданных характеристик переходного процесса // Научный вестник НГТУ. 2016. Т. 65. № 4. С. 33-53.
7. Гайдук А.Р. Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления. М.: Физматлит, 2012. 360 с.
8. Ким Д.П. Алгебраические методы синтеза систем автоматического управления. М.: Физматлит, 2014. 164 с.
9. Захватов В.И. Развитие алгебраических методов синтеза систем управления // Некоторые вопросы анализа, алгебры, геометрии и математического образования. 2016. № 5-1. С. 133-134.
10. Михайлузов А.В. К задаче полиномиального синтеза цифровых систем управления. Воронеж: МКМИТУ, 2016. С. 138-142.
11. Тарарькин С.В. Методика проектирования цифровых полиномиальных регуляторов электромеханических систем // Вестник ИГЭУ. 2005. Вып. 3. С. 23-29.
12. ВСПУ. XIII Всероссийское совещание по проблемам управления. 2019. URL: https://vspu2019.ipu.ru/files/vspu/Доклады_ВСПУ-2019/18_В_БК3/ЗахватовВИ.pdf.

Поступила 12.08.2019; принята к публикации 14.10.2019

Информация об авторах

Захватов Владимир Иванович – электроник I категории, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: v.zakhvatov@bk.ru

Подвальный Семён Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

Михайлузов Алексей Вячеславович – студент 2-го курса магистратуры, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: swampDok@gmail.com

IMPROVING THE QUALITY OF CONTROLLING COMPLEX OBJECTS ON THE BASIS OF POLYNOMIAL REGULATORS WITH DYNAMICLY CHANGING SETTINGS

V.I. Zakhvatov, S.L. Podvalny, A.V. Mikhaylusov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the task of improving the quality of managing complex objects based on a polynomial controller with dynamic changes in settings is considered using the example of a backward pendulum on a carriage. A mathematical model of the control object was constructed, a polynomial controller was synthesized using the method of symbolic calculations of systems of differential equations with an additional input for specifying the geometric root from the outside and the PID controller settings for controlling the position of the carriage using the standard MATLAB Simulink tools were selected. To analyze the quality and parameters of the created control system, a reverse pendulum model on the carriage and regulator models were created using the MATLAB Simulink visual modeling environment. As a result of the simulation, a direct dependence of the installation time of the position of the pendulum on the value of the geometric mean root was obtained, which confirms the possibility of external control of the speeds of the presented control system. Also studied and confirmed the possibility of controlling the level of control actions to prevent the saturation of actuators. As a result of the analysis of the control system, several areas were identified for further research: improving the quality of preventing actuator saturation, controlling bandwidth based on the spectral characteristics of measurement noise, managing the speed of systems without adjusting the controller, dynamically controlling the area of attraction of systems, developing multi-alternative systems. In fact, an external parametric control system for the dynamics of processes was created, and the described controller does not require adaptation and training

Key words: control system, polynomial controller, parametric control, inverse pendulum, complex object

References

1. Boubaker O. "The inverted pendulum benchmark in nonlinear control theory: a survey", *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2013, vol. 10, issue 5.
2. Krishna N. "Modeling and controller design of cart inverted pendulum system using MRAC scheme", *Frontiers of Current Trends in Engineering and Technology*, 2016, SI: 1, pp. 21-24.
3. Goodwin G.K., Grebe S.F., Salgado M.E. "Design of management systems", trans. from Eng., Moscow, BINOM, 2004, 911 p.
4. Andrievskiy B.R., Fradkov A.L. "Selected chapters of the theory of automatic control with examples in the Matlab language" ("Izbrannyye glavy teorii avtomaticheskogo upravleniya s primerami na yazyke Matlab"), St. Petersburg, Nauka, 1999, 467 p.
5. Iserman R. "Digital management systems" ("Tsifrovyye sistemy upravleniyam"), Moscow, Mir, 1984, 541 p.
6. Kruglov S.P. "Adaptive control of a non-minimum-phase scalar object of the second order with the provision of the specified characteristics of the transition process", *Scientific Bulletin of Nizhny Novgorod State Technical University (Nauchnyy vestnik NGTU)*, 2016, vol. 65, no. 4, pp. 33-53.
7. Gaiduk A.R. "Theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems" ("Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya"), Moscow, Fizmatlit, 2012, 360 p.
8. Kim D.P. "Algebraic methods for the synthesis of automatic control systems" ("Algebraicheskie metody sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya"), Moscow, Fizmatlit, 2014, 164 p.
9. Zakhvatov V.I. "The development of algebraic methods for the synthesis of control systems", *Some Questions of Analysis, Algebra, Geometry and Mathematical Education (Nekotorye voprosy analiza, algebrы, geometrii i matematicheskogo obrazovaniya)*, 2016, no. 5-1, pp. 133-134.
10. Mikhaylusov A.V. "On the problem of polynomial synthesis of digital control systems" ("K zadache polinomial'nogo sinteza tsifrovyykh sistem upravleniya"), Voronezh, MKMITU, 2016, pp. 138-142.
11. Tararykin S.V. "The methodology of designing digital polynomial regulators of electromechanical systems", *Bulletin of IGEU (Vestnik IGEU)*, 2005, issue 3, pp. 23-29.
12. "VSPU. XIII All-Russian meeting on governance", 2019, available at: https://vspu2019.ipu.ru/files/vspu/Posts_VSPU-2019/18_V_BKZ/Captures_VI.pdf.

Submitted 12.08.2019; revised 14.10.2019

Information about the author

Vladimir I. Zakhvatov, First Category Electronic, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: v.zakhvatov@bk.ru

Semyen L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

Aleksey V. Mikhaylusov, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: swampDok@gmail.com

ОПТИМИЗАЦИОННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ УВОДА ОГРАНИЧЕННО МАНЕВРЕННОГО ВОЗДУШНОГО СУДНА ОТ СТОЛКНОВЕНИЯ С ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ**А.В. Комаров, Е.К. Кичигин****Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия**

Аннотация: в работе обсуждены вопросы формализации задачи увода ограничено маневренного воздушного судна от столкновения с земной поверхностью как задачи оптимального управления в постановке пространственного маневрирования. Рассмотрены вопросы выбора математической модели движения ограничено маневренного воздушного судна, которая существенно определяет последующую вычислительную сложность задачи и реализуемость получаемого аналитического решения в реальном масштабе времени. В качестве прогнозирующей модели движения ограничено маневренного воздушного судна рассматривается решение уравнений движения траекторного или пилотажного уровня, в зависимости от смысла решаемой задачи управления, при «замороженном» положении органов управления, то есть параметров модели движения, имеющих смысл уравнений, которые при прогнозировании задаются постоянными величинами. Наличие аналитического решения в предположении постоянства векторов перегрузки и угловой скорости для уравнений базовой модели траекторного движения ограничено маневренного воздушного судна открывает широкие возможности разработки экономичного в вычислительном отношении алгоритмического обеспечения системы увода ограничено маневренного воздушного судна от столкновения с земной поверхностью, синтезируемого на основе решения задачи предотвращения столкновения как задачи оптимального управления

Ключевые слова: системы предотвращения столкновения с земной поверхностью, воздушное судно, система автоматического управления полетом, алгоритмическое обеспечение

Введение

В последние несколько десятилетий в нашей стране и за рубежом выполнен значительный объем исследований в области предотвращения столкновений воздушных судов (ВС) с земной поверхностью в управляемом полете. Проведенные исследования привели к созданию нескольких типов бортовых систем, реализующих режимы раннего предупреждения приближения к земле, а также индикацию степени опасности окружающего рельефа местности при выполнении полета с формированием рекомендуемых управляющих действий на информационно-управляющем поле кабины ВС.

Одним из результатов выполнения указанных работ стала разработка для маневренных ВС подсистем автоматического/полуавтоматического увода от столкновения с земной поверхностью. Автоматический маневр увода ВС от столкновения с земной поверхностью реализуется системой автоматического управления (САУ) полетом при нарушении границы установленной зоны безопасности низковысотного полета.

Непосредственный перенос таких подсистем на борт ограничено маневренного ВС, в частности военно-транспортного самолета, сталкивается с трудностями ввиду более существенных ограничений на располагаемую нор-

мальную перегрузку, динамические характеристики ВС в продольном канале и ограничения по тяге силовой установки. Для ограничено маневренного ВС более эффективным может оказаться пространственный маневр уклонения от сближения с земной поверхностью, который выполняется с ненулевым креном и заданной перегрузкой.

В представляемой статье обсуждаются вопросы формализации задачи автоматического увода ограничено маневренного ВС от столкновения с земной поверхностью в постановке пространственного маневрирования.

Анализ особенностей решения задачи увода

Автоматические системы предотвращения столкновения с земной поверхностью находят все более широкое применение в составе бортовых комплексов маневренных боевых ВС. В большинстве реализаций маневр увода от земной поверхности представляет собой одновременное управление в каналах крена и нормальной перегрузки. Управление в канале крена имеет целью приведение его к нулевой величине. После достижения креном в процессе уменьшения некоторой пороговой величины в канале перегрузки создается максимально допустимая нормальная перегрузка с целью перевода ВС в набор высоты до достижения заданного угла наклона траектории.

На ограниченно маневренных ВС, в частности, военно-транспортных самолетах, традиционно устанавливаются предупреждающие системы, например, широко распространенную систему EGPWS (усовершенствованная система предотвращения столкновений с земной поверхностью) [1] или ее аналоги [2], которые не имеют функции автоматического увода от столкновения с земной поверхностью. Отсутствие систем автоматического увода от столкновения объясняется, прежде всего, наличием в составе экипажа двух летчиков, которые «резервируют» друг друга, и при получении своевременного предупреждения об опасном сближении с земной поверхностью событие ее пропуска и создания опасной ситуации обоими летчиками маловероятно. С целью заблаговременного информирования первый сигнал предупреждения о возможном столкновении с земной поверхностью (на основе проведенных опытных полетов) обычно формируется за 60 секунд до возможного столкновения. В то же время оборудование военно-транспортных и специальных ВС системами раннего предупреждения об опасном сближении с земной поверхностью не устранило полностью случаи столкновения с земной поверхностью в условиях ограниченной видимости [3, 4]. Таким образом, исследование вопросов информационного и алгоритмического обеспечения систем автоматического увода от столкновения с земной поверхностью ограниченно маневренных ВС представляется актуальным и своевременным, особенно в свете создания нового легкого транспортного самолета Ил-112, предназначенного для решения широкого круга задач, в том числе и при выполнении низковысотных полетов.

Особенности выполнения полета вблизи земной поверхности ограниченно маневренного ВС включают в себя:

1. Наличие ограничений, обусловленных характером выполнения полета ограниченно маневренного ВС, которые могут быть формализованы как ограничения по начальным условиям (траекторным параметрам) выполнения маневра увода от столкновения. Эти ограничения включают в себя ограниченный возможный диапазон углов тангажа ϑ и наклона траектории θ полета ВС рассматриваемого класса, ограничение на вертикальную скорость V_y ВС, а также ограничения на углы крена γ , обусловленные эксплуатационными ограничениями ВС рассматриваемого класса.

2. Ограничения на максимально допустимые значения траекторных параметров в процессе увода, которые существенно жестче, чем

у маневренных ВС. В канале нормальной перегрузки это ограничения на величину нормальной перегрузки n_y и максимальный темп ее создания \dot{n}_y , ограничения на максимально допустимые углы тангажа ϑ и наклона траектории θ ВС, ограничения на максимально допустимый угол крена γ и угловую скорость крена $\dot{\gamma}$, ограничения на минимально допустимую скорость полета $V_{\text{min. доп}}$.

Ограничения первой группы существенно сужают область начальных условий и позволяют выделить для отработки алгоритмического обеспечения режимы прямолинейного полета (горизонтальный полет и полет с типовыми эксплуатационными углами наклона траектории), а также установившиеся развороты с типовыми эксплуатационными углами крена в горизонтальном полете и полете с типовыми эксплуатационными углами наклона траектории.

Таким образом, область начальных состояний для выполнения маневра увода от столкновения с земной поверхностью ограниченно маневренного ВС существенно «уже» области для маневренных ВС. Ограничения второй группы существенно влияют на располагаемые варианты синтеза траекторий увода ВС от столкновения.

Создание максимально допустимой нормальной перегрузки САУ для перевода ограниченно маневренного самолета в набор высоты с заданным углом наклона траектории может привести к преждевременному увеличению высоты полета ВС и невыполнению воздушным судном той целевой задачи, которая им решается в маловысотном полете над пересеченной местностью (высокоточное десантирование грузов, сброс огнегасящей жидкости в очаг пожара и др.).

Необходимость учета указанной группы ограничений имеет следствием поиск иных вариантов синтеза траекторий увода ограниченно маневренного ВС от столкновения с земной поверхностью, отличных от варианта, реализуемого маневренным ВС.

Для ограниченно маневренных ВС, с ограниченной располагаемой тягой и скороподъемностью, с невысокой скоростью полета над пересеченной местностью боковой маневр для предотвращения столкновения с рельефом во многих случаях является более предпочтительным. Такая постановка задачи предполагает формирование оптимальной пространственной траектории увода ограниченно маневренного ВС от столкновения с земной поверхностью на основе учета характеристик поля вы-

сот рельефа местности, хранящейся в цифровом виде в бортовом комплексе ВС.

Решению задачи построения траекторий оптимального безопасного маневрирования ВС вблизи земной поверхности посвящено большое число работ [5, 6, 7]. Так, в настоящее время ведутся исследования по применению метода силового поля для решения задачи предотвращения столкновения ВС в воздухе и с земной поверхностью. В методе силового поля каждое ВС рассматривается как заряженная частица и силы отталкивания ВС, как заряженных частиц, используются для определения траектории маневра, который каждое из ВС выполняет для предотвращения столкновения [5].

Искусственная потенциальная функция (APF), хотя и не является синонимом подхода силового поля, но подобна ей по структуре и может использоваться для решения задачи предотвращения столкновения в воздухе и с земной поверхностью. Институт технологий ВВС США (AFIT) выполнил ряд научно-исследовательских работ по адаптации APF к решению задач предотвращения столкновений в воздухе и с земной поверхностью [6, 7].

В подходах AFIT по применению APF все компоненты задачи рассматриваются как потенциальные поля, где потенциальные препятствия (земная поверхность или ВС приближающееся к Земле) моделируются как источники сил отталкивания, которых необходимо избегать, а навигационные точки полетного задания моделируются как точки притяжения (ППМ, цели, аэродромы или другие целевые точки полета).

Оптимизационная постановка задачи предотвращения столкновения с земной поверхностью, в которой для формализации задачи оптимизации используются математические модели динамики ВС, траекторные ограничения и границы зоны выполнения безопасного низковысотного полета широко известны.

Решением задачи являются сигналы оптимального управления, которые минимизируют заданный целевой функционал и при этом удовлетворяют динамическим ограничениям, которые обусловлены уравнениями движения ВС и траекторными ограничениям.

В ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского исследование этих вопросов велось разными научными школами, среди которых необходимо отметить работы учеников академика А.А. Красовского по решению задач оптимизации при неклассических целевых функционалах обобщенной работы [8], школы профессора Ю.А. Кочеткова [9] и В.П. Тараненко [10].

Рассматривался оптимизационный подход и в зарубежных исследованиях [6].

Использование метода оптимального управления гарантирует, что найденное оптимальное решение потребует минимального расхода управления (в предположении глобальной сходимости алгоритмов решения), потому что оно минимизирует целевой функционал, обычно включающий квадратичные затраты на управление. Однако в этом случае ВС может оказаться сколь угодно близко к границам ограничений, а способность решать задачу оптимального управления с частотой 10 – 12 Гц может потребовать очень больших вычислительных ресурсов.

Рассмотрим вопросы выбора математической модели движения ВС, которая существенно определяет последующую вычислительную сложность задачи и реализуемость получаемого оптимального решения в реальном масштабе времени.

Модель динамики ВС

Одним из ключевых вопросов в задаче увода от столкновения с земной поверхностью является вопрос выбора математической модели динамики ВС, которая должна удовлетворять следующим требованиям:

- обеспечивать адекватность прогнозирования движения ВС для идентификации потенциально опасных ситуаций нарушения границы зоны безопасного полета вблизи земной поверхности;
- обеспечивать формирование требуемых управляющих сигналов при решении оптимизационной задачи, имеющих ясный физический смысл;
- минимизировать вычислительные затраты на решение оптимизационной задачи в реальном масштабе времени.

Прогнозирующие модели движения траекторного и пилотажного уровней активно исследовались в рамках научной школы по оптимальному управлению полетом ВС, созданной академиком А.А. Красовским во время, когда он был начальником кафедры Пилотажно-навигационных комплексов ЛА ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, т.е. с конца 60-х и до конца 90-х годов XX столетия [11, 12]. Причиной этого является тот факт, что наиболее эффективным алгоритмом реализации метода оптимального управления, минимизирующего функционал обобщенной работы А.А. Красовского, является так называемый алгоритм с прогнозирующей моделью. В качестве прогнозирующей модели движения ВС рассматрива-

ется решение уравнений движения (траекторного или пилотажного уровня, в зависимости от смысла решаемой задачи управления) при «замороженном» положении «органов» управления (т.е. параметров модели движения, имеющих смысл управлений, которые при прогнозировании задаются постоянными величинами). Теория оптимального управления с прогнозированием наиболее полно рассмотрена в монографии профессора В.Н. Букова [13].

Эффективность алгоритмического обеспечения оптимальных систем управления в постановке А.А. Красовского определялась вычислительными затратами на получение решения уравнений прогнозирующей модели. Естественно, что минимальные вычислительные затраты будут в случае, если уравнения прогнозирующей модели будут иметь аналитическое решение. В конце 1987 г. А.А. Красовский получил решение уравнений динамики и кинематики движения ЛА при условии постоянства векторов перегрузки и угловой скорости вращения ЛА в проекциях на оси связанной системы координат, которое он назвал «спиральным прогнозом» [14].

Для решения задач траекторного управления желательно сразу получать аналитическое решение параметров движения в траекторной системе координат. Распространение методического подхода А.А. Красовского с «замораживанием» ряда траекторных параметров для получения аналитического решения позволило получить аналитическое решение и в случае записи уравнений движения в траекторной системе координат [15, 16].

Полученное решение по аналогии с первоисточником получило название «траекторный» прогноз. Рассмотрим систему уравнений, описывающих движение ВС в траекторной системе координат:

$$\dot{V}_k(t) = g(n_{xk}(t) - \sin \theta(t)); \quad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = g(n_{yk}(t) \cos \gamma(t) - \cos \theta(t)) / V_k(t); \\ \dot{\Psi}(t) = -g n_{yk}(t) \sin \gamma(t) / (V_k(t) \cos \theta(t)); \end{cases} \quad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_g(t) = V_k(t) \cos \theta(t) \cos \Psi(t); \\ \dot{y}_g(t) = V_k(t) \sin \theta(t); \\ \dot{z}_g(t) = -V_k(t) \cos \theta(t) \sin \Psi(t), \end{cases} \quad (3)$$

где V_k – модуль земной скорости ВС; $\bar{n} = [n_{xk} \ n_{yk} \ 0]^T$ – вектор перегрузки в проекции на оси траекторной системы координат; θ – угол наклона траектории ВС; Ψ – путевой

угол траектории ВС; γ – скоростной угол крена; $[x_g(t) \ y_g(t) \ z_g(t)]^T$ – вектор координат местоположения ВС в проекции на оси нормальной земной системы координат в момент времени t ; остальные обозначения соответствуют выше приведенным. Введем в рассмотрение матрицу направляющих косинусов перехода от осей траекторной системы координат к осям нормальной системы координат ε_k :

$$\varepsilon_k = \begin{bmatrix} \cos \Psi \cos \theta & -\cos \Psi \sin \theta & \sin \Psi \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin \Psi \cos \theta & \sin \Psi \sin \theta & \cos \Psi \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Тогда уравнения кинематики углового траекторного движения ВС могут быть записаны в виде:

$$\dot{\varepsilon}_k^T = \Omega_k \varepsilon_k^T; \quad (5)$$

$$\Omega_k = \begin{bmatrix} 0 & \omega_{zk} & -\omega_{yk} \\ -\omega_{zk} & 0 & \omega_{xk} \\ \omega_{yk} & -\omega_{xk} & 0 \end{bmatrix}, \quad (6)$$

где

$$\omega_{xk} = \dot{\Psi} \sin \theta, \quad \omega_{yk} = \dot{\Psi} \cos \theta, \quad \omega_{zk} = \dot{\theta}; \quad (7)$$

Ω_k – квадратичная, кососимметричная матрица Пуассона для этой пары систем координат. С учетом введенной матрицы направляющих косинусов уравнение (1) может быть записано в следующем векторно-матричном виде:

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_k(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = g \left(\begin{bmatrix} n_{xk}(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - A \begin{bmatrix} \varepsilon_{k21}(t) \\ \varepsilon_{k22}(t) \\ \varepsilon_{k23}(t) \end{bmatrix} \right), \quad (8)$$

где $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$, а уравнение (3) как

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_g(t) \\ \dot{y}_g(t) \\ \dot{z}_g(t) \end{bmatrix} = \varepsilon_k(t) \begin{bmatrix} V_k(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}. \quad (9)$$

Предположим, что компоненты матрицы Ω_k постоянны в течении некоторого интервала времени, тогда для уравнения (5) существует аналитическое решение, формируемое матрицей-экспонентой системы линейных однородных дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами:

$$\varepsilon_k^T(t) = \left[E_{3 \times 3} + \frac{\sin(|\bar{\omega}_k| \Delta t)}{|\bar{\omega}_k|} \Omega_k + \left(\frac{1 - \cos(|\bar{\omega}_k| \Delta t)}{|\bar{\omega}_k|^2} \right) \Omega_k^2 \right] \varepsilon_k^T(t_0), \quad (10)$$

где $|\bar{\omega}_k|$ - модуль траекторной угловой скорости вращения ЛА, остальные обозначения соответствуют ранее введенным.

При постоянстве траекторной угловой скорости и предположении об известном аналитическом законе изменения продольной траекторной перегрузки n_{xk} можно получить аналитическое решение для земной скорости полета. Обозначим матрицу-экспоненту из (10) следующим образом:

$$\Phi(t) = \left[E_{3 \times 3} + \frac{\sin(|\bar{\omega}_k| t)}{|\bar{\omega}_k|} \Omega_k + \left(\frac{1 - \cos(|\bar{\omega}_k| t)}{|\bar{\omega}_k|^2} \right) \Omega_k^2 \right]. \quad (11)$$

Если дополнительно предположить, что $n_{xk} = const$, то получаем решение системы (1) как системы линейных неоднородных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_k(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V_k(t_0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + g \begin{bmatrix} n_{xk} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \Delta t - A \cdot \Phi_1(\Delta t) \begin{bmatrix} \varepsilon_{k21}(t_0) \\ \varepsilon_{k22}(t_0) \\ \varepsilon_{k23}(t_0) \end{bmatrix}; \\ \Phi_1(t) &= t E_{3 \times 3} + \left(\frac{1 - \cos(|\bar{\omega}_k| t)}{|\bar{\omega}_k|^2} \right) \Omega_k + \\ &+ \frac{1}{|\bar{\omega}_k|^2} \left(t - \frac{\sin(|\bar{\omega}_k| t)}{|\bar{\omega}_k|} \right) \Omega_k^2. \end{aligned} \quad (12)$$

В случае известного закона изменения продольной перегрузки $n_{xk} = n_{xk}(t)$ решение (1) записывается в виде:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} V_k(t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} V_k(t_0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \\ &+ g \begin{bmatrix} \Phi_{n_{xk}}(\Delta t) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - A \cdot \Phi_1(\Delta t) \begin{bmatrix} \varepsilon_{k21}(t_0) \\ \varepsilon_{k22}(t_0) \\ \varepsilon_{k23}(t_0) \end{bmatrix}; \quad (13) \\ \Phi_{n_{xk}}(\Delta t) &= \int_0^{\Delta t} n_{xk}(\tau) d\tau. \end{aligned}$$

Подставляя (10) и (12) в (9), получаем:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} \dot{x}_g(\tau) \\ \dot{y}_g(\tau) \\ \dot{z}_g(\tau) \end{bmatrix} &= \varepsilon_k(t_0) \Phi^T(\tau) \left\{ \begin{bmatrix} V_k(t_0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \right. \\ &+ g \left. \begin{bmatrix} n_{xk} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tau - A \cdot \Phi_1(\tau) \begin{bmatrix} \varepsilon_{k21}(t_0) \\ \varepsilon_{k22}(t_0) \\ \varepsilon_{k23}(t_0) \end{bmatrix} \right\}, \quad (14) \end{aligned}$$

где τ - приращение времени относительно t_0 . Интегрируя (14), получаем следующее аналитическое решение:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_g(t) \\ y_g(t) \\ z_g(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_g(t_0) \\ y_g(t_0) \\ z_g(t_0) \end{bmatrix} + \varepsilon_k(t_0) \int_0^{\Delta t} \Phi^T(\tau) d\tau \begin{bmatrix} V_k(t_0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \\ &+ g \varepsilon_k(t_0) \int_0^{\Delta t} \tau \Phi^T(\tau) d\tau \begin{bmatrix} n_{xk} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \\ &- g \varepsilon_k(t_0) \int_0^{\Delta t} \Phi^T(\tau) A \Phi_1(\tau) d\tau \begin{bmatrix} \varepsilon_{k21}(t_0) \\ \varepsilon_{k22}(t_0) \\ \varepsilon_{k23}(t_0) \end{bmatrix}; \end{aligned} \quad (15)$$

или

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} x_g(t) \\ y_g(t) \\ z_g(t) \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} x_g(t_0) \\ y_g(t_0) \\ z_g(t_0) \end{bmatrix} + \varepsilon_k(t_0) \Phi_1^T(\Delta t) \begin{bmatrix} V_k(t_0) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} + \\ &+ g \varepsilon_k(t_0) \left(\Phi_2(\Delta t) \begin{bmatrix} n_{xk} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} - \Phi_3(\Delta t) \begin{bmatrix} \varepsilon_{k21}(t_0) \\ \varepsilon_{k22}(t_0) \\ \varepsilon_{k23}(t_0) \end{bmatrix} \right), \end{aligned}$$

где

$$\begin{aligned} \Phi_2(\Delta t) &= \frac{\Delta t^2}{2} E_{3 \times 3} - \\ &- \frac{1}{|\bar{\omega}_k|^3} \left(\sin(|\bar{\omega}_k| \Delta t) - |\bar{\omega}_k| \Delta t \cos(|\bar{\omega}_k| \Delta t) \right) \Omega_k + \\ &+ \frac{1}{|\bar{\omega}_k|^2} \left(\frac{\Delta t^2}{2} - \frac{|\bar{\omega}_k| \Delta t \sin(|\bar{\omega}_k| \Delta t) + \cos(|\bar{\omega}_k| \Delta t) - 1}{|\bar{\omega}_k|^2} \right) \Omega_k^2; \\ \Phi_3(\Delta t) &= \int_0^{\Delta t} (\Phi^T(\tau) A \Phi_1(\tau)) d\tau. \quad (16) \end{aligned}$$

Отметим, что уравнения (7), определяющие условия постоянства вектора угловой скорости, могут быть ослаблены с сохранением аналитичности получаемого решения. Исследование этого вопроса будет изложено в последующих публикациях.

В общем виде структура системы автоматического управления, для обеспечения которой используется рассматриваемая модель, продемонстрирована на рисунке.

Автоматическое управление полетом осуществляется САУ без участия или под контролем летчика (экипажа). Известно, что полное движение ВС состоит из движения вокруг центра масс (три степени свободы) и движения центра масс (три степени свободы). Контуры управления угловыми движениями (вокруг центра масс) являются внутренними контурами САУ. Движением центра масс управляют другие элементы САУ, которые относятся к внешним контурам управления или траектор-

ной части. Так как управление движением центра масс осуществляется через изменение угловых положений ВС, то внутренний контур управления является составной частью внешнего (траекторного) контура.



Структура системы автоматического управления

Наличие аналитического решения (10) – (17) для уравнений базовой модели траекторного движения ВС (1) – (7) открывает широкие возможности разработки экономичного в вычислительном отношении алгоритмического обеспечения системы увода ограниченно маневренного ВС от столкновения с земной поверхностью, синтезируемого на основе решения задачи предотвращения столкновения как задачи оптимального управления. Актуальные для ограниченно-маневренного ВС ограничения на максимально допустимые значения траекторных параметров в процессе увода, должны быть учтены при синтезе структуры целевого функционала задачи оптимизации.

Выводы

В представленной статье обсуждены вопросы формализации задачи увода ограниченно маневренного ВС от столкновения с земной поверхностью как задачи оптимального управления в постановке пространственного маневрирования. Для разработки алгоритмического обеспечения системы автоматического увода предложено использовать модель траекторного движения ВС, имеющую явное аналитическое решение в предположении постоянства векторов перегрузки и угловой скорости.

Литература

1. Honeywell. 2004 MK VI and MK VIII Enhanced Ground Proximity Warning System (EGPWS) Pilot's Guide.
2. Hook, Loyd and Mark Skoog. Auto GCAS Flight Test Briefing to the NTSB, 2012.
3. Правила расследования авиационных происшествий и инцидентов с гражданскими воздушными судами в Российской Федерации. Постановление Правительства РФ № 1013 от 07 декабря 2011 г. // Российская газета. № 286. 20.12.2011.
4. Federal Aviation Administration (FAA). Safer Skies General Aviation (GA) Controlled Flight into Terrain (CFIT) Joint Safety Implementation Team (JSIT) Final Report. Feb 2000.
5. Kuchar J.K., Yang L.C. A Review of Conflict Detection and Resolution Modeling Methods. IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, 1(4):179-189, 2000.
6. Angela W. Suplisson. Optimal Recovery Trajectories for Automatic Ground Collision Avoidance Systems (Auto GCAS). Dissertation, Department of the Air Force Air University, Air Force Institute of technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, March 2015.
7. Stickney, Heather M. Performance Characterization, Development, and Application of Artificial Potential Function Guidance Methods. Master's thesis, Air Force Institute of Technology, Mar 2014.
8. Красовский А.А. Об одном обобщении задачи аналитического конструирования систем управления // Проблемы управления и теории информации. 1976. № 5(1).
9. Научно-методические материалы авиационного оборудования / под ред. Ю.А. Кочеткова. М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 1977.
10. Тараненко В.Т., Момджи В.Г. Прямой вариационный метод в краевых задачах динамики полета. М.: Машиностроение, 1986. 128 с.
11. Красовский А.А. Обобщение задачи аналитического конструирования регуляторов при заданной работе управлений и управляющих сигналов // Автоматика и телемеханика. 1969. № 7.
12. Красовский А.А. Аналитическое конструирование систем автоматического регулирования по критерию обобщенной работы // Изв. АН СССР, Техн. кибернетика. 1970. № 3. С. 164 – 175.
13. Буков В.Н. Адаптивные прогнозирующие системы управления полетом. М.: Наука, 1987.
14. Красовский А.А. Метод быстрого численного интегрирования одного класса динамических систем // Изв. АН СССР, Техн. кибернетика. 1989. № 1. С. 3 – 14.
15. Головинский А.Н., Наумов А.И. Аналитическое решение задач оптимального траекторного управления летательным аппаратом // Изв. АН СССР, Техн. кибернетика. 1989. № 6. С. 93 – 100.
16. Наумов А.И. Применение аналитических прогнозирующих моделей в системах управления летательных аппаратов и авиационных тренажерах // АиТ. 2001. № 7. С. 178-187.

Поступила 09.09.2019; принята к публикации 15.10.2019

Информация об авторах

Комаров Артем Валерьевич – адъюнкт, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8(951)5409420, e-mail: artem.komarov.1987@inbox.ru

Кичигин Евгений Константинович - канд. техн. наук, доцент кафедры, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), тел. 8(900)9248430, e-mail: kichigin92@yandex.ru

OPTIMIZATION SOLUTION TO THE PROBLEM OF REMOVING A LIMITED MANEUVERABLE AIRCRAFT FROM COLLISION WITH EARTH SURFACE

A.V. Komarov, E.K. Kichigin

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

Abstract: the paper discusses the formalization of the task of withdrawing a limited maneuverable aircraft from a collision with the earth's surface as optimal control tasks in the formulation of spatial maneuvering. The problems of choosing a mathematical model of the movement of a limited maneuverable aircraft, which significantly determines the subsequent computational complexity of the problem and the feasibility of the resulting analytical solution in real time, are considered. As a predictive model of the movement of a limited maneuverable aircraft, we consider the solution of the equations of motion of the trajectory or aerobatic level, depending on the meaning of the control problem being solved, with the “frozen” position of the controls, that is, the parameters of the motion model that have the meaning of equations that are set by constant values during forecasting. The presence of an analytical solution under the assumption of constancy of the overload vectors and angular velocity for the equations of the basic model of trajectory motion of a limited maneuverable aircraft opens up wide possibilities for developing a computationally cost-efficient algorithmic support for a system for removing a limited maneuverable aircraft from a collision with the earth's surface, synthesized based on the solution to the collision avoidance problem as optimal control problems

Key words: systems of prevention of collision with a terrestrial surface, aircraft, system of an automatic flight control, algorithmic providing

References

1. Honeywell “MK VI and MK VIII enhanced ground proximity warning system (EGPWS) pilot's guide”, 2004
2. Hook L., Skoog M. "Auto GCAS flight test briefing to the NTSB", 2012.
3. “Rules of investigation of aviation incidents and incidents with civil aircrafts in the Russian Federation”, resolution of the Government of the Russian Federation No. 1013 of December 07, 2011. *Russian Newspaper*, No. 286, 20.12.2011
4. Federal Aviation Administration (FAA). "Safer skies General Aviation (GA) Controlled Flight into Terrain (CFIT) Joint Safety Implementation Team (JSIT) Final Report". Feb 2000.
5. Kuchar J.K., Yang L.C. "A review of conflict detection and resolution modeling methods", *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 2000, vol. 1(4), pp. 179-189
6. Angela W. “Suplisson. Optimal recovery trajectories for automatic ground collision avoidance systems (Auto GCAS)”, dissertation, Department of the Air Force Air University, Air Force Institute of technology, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, March 2015.
7. Stickney H.M. “Performance characterization, development, and application of artificial potential function guidance methods”, Master's thesis, Air Force Institute of Technology, Mar 2014.
8. Krasovskiy A.A. “About one generalization of a problem of analytical designing of control systems”, *Problems of management and theory of information (Problemy upravleniya i teorii informatsii)*, 1976, no. 5(1).
9. Yu.A. Kochetkov ed. “Scientific and methodical materials of the aviation equipment” (“Nauchno-metodicheskie materialy aviatsionnogo oborudovaniya”), Moscow, N.E. Zhukovsky VVIA, 1977.
10. Taranenko V.T., Momdzhhi V.G. “A direct variation method in regional problems of dynamics of flight” (“Pryamoy variatsionnyy metod v krayevykh zadachakh dinamiki poleta”), Moscow, Mashinostroenie, 1986, 128 p.
11. Krasovskiy A.A. “Generalization of a problem of analytical designing of regulators during the set work of managements and the operating signals”, *Automatic Equipment and Telemechanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 1969, no. 7.
12. Krasovskiy A.A. “Analytical designing of systems of automatic control by criterion of the generalized work”, *News of Academy of Sciences of the USSR (Izv. AN SSSR, Tekhn. kibernetika)*, 1970, no. 3, pp.164-175.
13. Bukov V.N. “The adaptive predicting control systems of flight” (“Adaptivnye prognoziryushchie sistemy upravleniya poletom”), Moscow, Nauka, 1987.
14. Krasovskiy A.A. “Method of fast numerical integration of one class of dynamic systems”, *News of Academy of Sciences of the USSR (Izv. AN SSSR, Tekhn. kibernetika)*, 1989, no. 1, pp. 3-14.
15. Golovinskiy A.N., Naumov A.I. “Analytical solution of problems of optimum trajectory control of the aircraft”, *News of Academy of Sciences of the USSR (Izv. AN SSSR, Tekhn. kibernetika)*, 1989, no. 6, pp. 93-100.
16. Naumov A.I. “Application of the analytical predicting models in control systems of aircraft and aviation exercise machines”, *AiT*, 2001, no. 7, pp. 178-187.

Submitted 09.09.2019; revised 15.10.2019

Information about the authors

Artem V. Komarov, Graduated Student, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E.Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 Starykh Bol'shevikov, Voronezh 394064, Russia), tel. 8(951)5409420, e-mail: artem.komarov.1987@inbox.ru

Evgeniy K. Kichigin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E.Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 Starykh Bol'shevikov, Voronezh 394064, Russia), tel. 8(900)9248430, e-mail: kichigin92@yandex.ru

РАЗРАБОТКА МОДЕЛИ ДЛЯ УЛУЧШЕНИЯ ПЛАНИРОВАНИЯ ЗАДАЧ В ОБЛАЧНЫХ ВЫЧИСЛЕНИЯХ НА ОСНОВЕ ОПТИМИЗАЦИИ РОЯ ЧАСТИЦ**Ходар Алмосана¹, Э.К. Алгазинов¹, Е.Н. Десятирикова^{1,2}, Ияд Алхаят³**¹Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия³Университет Дамаска, г. Дамаск, Сирия

Аннотация: облачные вычисления — это новый вид общей инфраструктуры, которая может подключать огромные пулы систем, предоставляет пользователям разнообразные ресурсы хранения и вычислительные ресурсы через Интернет. Наиболее важным требованием в среде облачных вычислений является планирование задач, которое играет ключевую роль в эффективности всех средств облачных вычислений. Планирование задач в облачных вычислениях означает выделение наиболее подходящих ресурсов для выполнения задачи с учетом различных параметров, таких как время, стоимость, масштабируемость, интервал выполнения, надежность, доступность, пропускная способность, использование ресурсов и так далее. Большинство существующих алгоритмов оптимизации сосредоточены только на одном аспекте. В этой статье мы разрабатываем комплексную многоцелевую модель для оптимизации планирования задач, чтобы минимизировать время передачи задач, время выполнения задач и стоимость выполнения задач. Однако целевые функции в этой модели конфликтуют друг с другом. Учитывая этот факт и превосходство алгоритма оптимизации роя частиц (ОРЧ) по скорости и точности, мы разработали многоцелевой алгоритм, основанный на методе ОРЧ, чтобы обеспечить оптимальное решение для предложенной модели. Результаты эксперимента свидетельствуют о том, что предлагаемый способ более эффективен и экономичен во времени и стоимости

Ключевые слова: облачные вычисления, оптимизация роя частиц, стратегия планирования, балансировка нагрузки, виртуальные машины, виртуализация

Введение

Облачные вычисления определяются национальным институтом стандартов и технологий (NIST) как “модель обеспечения удобного сетевого доступа по требованию к общему пулу настраиваемых вычислительных ресурсов, которые могут быть быстро подготовлены и выпущены с минимальными усилиями” [1]. Хотя облачные вычисления предоставляют различные услуги, но есть несколько проблем, с которыми они сталкиваются. Среди этих проблем основная такова: чтобы планировать задачи для адаптируемых ресурсов, надо устанавливать правильную последовательность [2]. Алгоритмы планирования в распределительных системах обычно имеют цель распределить нагрузку на процессоры и максимизировать их использование при минимизации общего времени выполнения задачи.

В облачных вычислениях существует много исследований, посвященных планированию ресурсов для повышения эффективности облачных вычислений [3]. Большинство из этих исследований уменьшают стоимость, время ожидания, время выполнения, использование ресурсов, время туда-обратно. Но не учитывает

другие важные параметры, такие как надежность, доступность, скорость и масштабируемость. Сложность планирования является основным фактором, усложняющим работу с ресурсами [4].

В [5] сформулирована модель для планирования задач и предложен алгоритм оптимизации роя частиц (ОРЧ), основанный на правиле малого значения позиции для минимизации затрат на обработку. Автор сравнил его алгоритм со стандартным алгоритмом ОРЧ и с алгоритмом ОРЧ, встроенным в кроссовер и мутацию. Результаты эксперимента показывают, что алгоритм ОРЧ не только сходится быстрее, но и работает быстрее, чем два других алгоритма в больших масштабах.

В [6] авторы предложили гибридную оптимизацию роя частиц и алгоритм колонии муравьев. Инструментарий CloudSim был использован для реализации и анализа предложения. Алгоритм метаэвристики (PBM), основанный на населении, максимизирует использование ресурсов и минимизирует продолжительность работы, демонстрируя улучшения более чем на 53%.

В этой статье рассматривается проблема планирования задач, в которой рассматриваются несколько целей. Наши вклады можно резюмировать следующим образом:

1. Разработать новую многоцелевую модель планирования задач, чтобы минимизировать как время выполнения задачи и время передачи, так и стоимость выполнения задачи
2. Разработать алгоритм на основе ОРЧ для решения предложенной модели планирования задач
3. Оценить нашу модель, используя MATLAB и сравнив результаты.

Постановка задачи

В облачных вычислениях, с одной стороны, существует множество виртуальных машин, которые имеют различную емкость вычислений и хранилищ; с другой стороны, плата за использование зависит от емкости виртуальной машины и объема передаваемых данных. Таким образом, проблема назначения задачи может быть описана как назначение всей задачи всем виртуальным машинам в среде облачных вычислений, чтобы минимизировать общую стоимость, время передачи задач и время выполнения задач.

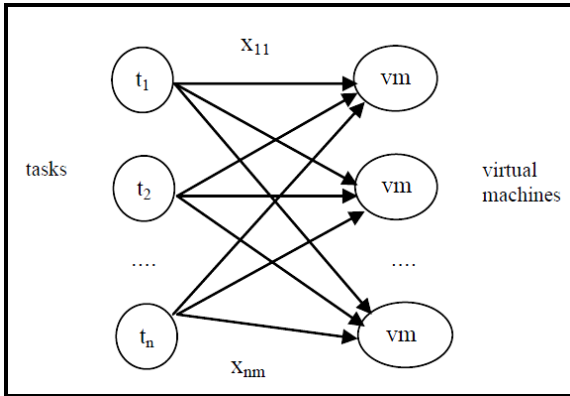


Рис. 1. Назначение задач виртуальных машин

Есть N задач и M набор виртуальных машин. Каждая задача может быть выделена любой виртуальной машиной. На рис. 1 показано сопоставление задач виртуальным машинам. Оптимизация роя частиц (ОРЧ) пытается выбрать оптимальное распределение задач по виртуальным машинам для достижения цели.

Математическая модель для планирования задач

Чтобы сформулировать планирование задач, определим n как набор независимых задач $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_n\}$; t_i как задача номер i , где $1 \leq i \leq n$. m — это количество виртуальных

машин $VM = \{vm_1, vm_2, vm_3, \dots, vm_m\}$, CPU_k — это емкость виртуальной машины номер k , где $1 \leq k \leq m$. B_{ik} представляет полосу пропускания между задачей i и виртуальной машиной номер k , где $i, k = \{1, 2, 3, \dots, m\}$. Значение $x_{ik} = 1$, если задача i назначена на VM_k , и $x_{ik} = 0$ в противном случае. DE_i — это длина задачи, которую необходимо выполнить.

DT_{ik} представляет объем данных обмена между задачей i , которая является генератором передаваемых данных, и VM_k , которая выполняет её.

Таким образом, мы можем рассчитать время выполнения всех задач, назначенных виртуальным машинам, как показано в уравнении 1:

$$T_{exe} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} \times \frac{DE_i}{CPU_k}. \quad (1)$$

Время передачи — это время передачи данных задачи на виртуальную машину и возврата их в центр через полосу пропускания, соединяющую их, как показано в уравнении 2:

$$T_t = 2 * \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} \times \frac{DT_{ik}}{B_{ik}} \right). \quad (2)$$

Общее время является результатом объединения времени выполнения со временем передачи, как показано в уравнении 3:

$$Total(T) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} \times \frac{DE_i}{CPU_k} + 2 * \left(\sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} \times \frac{DT_{ik}}{B_{ik}} \right). \quad (3)$$

В соответствии со стандартом тарификации Amazon EC2 определяем P_{OUT} как стоимость передачи данных из виртуальной машины, а P_{IN} — как стоимость передачи данных на виртуальную машину. Таким образом, общая стоимость передачи данных будет как в уравнении 4:

$$C_i = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} \times (DT_{ij} \times P_{OUT} + DT_{ij} \times P_{IN}), \quad (4)$$

P_k — это стоимость обработки стандартного метода малого размера по требованию, поэтому C_{exe} вычисляет общую стоимость обработки.

$$C_{exe} = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^m x_{ik} \times \frac{DE_i}{CPU_k} \times P_k . \quad (5)$$

Если $Total(C)$ — общая стоимость, которая является суммой затрат на передачу и обработку данных; то наша фитнес-функция будет, как видно в уравнении 7:

$$Total(C) = C_{exe} + C_t , \quad (6)$$

$$FitnessF = Total(T) + Total(C) . \quad (7)$$

Предположим, что длина и стоимость выполнения известны для задачи i , выполняемой в VM_k , также время и стоимость передачи известны для передачи данных из i -го узла в j -й узел. Наша цель состоит в том, чтобы распределить все задачи по всем виртуальным машинам с минимизацией общего времени и затрат. Все ограниченные условия показаны в (8), (9).

$$\sum_{k=1}^m x_{ik} = 1, \forall i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

$$x_{ik} \in \{0, 1\}, \forall i, k \quad (9)$$

Алгоритм оптимизации роя частиц

Алгоритм оптимизации роя частиц (ОРЧ) — это алгоритм поиска оптимального решения, основанный на моделировании социального поведения птиц в стае, предложенный Кеннеди и Эберхартом. Каждый кандидат на решение, называемый «частицей», летит в пространстве поиска проблем в поисках оптимальной позиции для посадки. Два фактора характеризуют состояние частицы в пространстве поиска: ее положение и скорость [7].

Первоначально алгоритм ОРЧ генерирует набор из N решений, называемых частицами, случайным образом в D -мерном пространстве поиска. Каждая частица представлена D -мерным вектором X_i , где i находится в диапазоне от 1 до N . Каждый X_i имеет размерность d , обозначающую его местоположение $(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{id})$ в пространстве. Скорость каждой частицы v ограничена значениями v_{\min} и v_{\max} , и ее положение x обновляется в соответствии со следующими уравнениями:

$$v_{id}^{n+1} = w * v_{id}^n + c_1 * rand_1 * (pbest_{id}^n - x_{id}^n) + c_2 * rand_2 * (gbest_d^n - x_{id}^n) \quad (10)$$

$$x_{id}^{n+1} = x_{id}^n + v_{id}^{n+1} \quad (11)$$

где i — номер частицы, $i = 1, 2, \dots, N$.

n — номер итерации, $n = 1, 2, \dots, iter_{\max}$.

v_{id}^n — скорость частицы i на итерации n .

v_{id}^{n+1} — скорость частицы i на итерации

$n+1$.

x_{id}^n — текущее положение частицы i в итерации n .

x_{id}^{n+1} — текущее положение частицы i в итерации $n+1$.

w — инерционный вес.

c_1, c_2 — коэффициенты ускорения.

r_1, r_2 — случайное число от 0 до 1.

$pbest_{id}^n$ — лучшая позиция частицы i .

$gbest_d^n$ — положение лучшей частицы в популяции.

Уравнение (10) используется для расчета новой скорости частицы в соответствии с ее предыдущей скоростью и расстояниями ее текущего положения от ее собственного, лучшего предыдущего положения. Затем частица летит в новое положение, согласно уравнению (11). Производительность каждой частицы измеряется в соответствии с заранее определенной целевой функцией, которая обычно пропорциональна функции стоимости.

Оптимизация роя частиц для планирования задач

В этом разделе мы опишем формулировки алгоритма ОРЧ для назначения задачи. Одним из ключевых вопросов при разработке успешного алгоритма ОРЧ является этап представления, то есть нахождения подходящего отображения между решением проблемы и частицей ОРЧ. В этой статье мы устанавливаем пространство поиска из N измерений для N задач. Каждое измерение имеет дискретный набор возможных значений, ограниченный $S = \{s_i : 1 \leq i \leq M\}$, так что M — это количество виртуальных машин в рассматриваемой распределенной системе.

Например, рассмотрим задачу для сопоставления 5 задач на рис. 1 с 4 виртуальными машинами. На рис. 2 показано сопоставление одного возможного экземпляра назначения с координатами положения частицы в ОРЧ.

Используя такое представление частиц, популяция ОРЧ представляется в виде двумерного массива $P \times N$, состоящего из P частиц, каждая из которых представлена в виде вектора из N задач. Таким образом, частица летит в N -мерном пространстве поиска. Задача внутренне представлена как целочисленное значение, указывающее номер виртуальной машины, которой назначена эта задача.

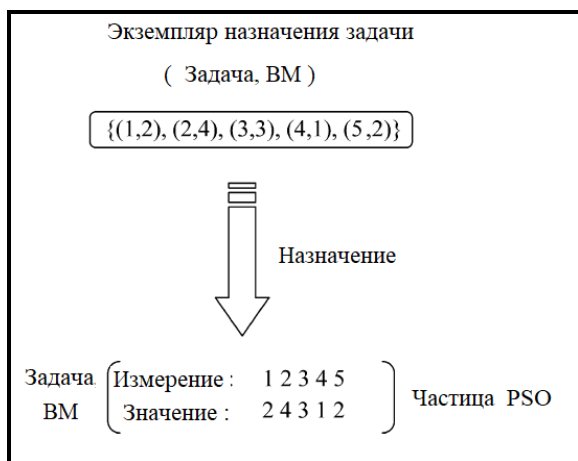


Рис. 2. Назначение задач в частице ОРЧ

Инициализация популяции частиц роя

Популяция роя частиц является случайной генерацией. Вектор положения и вектор скорости каждого роя частиц генерируется согласно (12) и (13). Значения x_{min} и v_{min} равны 4,0, значения x_{max} и v_{max} равны -0,4.

$$x_{id}^1 = x_{min} + (x_{max} - x_{min}) \times rand, \quad (12)$$

$$v_{id}^1 = v_{min} + (v_{max} - v_{min}) \times rand. \quad (13)$$

Для простоты предположим, что популяция из 10 частиц инициализирована, как показано в табл. 1. Также для простоты программирования нумерация ВМ в коде начинается с 0 и заканчивается на N – 1.

Например, в позиции частицы 1 первого поколения {1, 0, 0, 2, 0} предлагается решение проблемы назначения задачи 1 процессору 1, задач 2, 3 и 5 процессору 0 и задачи 4 процессору 2. Пригодность частиц, которая является стоимостью присвоения (рассчитывается по формуле (7)), показана рядом с каждой частицей. В этой популяции лучшая частица (gbest) имеет значение пригодности 39. Копия позиции gbest обновляется на протяжении поколений.

Таблица 1

Положение частиц и значения пригодности для первого поколения

Положение частиц					значения пригодности
1	0	0	2	0	43.0
0	3	0	3	3	51.0
1	2	1	0	0	48.0
3	2	2	2	0	66.0
3	1	1	2	2	40.0
0	0	2	1	1	40.0
3	0	3	1	0	48.0
2	3	3	1	0	39.0
0	0	2	0	3	63.0
0	2	1	2	1	47.0

Так как это начальная популяция, лучшая локальная позиция для частицы ОРЧ равна ее начальной позиции. ОРЧ обновляет скорость каждой частицы, используя формулу (10). Затем обновленные скорости используются в формуле (11), чтобы получить новую позицию для каждой частицы.

Поскольку значения в частице являются числами процессоров, реальное значение, такое как 1.756, не имеет смысла. Поэтому в алгоритме мы обычно округляем эти числа до ближайшего номера процессора, опуская знак и дробную часть.

Реализация алгоритма ОРЧ для нашей модели

В ОРЧ каждая частица является подходящим решением основной проблемы и имеет n измерений, которые определяются специальной задачей. В этой статье задача должна быть назначена. Детали алгоритма ОРЧ описаны как:

1. Инициализировать вектор положения частицы и вектор скорости случайным образом согласно (12) и (13). Размерность вектора равна количеству задач.

2. Согласно (7), подсчитать значение функции пригодности, если значение пригодности одной частицы лучше, чем текущий pbest, заменить предыдущий pbest и установить текущее значение в качестве нового pbest.

3. Выбрать наибольшее значение частицы из всех значений, если ее значение лучше, чем у текущего gbest, заменить предыдущий gbest и установить текущее значение в качестве нового gbest.

4. Для всех частиц обновить их положение и скорость с помощью (10) и (11).

5. При достижении максимальной итерации или получении идеального результата программа останавливается, в противном случае повторяется шаг 2.

Экспериментальные настройки и параметры

Чтобы лучше оценить наш алгоритм, мы генерируем тестовые данные случайным образом. Длина задач ограничена от 100 до 1000 MIPS; емкость виртуальной машины составляет от 2,0 до 6,0 MIPS; объем данных передачи варьируется от 1 до 100 кбит / с; пропускная способность варьируется от 1 до 10 кбит / с. В следующей части все эксперименты тестируются на двухъядерном процессоре Intel® Pentium®R

E2160 1,80 ГГц с оперативной памятью 1 ГБ в среде Microsoft Windows. Все эксперименты были реализованы в Matlab R2009b.

Параметры ОРЧ следующие: численность населения равна 10, коэффициент самопознания c_1 равен 1.49445, социальный коэффициент c_2 равен 1.49445, а вес w равен 0,729 [8].

Таблица 2

Стоимость за время обработки и передачи данных

регион	Стоимость за время обработки в час		Стоимость передачи данных за ГБ	
	Linux	Windows	IN	OUT
РФ Москва	\$0.085	\$0.12	\$0.100	\$0.150
ЕК Берлин	\$0.095	\$0.12	\$0.100	\$0.150
АТ Токио	\$0.010	\$0.12	\$0.100	\$0.201

Мы тестировали 5 раз, каждый раз меняли количество заданий. Мы использовали 3 типа серверов, содержащих виртуальные машины, расположенных на трех разных континентах. Центры: Российская Федерация (Москва), Европейский Континент (Берлин) и Азиатско-Тихоокеанский регион (Токио) [9]. Цены на обработку и перевод центров указаны в таблице 2 соответственно. В ценах на обработку мы выбрали использование Linux.

Анализ результатов

Критериями эффективности, которые рассматривались, были качество стоимости и время выполнения задач, используемые для эталонов. Процент улучшения стоимости определяется как (14):

$$\left(1 - \frac{Cost_{PSO}}{Cost_{Random}}\right) \times 100\% \quad (14)$$

Процент улучшения времени выполнения задач определяется как (15):

$$\left(1 - \frac{TEXE_{PSO}}{TEXE_{Random}}\right) \times 100\% \quad (15)$$

Результат эксперимента приведен в табл. 3. В таблице приведены результаты пяти экспериментов, где время выполнения задачи в каждом эксперименте рассчитывалось после применения их к алгоритму случайных чисел и алгоритму ОРЧ. Стоимость также была рассчита-

на в обоих алгоритмах. Коэффициент улучшения суммы затрат достиг 14%, а процент улучшения времени выполнения задачи составил 19 %.

Таблица 3

Экспериментальные результаты

Задача	В.М.	Стоимость (C\$)		Время выполнения (S)	
		Random	ОРЧ	Random	ОРЧ
10	3	164.4	141.2	788.9	532.8
20	3	362.9	291.7	1070.8	854.8
30	3	497.3	407.5	1576.8	1323.4
40	3	811.5	771.9	2141.8	1820.9
50	3	1145.8	976.1	2952.7	2398.9
в итоге		2981.9	2588.4	8531.1	6930.8
Улучшения (%)		14%		19 %	

На рис. 3 показана стоимость выполнения задач с использованием случайного алгоритма и нашего алгоритма. Очевидно, что оптимизация затрат увеличивается с увеличением количества задач.

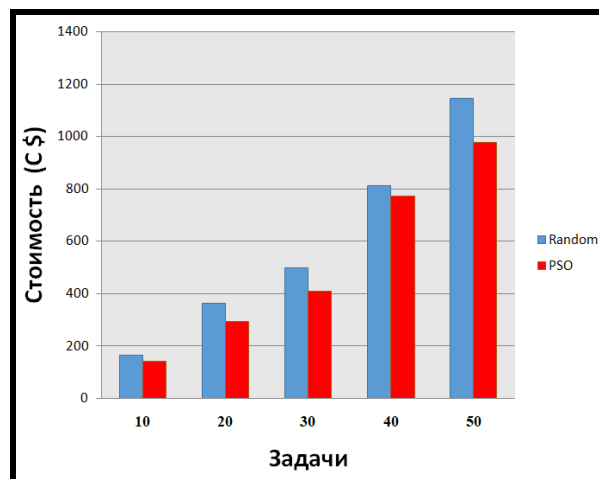


Рис. 3. Сравнение двух алгоритма по стоимости

На рис. 4 показано время выполнения задач с использованием случайного алгоритма и нашего алгоритма. Также заметно увеличение скорости выполнения по мере увеличения количества задач.

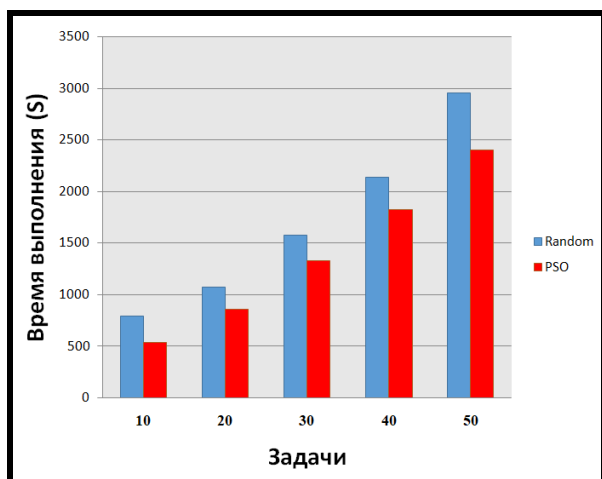


Рис. 4. Сравнение двух алгоритмов по времени выполнения задач

Заключение

Таким образом, мы делаем моделирование для задачи оптимизации многоцелевого задания и представляем алгоритм ОРЧ. Наши объекты оптимизации являются не только одной целью, но и включают время обработки, время передачи, стоимость обработки и стоимость передачи. Результаты эксперимента демонстрируют, что наш метод позволяет не только снизить стоимость обработки и передачи, но и уменьшить время обработки и передачи. Это означает, что наш алгоритм не только повышает эффективность, но и снижает стоимость облачных вычислений.

Литература

1. Балансировка нагрузки в облачных вычислениях / Е.Н. Десятирикова, Ходар Алмосана, Алькади Усама, Хаджали мусса // Вестник Воронежского государственного университета. Сер. Системный анализ и информационные технологии. 2017. № 3. С. 103–109.
2. Алгазинов Е.К., Десятирикова Е.Н., Ходар Алмосана. Анализ производительности алгоритма брокера облачных сервисов // Технологическая перспектива в рамках евразийского пространства: новые рынки и точки экономического роста: Междунар. науч. конф. СПб.: Издательство «Астерион», 2019. С. 334-340.
3. Десятирикова Е.Н., Ходар Алмосана, Алькади Усама. Планирование подхода к ресурсам виртуальных машин в облачных вычислениях // Информатика: проблемы, методология, технологии (IPMT-2019): XIX Междунар. конф. Воронеж: «Научно-исследовательские публикации», 2019. С. 1285-1291.
4. Modeling and Simulation of Cloud Computing: A Review/ Wei Zhao, Yong Peng, Feng Xie, Zhonghua Dai. //IEEE Asia Pacific Cloud Computing Congress (APCloudCC2012). 2012. pp. 20 – 24.
5. Xue S.J. and Wu W. Scheduling Workflow in Cloud Computing Based on Hybrid Particle Swarm Algorithm //TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering (10:7). 2012. pp. 1560-1566.
6. Балансировка нагрузки в облачных вычислениях / В.Н. Волкова, Л.В. Черенькая, Е.Н. Десятирикова, Хаджали Мусса, Ходар Алмосана, Алкаади Усама. // Конференция IEEE молодых ученых в области электротехники и электроники (ElConRus). СПб.-М.: Издательство «Астерион», 2018. С. 397-400.
7. Десятирикова Е.Н., Ходар Алмосана, Алькаади Усама. Балансировка нагрузки в облачных вычислениях с использованием генетического алгоритма // Информатика: Проблемы, Методология, Технологии»: XVIII Междунар. науч.-метод. конф. Воронеж: «Научно-исследовательские публикации», 2018. С. 274-279.
8. Zhong H., Tao K., Zhang X. An Approach to Optimized Resource Scheduling Algorithm for Open-Source Cloud Systems // in Fifth Annual China Grid Conference, 2010.
9. Task Scheduling Optimization in Cloud Computing Based on Heuristic Algorithm / L. Guo, S. Zhao, S. Shen, C. Jiang // Journal of Networks (7). 2012. pp. 547-553.

Поступила 02.08.2019; принята к публикации 14.10.2019

Информация об авторах

Ходар Алмосана – аспирант кафедры информационных систем, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет (394036, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: Mothana-sy@hotmail.com
Алгазинов Эдуард Константинович – д-р физ.-мат. наук, профессор, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет (394036, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: algazinov@cs.vsu.ru
Десятирикова Елена Николаевна – д-р техн. наук, профессор, д-р экон. наук, кафедра информационных систем, факультет компьютерных наук, Воронежский государственный университет (394036, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), кафедра систем управления и информационных технологий в строительстве, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: elenad@vgasu.vrn.ru
Ияд Алхаят – д-р техн. наук, профессор, д-р компьютерных наук, кафедра информационных систем и сетей, факультет информатики, Университет Дамаска (Сирия, г. Дамаск, ул. Бармакидов, 69), e-mail: Iyad.khayat@gmail.com

DESIGNING A MODEL TO IMPROVE TASK SCHEDULING IN CLOUD COMPUTING BASED ON PARTICLE SWARM OPTIMIZATION

Almothana Khodar¹, E.K. Algazinov¹, E.N. Desyatirikova^{1,2}, Iyad Alkhayat³

¹Voronezh State University, Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³University of Damascus, Damascus, Syria

Abstract: cloud computing is a new kind of shared infrastructure which can attach huge pools of systems, provides users with a variety of storage and computing resources via the internet. The most important requirement in cloud computing environment is the task scheduling which plays the key role of efficiency of the whole cloud computing facilities. Task scheduling in cloud computing means that to allocate best suitable resources for the task to be execute with the consideration of different parameters like time, cost, scalability, make span, reliability, availability, throughput, resource utilization and so on. Most of the existing optimization algorithms only focus on one aspect. In this paper, we develop a comprehensive multi-objective model for optimizing task scheduling to minimize task execution time, task transferring time, and task execution cost. However, the objective functions in this model are in conflict with one another. Considering this fact and the supremacy of Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm in speed and accuracy, we design a multi-objective algorithm based on PSO method to provide an optimal solution for the proposed model. The experimental result manifest that the proposed method is more effective and efficient in time and cost

Key words: cloud computing; particle swarm optimization; scheduling strategy; load balancing; virtual machine

References

1. Desyatirikova E.N., Hajali Moussa, Almothana Khodar, Alkaadi Osama "Load balancing in cloud computing", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta)*, 2017, no. 3, pp. 103-109.
2. Algazinov E.K., Desyatirikova E.N., Almothana Khodar. "Analysis of the performance of the cloud services broker algorithm", *Technological Perspective within the Eurasian Space: New Markets and points of Economic Growth: Intern. Scientific Conf. (Tekhnologicheskaya perspektiva v ramkakh yevraziyskogo prostranstva: novyye rynki i tochki ekonomicheskogo rosta: Mezhdunar. nauch. konf.)* Saint Petersburg, Russia, December 13-15, 2018, pp. 334-340
3. Desyatirikova E.N., Almothana Khodar, Alkaadi Osama "Planning an approach to virtual machine resources in cloud computing", *Informatics: Problems, Methodology, Technologies (IPMT-2019): XIX Intern. Conf. (Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii (IPMT-2019): XIX Mezhdunar. konf.)*, Voronezh, Russia, February 14-15, 2019, pp. 1285-1281
4. Wei Zhao, Yong Peng, Feng Xie, Zhonghua Dai. "Modeling and simulation of cloud computing: a review", *IEEE Asia Pacific Cloud Computing Congress (APCloudCC2012)*, 2012, pp. 20-24.
5. Xue S.J., Wu W. "Scheduling workflow in cloud computing based on hybrid particle swarm algorithm", *TELKOMNIKA Indonesian Journal of Electrical Engineering* (10:7), 2012, pp. 1560-1566.
6. Volkova V.N., Chernen'kaya L.V., Desyatirikova E.N., Hajali Moussa, Khodar Almothana, Alkaadi Osama "Load balancing in cloud computing", *Proc. of 2018 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (2018 ElConRus)*, St. Petersburg and Moscow, Russia, January 29 - February 1, 2018, pp.397-400
7. Desyatirikova E.N., Khodar Almothana, Alkaadi Osama "Load balancing in cloud computing using genetic algorithm", *XVIII International Scientific and Methodological Conference. Informatics: problems, methodology, technology" (Informatika: Problemy, Metodologiya, Tekhnologii: XVIII Mezhdunar. nauch.-metod. konf.)*, Voronezh, Russia, 2018, pp. 274-279
8. Zhong H., Tao K., Zhang X. "An approach to optimized resource scheduling algorithm for open-source cloud systems", *Fifth Annual China Grid Conference*, 2010.
9. Guo L., Zhao S., Shen S., Jiang C. "Task scheduling optimization in cloud computing based on heuristic algorithm", *Journal of Networks* (7), Mar 2012, pp. 547-553.

Submitted 02.08.2019; revised 14.10.2019

Information about the authors

Almothana Khodar, Graduate student, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394036, Russia), e-mail: Mothana-sy@hotmail.com

Eduadr K. Algazinov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394036, Russia), e-mail: algazinov@cs.vsu.ru

Elena N. Desyatirikova, Dr. Sc. (Economics), Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh, Russia), Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: elenad@vgasu.vrn.ru

Iyad Alkhayat, Dr. Sc. (Technical), Dr. Sc. (Computer), Professor, Damascus University (69 Barmakidov str., Damascus, Syria), e-mail: Iyad.khayat@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СРЕДСТВ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

С.Л. Подвальный, М.А. Лихотин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: на выходе телекоммуникационного канала расположен усилитель мощности, о структуре которого совсем ничего неизвестно. Моделирование такого устройства осуществлялось по принципу чёрного ящика, оперировали только данными на входе и выходе исследуемого усилителя мощности. Эталонные значения, подаваемые в модель, представлены в виде комплексных чисел. Критерием качества оценивания модели служило принятое в радиотехнике отношение сигнал/шум. Приведены краткие результаты работы прошлого исследования. Поднимаются проблемы, связанные с моделированием процесса работы усилителя мощности на основе нейронных сетей. Приведён пример появления нелинейных искажений в рассматриваемом устройстве. Представлена совместная работа группы нейронных сетей, основанная на кластеризации аналогового сигнала, которая работает по принципу адаптивной резонансной теории Гроссберга. Кратко поставлены результаты работы применения такого типа систем. Сформулированы проблемы при использовании такого подхода к моделированию исследуемого процесса. А также рассмотрены различные алгоритмы настройки весовых коэффициентов нейронных сетей и представлены примеры их работы, обучающихся по спектру сигнала. Сравнились наиболее популярные в настоящее время алгоритмы обучения для минимизации функции относительной ошибки. Описаны выводы по работе нейросетевых моделей в рамках поставленной задачи

Ключевые слова: нейронная сеть, модель, обучение, усилитель мощности, кластеризация, ошибка, шум

Введение

Представленное исследование является продолжением работы [1], в ней проанализированы различные подходы к моделированию усилителя мощности по методу чёрного ящика, используя средства нейронных сетей.

Известны только входные и выходные данные сигналов, представленные в комплексном виде. Требовалось выяснить возможность создания модели усилителя мощности на основе нейронных сетей, которая могла бы демонстрировать работу с точностью до -40 дБ. Никаких ограничений на выбор архитектуры, метода обучения, функций активации и т.д. не предъявлялось.

В прошлой работе было описано использование обыкновенной двухслойной сети, обучение которой осуществлялось по известному методу обратного распространения ошибки. Также использовалась модификация этого алгоритма: метод Нестерова, который продемонстрировал хороший прирост в скорости схождения модели.

Проблемы при моделировании

При разработке усилителей мощности накладываются определённые ограничения, связанные с размером устройства и энергопо-

треблением. В связи с этим увеличивается уровень нелинейных искажений из-за отклонений передаточной характеристики от линейной.

Реальный усилитель мощности имеет предел выходной мощности, определяемый типом схемы включения, типом усилительного элемента, напряжением смещения и питания. Поэтому, с некоторого значения уровня входной мощности зависимость перестаёт быть линейной и усиление системы падает с увеличением входной мощности. На рис. 1 приведен график зависимости выходной мощности от входной в случае линейного усилителя мощности (сплошная линия) и нелинейного (пунктирная линия) [2].

Исследуя входной и выходной сигналы, можно заметить, что наиболее зашумлённая составляющая находится на уровне низких значений амплитуд. Деление выборки на составляющие не даёт значительных преимуществ, поскольку нейронная сеть не может по своей природе повторять зашумлённые значения подаваемых образов. Необходимо прибегнуть к альтернативным способам работы с такими данными, что и являлось предметом настоящего исследования.

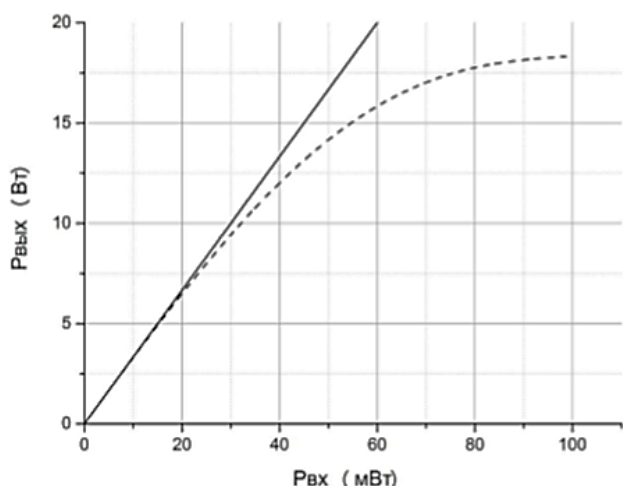


Рис. 1. Зависимость выходной мощности от входной

Применение адаптивной резонансной теории

Можно кластеризовать обучающую выборку и для каждого класса выделить нейронную сеть для обучения. Для этого будет использоваться адаптивная резонансная теория Гроссберга, которая заключается в разделении аналогового сигнала по частям, удовлетворяющим коэффициенту «похожести». На рис. 2 представлены примеры одного класса входного сигнала и соответствующего ему выходного.

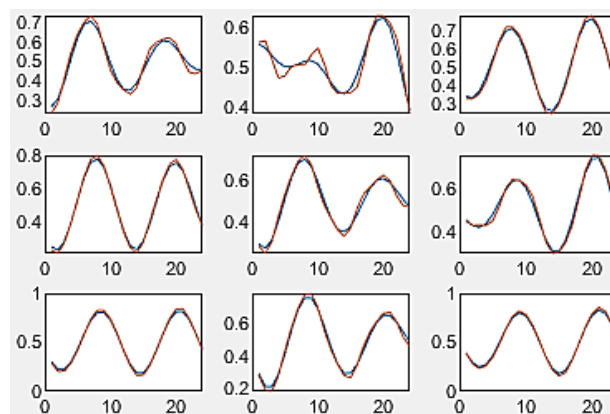


Рис. 2. Пример одного класса кластеризованного входного сигнала

Так как в такой нейронной сети обучение происходит без учителя, то с высоким коэффициентом «похожести» по результату выполнения кластеризации идентичных классов может оказаться довольно много. Поэтому можно ограничить их набор до 10. Каждая такая пачка данных будет обучаться отдельной модели по типу *sgdm*, т.к. на таких данных она продемонстрировала наиболее лучшую обобщающую способность в сравнении, например, с *RMSProp* или *adam* [3]. Обучение будет длиться до тех пор, пока каждая нейронная сеть не достигнет предела обучения по относительной ошибке *EVM* в -30 дБ. Архитектура такой сети будет небольшой: всего 24 значения входного слоя, 48 скрытого и 12 выходного. И соответственно набор данных будет довольно большой, т.к. моделей обучения будет около 10. Но, как видно из рис. 3, такая структура очень плохо работает.

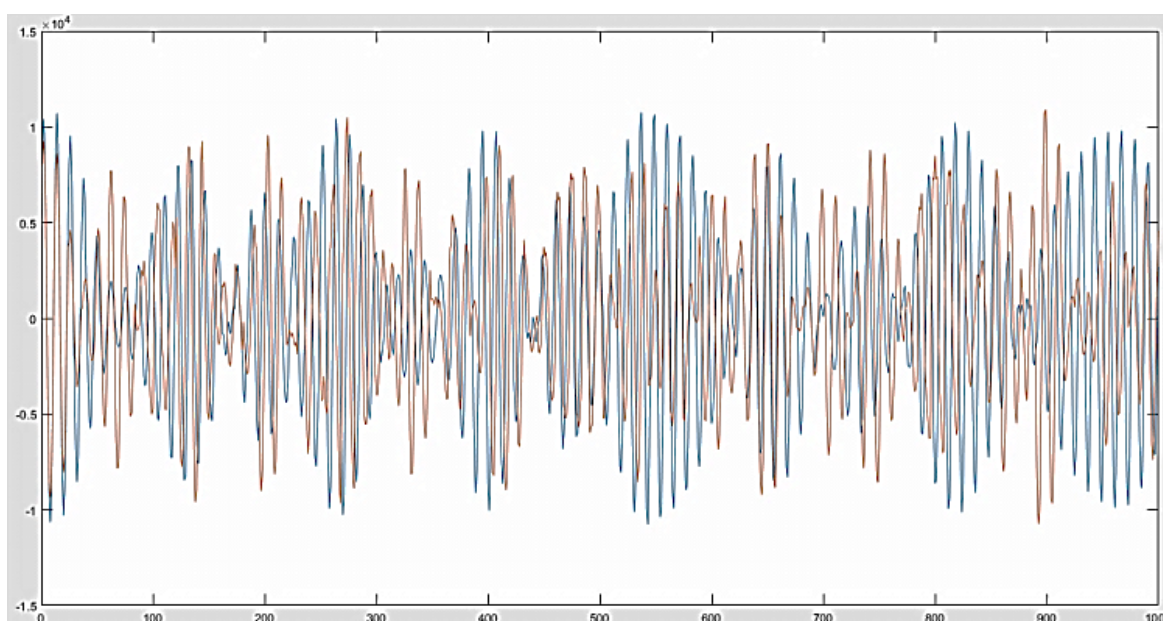


Рис. 3. Пример работы нейронных сетей, обученных каждому классу отдельно

Если проанализировать работу сети исключительно по классам, то результаты выйдут неудовлетворительные. На рис. 4 изображена таблица, в четвертой колонке которой отображены относительные ошибки каждой модели, которые соответственно обучены только своему классу.

10x4 cell

	1	2	3	4
1	155x24 dou...	155x12 dou...	311x12 dou...	3.0678
2	57x24 double	57x12 double	114x12 dou...	2.4781
3	95x24 double	95x12 double	190x12 dou...	3.5681
4	43x24 double	43x12 double	86x12 double	3.6924
5	132x24 dou...	132x12 dou...	264x12 dou...	3.0956
6	34x24 double	34x12 double	68x12 double	3.8633
7	13x24 double	13x12 double	26x12 double	1.5968
8	38x24 double	38x12 double	76x12 double	0.8850
9	129x24 dou...	129x12 dou...	258x12 dou...	3.1114
10	34x24 double	34x12 double	34x12 double	1.5323

Рис. 4. Относительные ошибки работы каждой модели

В итоге в ходе анализа работы каждой нейронной сети выяснилось, что каждая модель класса переобучилась. Это связано с тем, что они обучались исключительно своим паттернам и в связи с этим обобщающая способность до-

вольно сильно испортилась, нежели было задумано.

Если детально посмотреть на работу сети адаптивной резонансной теории, то вытекают существенные проблемы: если требуется запоминать сотни и тысячи реализаций одного и того же динамического процесса, то при малых значениях параметра сходства в режиме распознавания память нейронной сети не имеет достаточного объема необходимой информации для принятия обоснованных решений. А при больших значениях этого параметра аналогичные данные, отличающиеся небольшим числом второстепенных деталей, запоминаются как прототипы разных классов изображений [4]. Таким образом, данный класс нейронных сетей довольно чувствителен к шумам, что приводит к росту ошибки моделируемого процесса.

Анализ обучения по спектру сигнала

В качестве альтернативного варианта можно использовать дополнительную предобработку данных: быстрое преобразование Фурье, после чего пробовать обучать по спектру сигнала.

На рис. 5, 6 представлен пример спектра сигнала на 48 значений реальной и мнимой части соответственно.

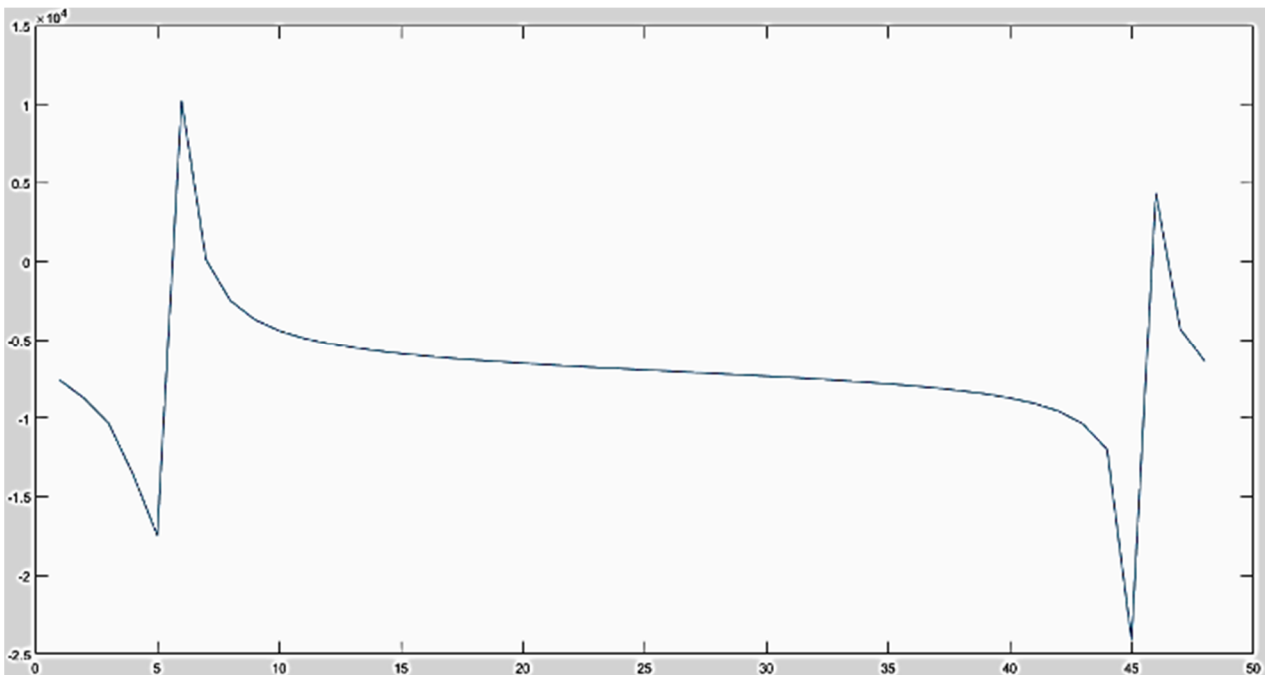


Рис. 5. Пример спектра сигнала реальной части

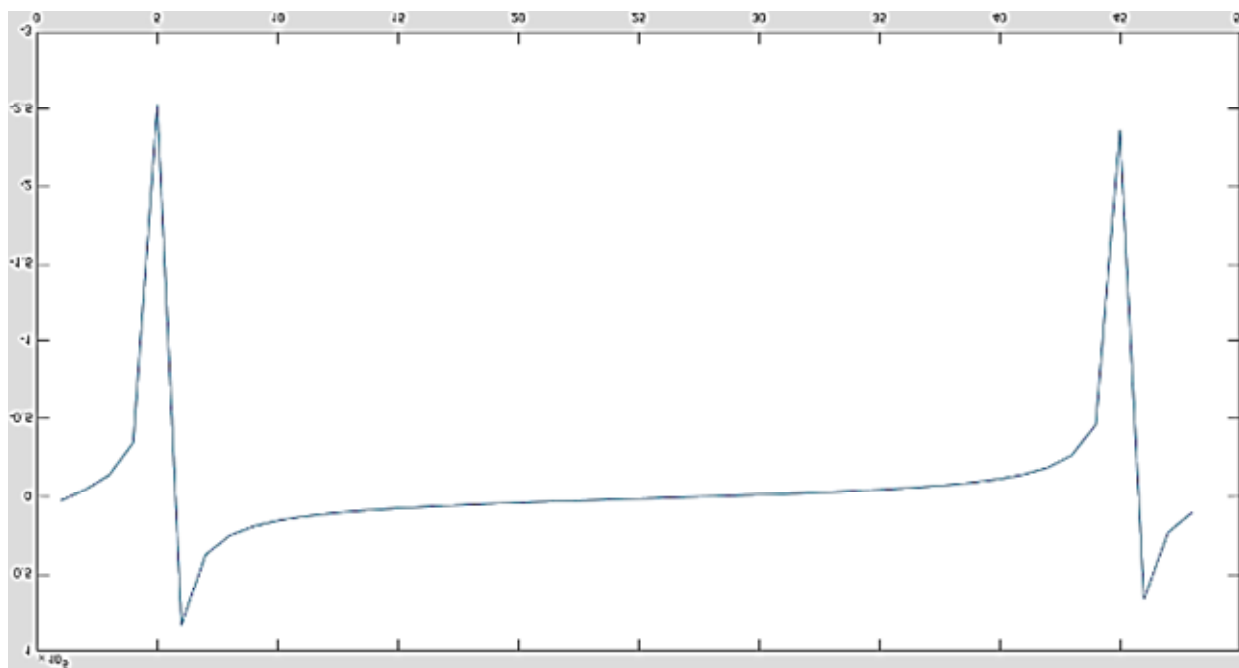


Рис. 6. Пример спектра сигнала мнимой части

Такие данные будут подаваться на входы сети. Соответственно, вся выборка нормализуется перед обучением, и для проверки качества модели будет выполняться обратное преобразование Фурье с выходов сети. Было установлено, что с прежней архитектурой модель

показывает довольно неудовлетворительный результат. На тестовых данных относительная ошибка достигла около -2 дБ. На рис. 7 изображены целевые и полученные данные на тестовой выборке.

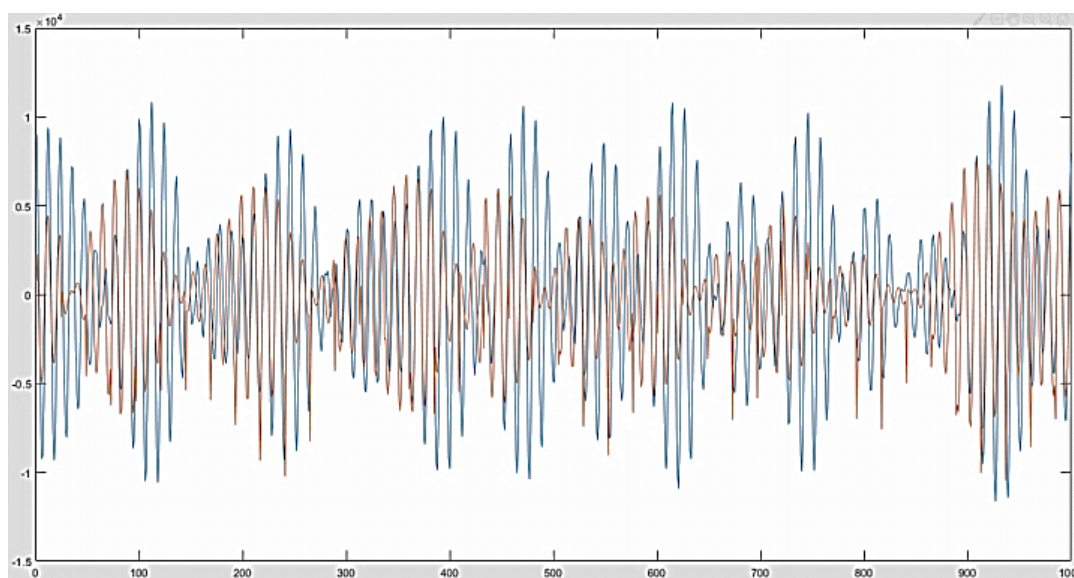


Рис. 7. Пример целевых и полученных данных от модели

При анализе выборки обучения было выявлено, что спектр сигнала на входе и выходе сети довольно видоизменён, это показано на рис. 8.

Это связано с разной размерностью вектора преобразования Фурье. В связи с этим входы и выходы нейронной сети будут одинаковыми.

На рис. 9 продемонстрирован пример после такого преобразования. И соответственно после обучения модель показала относительную ошибку на тестовом наборе данных -14.3 дБ. Пример целевых и полученных данных представлен на рис. 10.

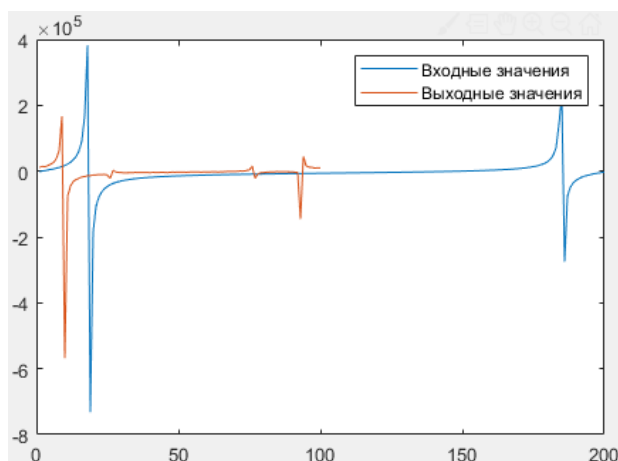


Рис. 8. Пример входной и выходной пачки данных в модели

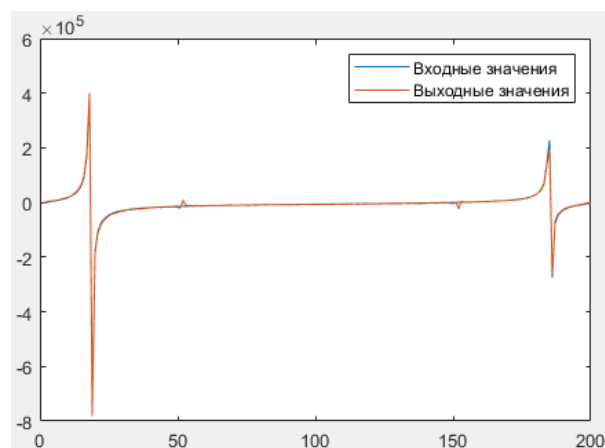


Рис. 9. Пример входной и выходной пачки данных в модели

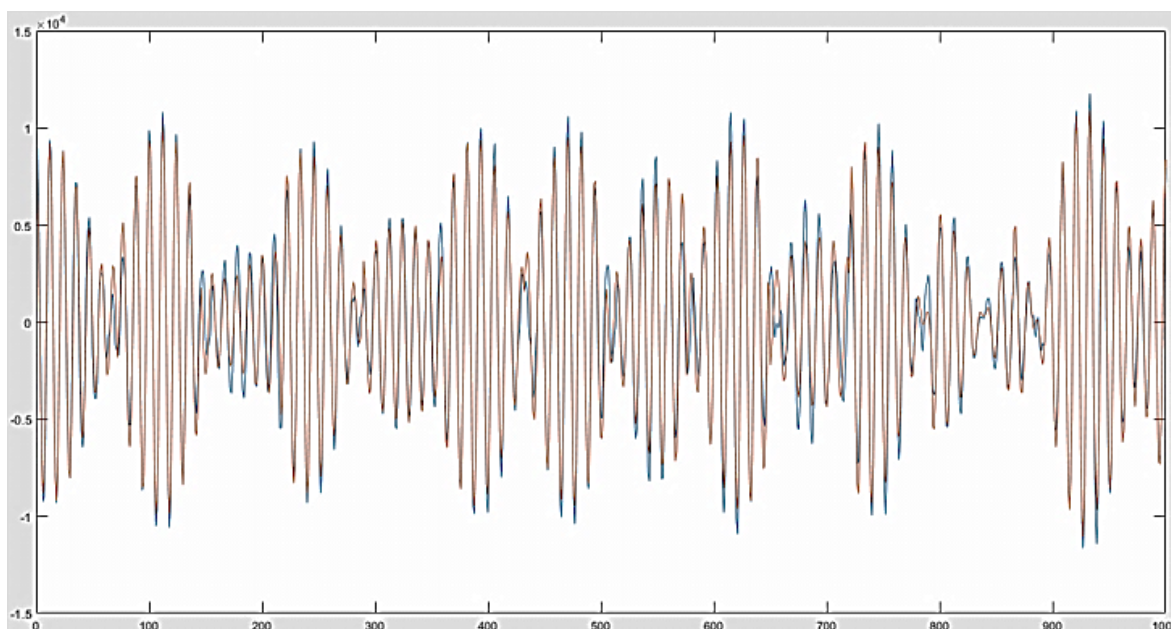


Рис. 10. Пример целевых и полученных данных от модели

Для обучения модели по спектру сигнала увеличим архитектуру модели: количество нейронов в слоях. Входной и выходной слою будут состоять из 200 нейронов, скрытый из 800. Также увеличим количество эпох: в два раза до 1200. В таблице приведены сводные показатели модели с такой архитектурой.

На рис. 11, 12 показаны примеры целевых и полученных данных на тестовой выборке по алгоритму `sgdm` и `rmsprop` соответственно. Из таблицы видно, что эти алгоритмы показывают соизмеримые результаты, тогда как алгоритм `rmsprop` в некоторых примерах показал относительную ошибку на порядок хуже, чем обучение по набору данных квазипериодического сигнала.

Показатели относительной ошибки на обучении по спектру сигнала

Алгоритм обучения	Перемешивание данных	Относительная ошибка, дБ
sgdm	Никогда	-21.3379
	Каждую эпоху	-20.8667
	Перед обучением	-20.9133
adam	Никогда	-19.2077
	Перед обучением	-19.9591
	Каждую эпоху	-16.7946
rmsprop	Никогда	-13.097
	Каждую эпоху	1.02794
	Перед обучением	-13.0204

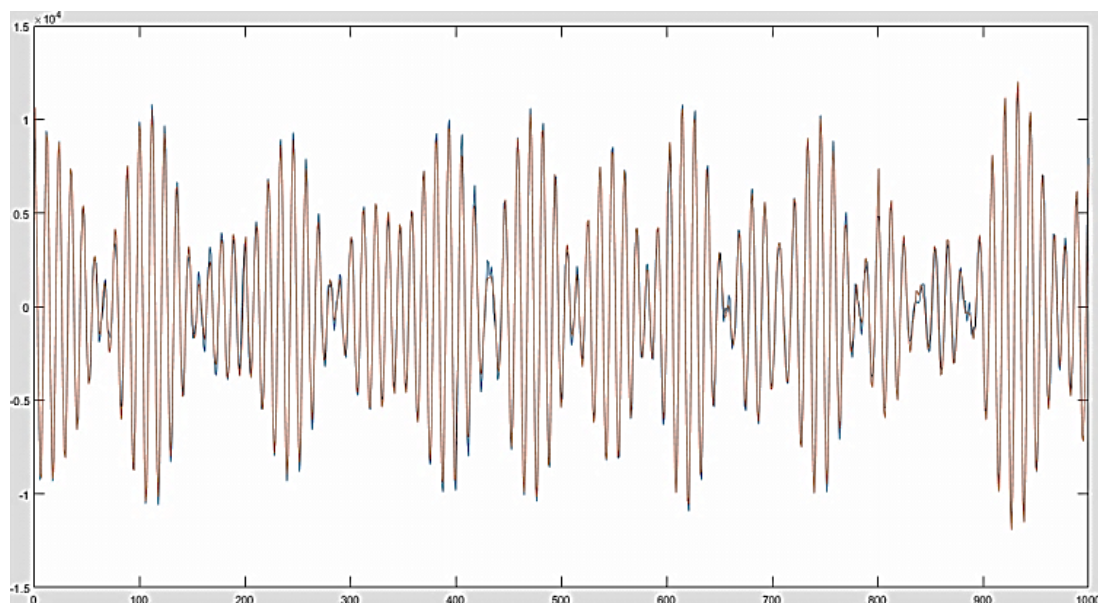


Рис. 11. Пример целевых и полученных данных от модели, обученной по алгоритму *sgdm*

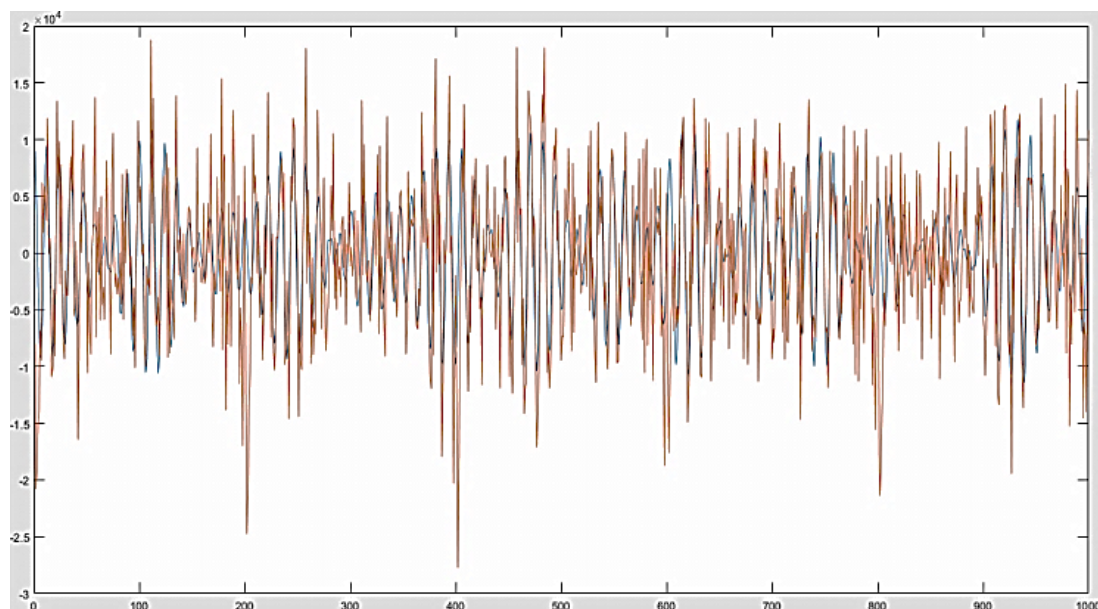


Рис. 12. Пример целевых и полученных данных от модели, обученной по алгоритму *rmsprop*

Заключение

Таким образом, можно сделать вывод, что для достижения высокой точности работы модели усилителя мощности недостаточно оперировать только входными и выходными данными, т.к. в исследуемом сигнале выход наиболее зашумлен в сравнении со входом.

Для примера, чтобы проанализировать работу нейронной сети, на её вход подавался выходной сигнал из усилителя мощности (без шума) и обучался входному. Результаты работы такой модели достигали точности порядка -37 дБ на тестовом наборе данных, несмотря на существенную нелинейность усилителя.

Установлено, что нейронные сети очень хорошо аппроксимируют входной сигнал, распознают динамику изменения данных, но они не способны обучиться зашумлённой составляющей сигнала, что ограничивает её возможности при моделировании такого процесса. В дальнейшем возможно продолжение исследований рассмотренных алгоритмов нейросетевого моделирования при использовании процедур фильтрации выходного сигнала.

Литература

1. Подвальный С.Л., Лихотин М.А. Исследование возможностей искусственных нейронных сетей для моделирования работы телекоммуникационного усилителя //

Информационные технологии моделирования и управления. 2018. № 6 (114). С. 417-423.

2. Шутов В.Д. Линеаризация СВЧ усилителей мощности методом цифровых предсказаний: дис... канд. физ.-мат. наук: 05.13.01; защищена 17.03.2016; утв. 13.01.2014. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный университет», 2015. 146 с.

3. URL: Быстро сходящиеся современные алгоритмы обучения нейронных сетей совсем не гарантируют

достижения наилучшей обобщающей способности [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. <http://neuropro.ru/memo346.shtml>; дата обращения: 29.06.2019.

4. Заковоротный А.Ю. Новые архитектуры и алгоритмы обучения нейронных сетей адаптивной резонансной теории // Научный результат. Серия «Информационные технологии». 2016. Т. 1. № 1. С. 4-11.

Поступила 14.08.2019; принята к публикации 14.10.2019

Информация об авторах

Подвальный Семён Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

Лихотин Максим Андреевич – студент 2-го курса магистратуры, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: maximus-lihotin@mail.ru

RESEARCH OF THE POSSIBILITY OF MODELING THE POWER AMPLIFIER USING MEANS OF NEURAL NETWORKS

S.L. Podvalny, M.A. Likhotin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a power amplifier is located at the output of the telecommunications channel, the structure of which is completely unknown. Simulation of such a device was carried out according to the black box principle, operating only with data on the input and output of the power amplifier under study. The reference values supplied to the model are presented as complex numbers. The criterion for qualifying the model was the signal-to-noise ratio adopted in radio engineering. The brief results of the past research are given. The problems connected with the modeling of the operation of the power amplifier based on neural networks are raised. An example of the appearance of nonlinear distortion in the device under consideration is given. A joint work of a group of neural networks based on the clustering of an analog signal, which works on the principle of the adaptive resonance theory of Grossberg, is presented. The results of the application of this type of systems are briefly summarized. Problems are formulated when using such an approach to modeling the process under study. Also various algorithms for adjusting the weighting coefficients of neural networks are considered and examples of their work are presented, which are trained on the signal spectrum. The most popular current learning algorithms were compared to minimize the relative error function. The conclusions on the work of neural network models in the framework of the task are described

Key words: neural network, model, training, power amplifier, clustering, error, noise

References

1. Podvalny S.L. Likhotin M.A. "Investigation of the capabilities of artificial neural networks to simulate the operation of a telecommunications amplifier", *Information Technology Modeling and Management (Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2018, no. 6(114), pp. 417-423.
2. Shutov V.D. "Linearization of microwave power amplifiers using digital predistortion" ("Linearizatsiya SVCH usiliteley moshchnosti metodom tsifroykh predyskazheniy"): dis. cand. of phys.-mat. sciences, Voronezh, 2015, 146 p.
3. "Fast converging modern algorithms for training neural networks do not guarantee the achievement of the best generalizing ability", available at: <http://neuropro.ru/memo346.shtml>.
4. Zakovorotny A.Yu. "New architectures and learning algorithms for neural networks of adaptive resonance theory", *Network Journal Scientific Result. Informational Technologies (Nauchnyy rezul'tat. Seriya «Informatsionnye tekhnologii»)*, 2016, vol. 1, no. 1, pp. 4-11.

Submitted 14.08.2019; revised 14.10.2019

Information about the authors

Semyen L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University, (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

Maksim A. Likhotin, Student, Voronezh State Technical University, (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: maximus-lihotin@mail.ru

СИСТЕМА СЛЕЖЕНИЯ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОНОКУЛЯРНОЙ СИСТЕМЫ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗРЕНИЯ В ГИРОСТАБИЛИЗИРОВАННОМ ПОДВЕСЕ

В.Г. Бондарев¹, Д.А. Смирнов¹, Н.И. Майгурова¹, А.В. Николенко¹, К.Ю. Гусев²,
С.Ю. Вахмин¹

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия
им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлена структура монокулярной системы технического зрения в режимах гиросtabilизации и слежения за объектом. В режиме слежения за объектом интереса выполняется обработка изображения с целью определения его координат на фотоматрице, а затем процесс слежения сводится к такому перемещению рам карданова подвеса, который завершается заданным положением изображения на фотоматрице. При этом показана отработка такого положения рам подвеса, чтобы изображение особой точки, являющейся простой моделью объектов интереса, всегда стремилось к центру фотоматрицы, что улучшает качество изображения фотокамеры и снижает уровень вибрации во время движения летательных аппаратов (ЛА). Это позволяет не только следить за объектом интереса, но и производить сопровождение и захват различных объектов, а также решать задачи навигации ЛА с использованием монокулярной системы технического зрения в гиросtabilизированном подвесе. Дальнейшим развитием режима сопровождения объекта интереса является слежение за протяженным объектом, на котором можно выделить две и более особых точек, тогда обеспечивается управление всех трех рам карданова подвеса и стабилизируется не только линейное, но и угловое положение изображения объекта на фотоматрице

Ключевые слова: монокулярная система, техническое зрение, система слежения, режим гиросtabilизации, уровень вибрации, созвездие маяков

Введение

Системы технического зрения давно и очень эффективно используются в промышленности, робототехнике, показывая свои метрологические и информационные достоинства, поэтому расширение сферы их применения для обеспечения автоматического движения транспортных средств является вполне ожидаемым [1]. Вторым наиболее актуальным направлением применения систем технического зрения является решение задач автоматизации сложных этапов полета летательных аппаратов (ЛА). Назовем наиболее известные задачи, решение которых в автоматическом режиме давно стало насущной необходимостью, но до сих пор не реализовано из-за отсутствия удовлетворительных измерительных средств параметров местоположения и движения ЛА. Такими задачами принято считать посадку самолетов на аэродром, посадку самолетов и вертолетов на авианосец, дозаправку топливом в воздухе, полет строем, облет препятствий, боевое применение оружия, навигация, слежение за объектом интереса [2, 3].

Высокий профессионализм летного состава только частично решает проблемы успешного выполнения этих режимов полета, но он, как известно, требует значительных затрат на подготовку летчиков, а малейшее ослабление требований к их профессионализму очень скоро оборачивается ростом трагической статистики.

Нерешенность автоматизации названных проблем существенно снижает привлекательность как пилотируемой, так и беспилотной авиации, которая в последние годы бурно совершенствуется в наиболее развитых странах.

Актуальность

Анализ существующих методов определения пространственного и углового положения самолета относительно взлетно-посадочной полосы (ВПП), самолета-заправщика, ведущего самолета, препятствий в воздухе или наземных объектов показывает, что эти методы либо обладают низкой точностью, неудовлетворяющей требованиям к системам автоматического управления, либо оборудование имеет значительные массу, габариты и стоимость. Например, низкая точность измерения бывает при визуальном определении положения ЛА, при этом попытки формирования с помощью лазе-

ров разноцветных зон являются хорошей помощью летчику на посадке, но в целом, это шаг в сторону от автоматической посадки [4].

Использование фотокамеры на борту ЛА имеет особенности, связанные с его движением и вибрациями, которые существенно ухудшают изображение [5], поэтому для улучшения качества изображения фотокамеру, как правило, размещают в гиросtabilизированный подвес, который обеспечивает неизменное положение оптической оси фотокамеры в инерциальном пространстве [6]. Применение фотокамеры не только для видеонаблюдения, но и для решения задач измерения, навигации, захвата и сопровождения различных объектов требует осуществления управления движением подвеса по сигналам, сформированным на основе обработки изображений объекта интереса, полученных на фотоматрице [7].

Рассмотрен принцип действия системы технического зрения (СТЗ) и получены соотношения, описывающие процесс измерений при произвольном расположении оптико-локационных блоков (ОЛБ) системы, что позволяет осуществлять измерения посредством подвижных (управляемых) ОЛБ. При решении измерительных и навигационных задач используется подход, основанный на измерении координат минимального комплекта точек объекта, земной поверхности, лазерных маяков в окрестности ВПП аэродрома и т.д. [8]. Поэтому целью обработки изображений является поиск этих точек и определение их координат на фоточувствительных матрицах ОЛБ. Вычислительная процедура нахождения параметров движения объектов осуществляется путем решения систем уравнений (как правило, нелинейных алгебраических), описывающих процесс измерений. При выводе уравнений используются утверждения геометрической оптики, аппарат аналитической геометрии и теории матриц [9]. В ряде вычислительных алгоритмов, полученных таким образом, удалось найти аналитические решения систем уравнений, что привело к компактным вычислениям. Те измерительные алгоритмы, где аналитические решения систем уравнений вызывают затруднения, строятся с использованием численных методов решения [10].

На посадке объектом интереса является созвездие наземных лазерных маяков, поэтому рассмотрим решение задачи стабилизации изображения созвездия маяков на фотоматрице камеры.

Как показывает опыт использования камеры видеонаблюдения, размещенной в кардано-

вом подвесе с гироскопической стабилизацией положения камеры, значительные дрейфы микромеханических гироскопов приводят к тому, что рама курса оказывается свободно дрейфующей в азимуте, поэтому необходима стабилизация положения изображения объекта интереса на фотоматрице камеры. Кроме этого погрешности измерения параметров местоположения ЛА существенно зависят от фокусного расстояния фотообъектива, при этом желательно использовать наибольшее фокусное расстояние, а это возможно, если фокусное расстояние регулируется автоматически, обеспечивая его наибольшее значение на этой дальности.

Использование фотокамеры на борту ЛА имеет особенности, связанные с его движением и вибрациями, которые существенно ухудшают изображение, поэтому для улучшения качества изображения фотокамеру, как правило, размещают в гиросtabilизированный подвес, который обеспечивает неизменное положение оптической оси фотокамеры в инерциальном пространстве. Применение фотокамеры не только для видеонаблюдения, но и для решения задач измерения, навигации, захвата и сопровождения различных объектов, требует осуществления управления движением подвеса по сигналам, сформированным на основе обработки изображений объекта интереса, полученных на фотоматрице.

Параметры в схеме карданова подвеса отражены в следующей структуре управления каналами стабилизации на рис. 1.

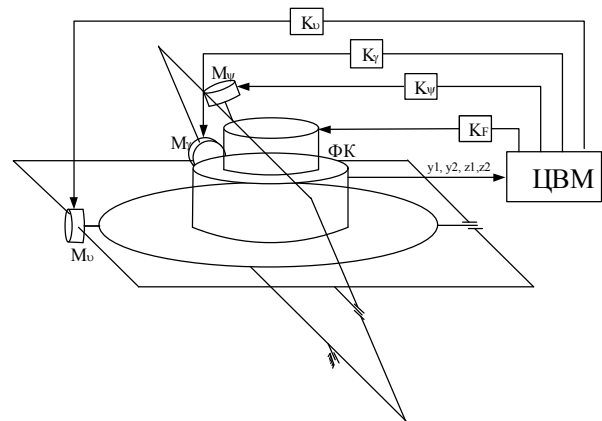


Рис. 1. Структура системы слежения за созвездием маяков

Важным элементом системы слежения за созвездием маяков является обеспечение стабильности его габаритов с изменением дальности до беспилотного летательного аппарата (БЛА). Этого можно достигнуть автоматическим изменением фокусного расстояния варио-

объектива камеры пропорционально этому расстоянию.

$$F_{\text{зад}} = \frac{l_{z2} - l_{z1}}{\sqrt{(y_1 - y_2)^2 + (z_1 - z_2)^2}} K_F, \quad (1)$$

где K_F – коэффициент передачи канала регулирования фокусного расстояния объектива; $l_{z2} - l_{z1}$ – расстояние между фронтально расположенными маяками M_1 и M_2 .

Величины углов $\theta_\gamma, \theta_\psi, \theta_\nu$ снимаются с датчиков углов карданова подвеса, при этом управляющие сигналы для датчиков моментов гиросплатформы формируются таким образом, чтобы оптическая ось фотокамеры проходила через середину отрезка M_1M_2 . Изображение отрезка M_1M_2 на фотоматрице – отрезок S_1S_2 должно совместиться со строкой фотоматрицы. Для обеспечения этих условий вместо сигналов гироскопической стабилизации сформируем три следующих сигнала управления рамами подвеса

$$\begin{aligned} M_\gamma &= \frac{y_1 - y_2}{z_1 - z_2} K_\gamma, \\ M_\nu &= \frac{y_1 + y_2}{2} K_\nu, \\ M_\psi &= \frac{z_1 + z_2}{2} K_\psi, \end{aligned} \quad (2)$$

где M_γ, M_ν, M_ψ – моменты сил в каналах рам крена, тангажа и рыскания; K_γ, K_ν, K_ψ – коэффициенты передачи каналов обработки рам крена, тангажа и рыскания.

Для описания положения особой точки $(x_p^{(1)}, y_p^{(1)}, z_p^{(1)})$ через координаты ее изображения на фотоматрице $(y_s^{(1)}, z_s^{(1)})$ и углы поворота рам карданового подвеса введем в рассмотрение прямоугольную систему координат $OXYZ$, связанную с ЛА (базис i, j, k), ось OX совпадает с продольной осью, ось OZ совпадает с поперечной осью ЛА, а OY ось образует правую систему координат (рис. 2).

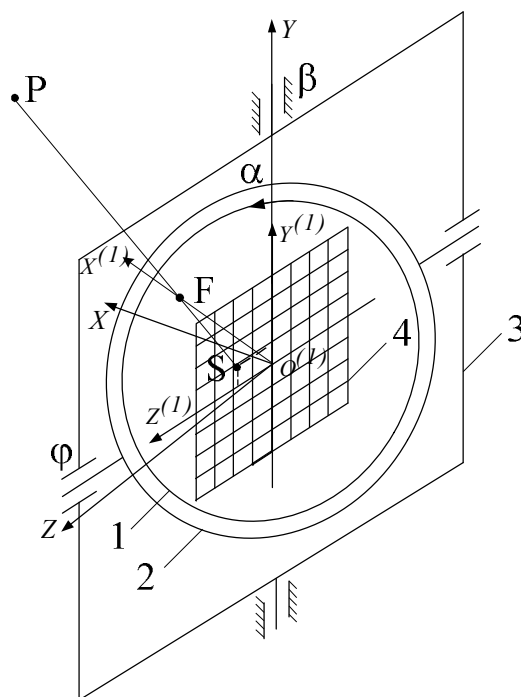


Рис. 2. Фотокамера в кардановом подвесе:
1 – рама крена, 2 – рама тангажа, 3 – рама курса,
4 – фотоматрица, β – угол поворота рамы курса
относительно основания подвеса, ϕ – угол поворота рамы
тангажа относительно рамы курса, α – угол поворота
рамы крена, относительно рамы тангажа

Система координат $O^{(1)}X^{(1)}Y^{(1)}Z^{(1)}$ – подвижная система, связанная с креновой рамой и установленной на ней фотоматрицей, где ось $O^{(1)}X^{(1)}$ направлена по оптической оси объектива, ось $O^{(1)}Y^{(1)}$ направлена вверх перпендикулярно горизонтальной стороне фотоматрицы, ось $O^{(1)}Z^{(1)}$ перпендикулярна осям $O^{(1)}X^{(1)}, O^{(1)}Y^{(1)}$, образуя с ними правую систему координат с базисом $i^{(1)}j^{(1)}k^{(1)}$.

Преобразование координат произвольного вектора из системы координат $OXYZ$ в систему координат $O^{(1)}X^{(1)}Y^{(1)}Z^{(1)}$ осуществляется посредством известного соотношения, учитывающего только взаимное угловое положение систем координат. Связь между старыми и новыми координатами вектора для случая, когда оба базиса являются ортонормированными, задается следующей формулой

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \beta & 0 & -\sin \beta \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \beta & 0 & \cos \beta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{(1)} \\ y^{(1)} \\ z^{(1)} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \phi & \sin \phi \cos \alpha \cos \beta + \sin \beta \sin \alpha & \sin \phi \sin \alpha \cos \beta - \sin \beta \cos \alpha \\ -\sin \phi & \cos \phi \cos \alpha & \cos \phi \sin \alpha \\ \sin \beta \cos \phi & \sin \phi \cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta & \cos \beta \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{(1)} \\ y^{(1)} \\ z^{(1)} \end{pmatrix} \quad (3)$$

где

$$(A) = \begin{pmatrix} \cos \beta \cos \phi & \sin \phi \cos \alpha \cos \beta + \sin \beta \sin \alpha & \sin \phi \sin \alpha \cos \beta - \sin \beta \cos \alpha \\ -\sin \phi & \cos \phi \cos \alpha & \cos \phi \sin \alpha \\ \sin \beta \cos \phi & \sin \phi \cos \alpha \sin \beta - \sin \alpha \cos \beta & \cos \beta \cos \alpha \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i^{(1)}i & j^{(1)}i & k^{(1)}i \\ i^{(1)}j & j^{(1)}j & k^{(1)}j \\ i^{(1)}k & j^{(1)}k & k^{(1)}k \end{pmatrix}, \quad (4)$$

(A) – матрица направляющих косинусов.

Вектор FS , описывающий геометрический центр объектива в системе $O^{(1)}X^{(1)}Y^{(1)}Z^{(1)}$ выразим следующим образом

$$FS = i^{(1)}F - j^{(1)}y_s^{(1)} - k^{(1)}z_s^{(1)}. \quad (5)$$

Вычислим проекции вектора FS на оси системы координат $OXYZ$, для чего используем соотношение (3)

$$\begin{aligned} FS &= i^{(1)}F - j^{(1)}y_s^{(1)} - k^{(1)}z_s^{(1)} = (a_{11}i + a_{21}j + a_{31}k)F - \\ &- (a_{12}i + a_{22}j + a_{32}k)y_s^{(1)} - (a_{13}i + a_{23}j + a_{33}k)z_s^{(1)} = \\ &= (Fa_{11} - y_s^{(1)}a_{12} - z_s^{(1)}a_{13})i + (Fa_{21} - y_s^{(1)}a_{22} - z_s^{(1)}a_{23})j + \\ &+ (Fa_{31} - y_s^{(1)}a_{32} - z_s^{(1)}a_{33})k \end{aligned} \quad (6)$$

Вектора PS и FS лежат на одной прямой, поэтому должны удовлетворять условию коллинеарности

$$\begin{vmatrix} i & j & k \\ Fa_{11} - y_s^{(1)}a_{12} - z_s^{(1)}a_{13} & Fa_{21} - y_s^{(1)}a_{22} - z_s^{(1)}a_{23} & Fa_{31} - y_s^{(1)}a_{32} - z_s^{(1)}a_{33} \\ P_x & P_y & P_z \end{vmatrix} = 0 \quad (7)$$

В скалярном виде это условие переписывается в следующем виде

$$\begin{aligned} (Fa_{21} - y_s^{(1)}a_{22} - z_s^{(1)}a_{23})P_z - (Fa_{31} - y_s^{(1)}a_{32} - z_s^{(1)}a_{33})P_y &= 0 \\ (Fa_{11} - y_s^{(1)}a_{12} - z_s^{(1)}a_{13})P_z - (Fa_{31} - y_s^{(1)}a_{32} - z_s^{(1)}a_{33})P_x &= 0 \\ (Fa_{11} - y_s^{(1)}a_{12} - z_s^{(1)}a_{13})P_y - (Fa_{21} - y_s^{(1)}a_{22} - z_s^{(1)}a_{23})P_x &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

Поскольку полученные уравнения линейно зависимы, что легко проверяется, поэтому, отбросив третье из них, получим два уравнения, связывающие декартовы координаты особой точки и углы ориентации рам карданова подвеса

$$\left. \begin{aligned} (Fa_{21} - y_s^{(1)}a_{22} - z_s^{(1)}a_{23})P_z - (Fa_{31} - y_s^{(1)}a_{32} - z_s^{(1)}a_{33})P_y &= 0 \\ (Fa_{11} - y_s^{(1)}a_{12} - z_s^{(1)}a_{13})P_z - (Fa_{31} - y_s^{(1)}a_{32} - z_s^{(1)}a_{33})P_x &= 0 \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Наличие только двух уравнений для трех координат показывает принципиальную невозможность прямых измерений декартовых координат точечного объекта посредством одной фотокамеры

Фотокамера, установленная на гиросtabilизированном подвесе, является превосходным средством для решения задачи слежения за различными объектами, наиболее простой моделью таких объектов может быть особая точка. Целью процесса слежения является отработка такого положения рам подвеса, чтобы изображение особой точки всегда стремилось, например, к центру фотоматрицы. Поэтому включение такого режима работы карданова подвеса должно начинаться с отключения гироскопической стабилизации. Сигналами, обеспечивающими режим слежения, должны быть сигналы отклонения изображения точки от центра фотоматрицы (y_s, z_s) (рис. 3).

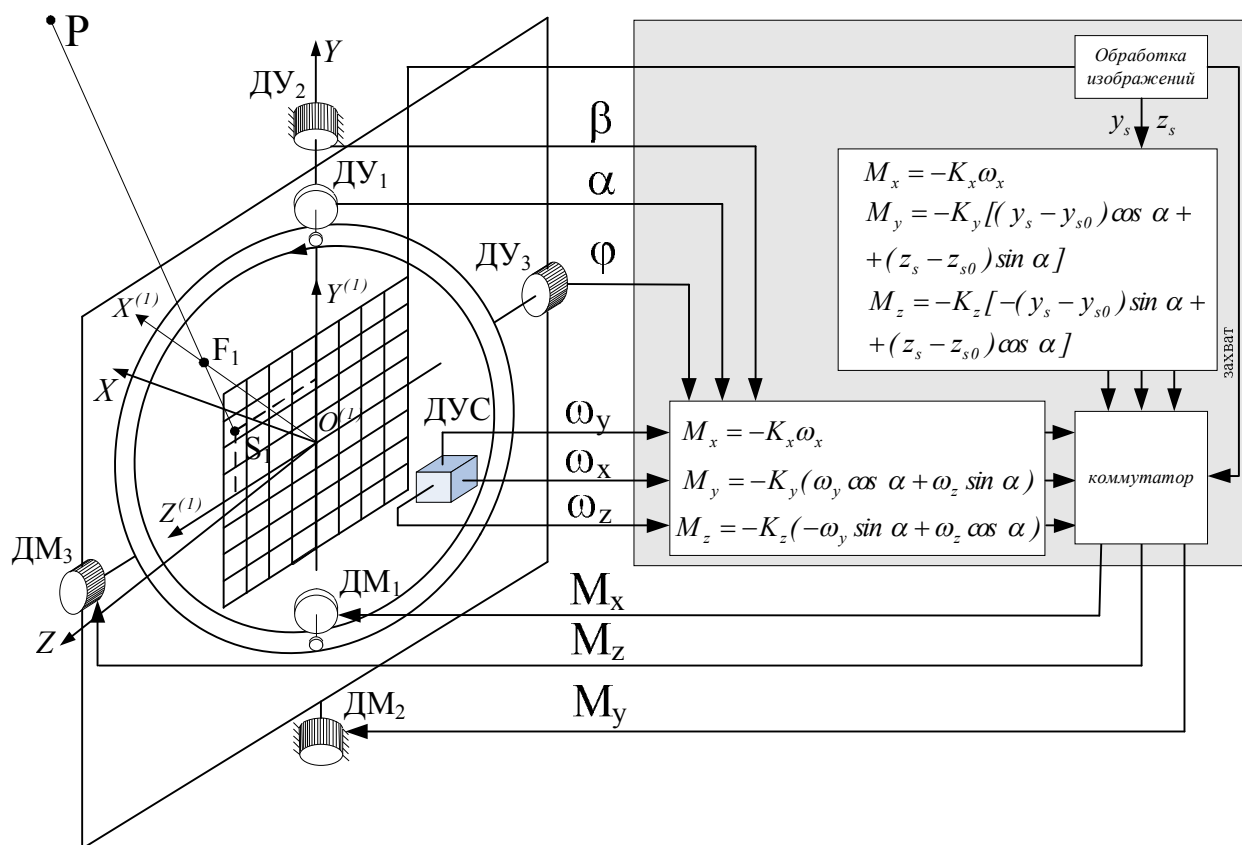


Рис. 3. Структура монокулярной СТЗ в режимах гиросtabilизации и слежения за объектом

Функционирование системы в режиме гиросtabilизации сводится к формированию моментов стабилизации пропорциональным проекциям вектора угловой скорости рамы крена, на которой установлен трехкомпонентный датчик угловой скорости (ДУС) на оси датчиков моментов ДМ₁, ДМ₂ и ДМ₃, причем знак момента стабилизации должен быть направлен противоположно знаку угловой скорости, что обеспечивает нулевой вектор угловой скорости креновой рамы в пространстве. Это обеспечивается следующими моментами

$$M_x = -K_x \omega_x, \quad (10)$$

$$M_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \Big|_y = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \cos \alpha + \omega_z \sin \alpha \\ -\omega_y \sin \alpha + \omega_z \cos \alpha \end{pmatrix} \Big|_y = -K_y (\omega_y \cos \alpha + \omega_z \sin \alpha), \quad (11)$$

$$M_z = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} \Big|_z = \begin{pmatrix} \omega_x \cos \phi + \sin \phi (\omega_y \cos \alpha + \omega_z \sin \alpha) \\ -\omega_x \sin \phi + \cos \phi (\omega_y \cos \alpha + \omega_z \sin \alpha) \\ -\omega_y \sin \alpha + \omega_z \cos \alpha \end{pmatrix} \Big|_z = -K_z (-\omega_y \sin \alpha + \omega_z \cos \alpha). \quad (12)$$

В режиме слежения за объектом выполняется обработка изображения с целью определения координат изображения объекта на фотоматрице, а затем процесс слежения сводится к такому перемещению рам карданова подвеса, который завершается заданным положением изображения на фотоматрице. Очевидно, что для точечного объекта возможно формирование сигнала управления только двух рам – тангажа и рыскания, рама крена может управляться, например тем же сигналом, что и в режиме стабилизации. Определим проекции сигнала с фотоматрицы на оси датчиков момента, получим

$$M_x = -K_x \omega_x, \quad (13)$$

$$M_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ y_s - y_{s0} \\ z_s - z_{s0} \end{pmatrix}_y = \quad (14)$$

$$= -K_y [(y_s - y_{s0}) \cos \alpha + (z_s - z_{s0}) \sin \alpha],$$

$$M_z = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ (y_s - y_{s0}) \\ (z_s - z_{s0}) \end{pmatrix}_z = \quad (15)$$

$$= -K_z [-(y_s - y_{s0}) \sin \alpha + (z_s - z_{s0}) \cos \alpha].$$

Коммутация режимов функционирования гиросtabilизированной платформы выполняется при наличии сигнала захват, который формируется модулем обработки изображения.

Дальнейшим развитием режима сопровождения объекта интереса является слежение за протяженным объектом, на котором можно выделить две и более особых точек, тогда обеспечивается управление всех трех рам карданова подвеса и стабилизируется не только линейное, но и угловое положение изображения объекта на фотоматрице.

Пусть на объекте интереса выделено две особые точки с координатами (y_{s1}, z_{s1}) и (y_{s2}, z_{s2}) , тогда процесс управления может быть основан на следующих соотношениях

$$M_x = -K_x \left(\frac{(y_{s1} + y_{s2})/2 - y_{s0}}{\sqrt{[(y_{s1} + y_{s2})/2 - y_{s0}]^2 + [(z_{s1} + z_{s2})/2 - z_{s0}]^2}} \right), \quad (16)$$

$$M_y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ (y_{s1} + y_{s2})/2 - y_{s0} \\ (z_{s1} + z_{s2})/2 - z_{s0} \end{pmatrix}_y = \quad (17)$$

$$= -K_y \{ [(y_{s1} + y_{s2})/2 - y_{s0}] \cos \alpha + [(z_{s1} + z_{s2})/2 - z_{s0}] \sin \alpha \},$$

$$M_z = \begin{pmatrix} \cos \phi & \sin \phi & 0 \\ -\sin \phi & \cos \phi & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \alpha & \sin \alpha \\ 0 & -\sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ (y_{s1} + y_{s2})/2 - y_{s0} \\ (z_{s1} + z_{s2})/2 - z_{s0} \end{pmatrix}_z = \quad (18)$$

$$= -K_z \{ -(y_{s1} + y_{s2})/2 - y_{s0} \} \sin \alpha + [(z_{s1} + z_{s2})/2 - z_{s0}] \cos \alpha \}.$$

Такое управление обеспечивает размещение изображения середины отрезка (s_1, s_2) в заданной точке (y_{s0}, z_{s0}) , с ориентацией изображения отрезка параллельно оси $O^{(1)}Z^{(1)}$. Следует отметить, что вариантов управления может быть много, в зависимости от задачи, которая ставится в процессе слежения.

Заключение

Таким образом, в режиме слежения за объектом интереса выполняется обработка изображения с целью определения его координат на фотоматрице, а затем процесс слежения сводится к такому перемещению рам карданова подвеса, который завершается заданным положением изображения на фотоматрице, при этом показана отработка такого положения рам подвеса, чтобы изображение особой точки, являющейся простой моделью объектов интереса, всегда стремилось к центру фотоматрицы, что улучшает качество изображения фотокамеры и снижает уровень вибрации во время движения ЛА, это позволяет не только следить за объектом интереса, но и производить сопровождение и захват различных объектов, а также решать задачи навигации ЛА с использованием монокулярной системы технического зрения в гиросtabilизированном подвесе.

Дальнейшим развитием режима сопровождения объекта интереса является слежение за протяженным объектом, на котором можно выделить две и более особых точек, тогда обеспечивается управление всех трех рам карданова подвеса и стабилизируется не только линейное, но и угловое положение изображения объекта на фотоматрице.

Литература

1. Williams K.W. A Summary of Unmanned Aircraft Accident // Incident Data: Human Factors Implications. Civil Aerospace Medical Institute. Oklahoma City. 2004. P. 287-294.
2. Шивринский В.Н. Навигационные системы летательных аппаратов. Ульяновск: УЛГТУ, 2012. 149 с.
3. Методы автоматического обнаружения и сопровождения объектов / Б.А. Алпатов, П.В. Бабаян, О.Е. Балашов, А.И. Степашкин. М.: Радиотехника, 2008. 176 с.
4. Логвин А.И., Волков А.В. Алгоритмы автоматического распознавания взлетно-посадочной полосы на видеоизображениях // Научный вестник МГТУ ГА. 2015. № 213. С. 115-117.
5. Пат. 2401436 Российская Федерация, МПК7 G 01s 11/00. Способ измерения координат объекта и устройство для его осуществления / Бондарев В.Г., Бондарев В.В., Бондарев М.В. № 2008110814/09; Бюл. № 28. 10 с.
6. Технология создания комплексов управления многоцелевых беспилотных и пилотируемых аэрокосмических систем / М.М. Сильвестров, Ю.И. Бегичев, А.Г. Варочко и др.; под ред. М.М. Сильвестрова. М.: Изд-во МБА, 2014. 296 с.
7. Рубцов Е.А., Пономарев В.В., Юрловская Н.А. Применение оптических систем на этапе посадки воздушного судна // Актуальные вопросы исследований в авионике: мат. межд. науч.-практ. конф. Воронеж: ВУНЦ ВВС ВВА, 2019. С. 121-124.
8. Бондарев В.Г. Видеонавигация летательного аппарата // Научный вестник МГТУ ГА. Серия Авионика и

электротехника. 2015. № 213 С. 65-72.

9. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике для инженеров и учащихся втузов. М.: Лань, 2018. 608 с.

10. Бондарев В.Г. Алгоритм системы технического зрения посадочного модуля // Механика, управление и информатика. 2013. № 1(13). С. 353-360.

Поступила 22.09.2019; принята к публикации 18.10.2019

Информация об авторах

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

Смирнов Дмитрий Андреевич — курсант факультета авиационного оборудования, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А), e-mail: vaiu@mil.ru

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

Николенко Александр Владимирович — инженер 21 отдела научно-исследовательского центра (проблем применения, обеспечения и управления авиацией ВВС), Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, Россия, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54А)

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

Вахмин Сергей Юрьевич — канд. физ.-мат. наук, преподаватель кафедры физики и химии, 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. 89081401791

UNMANNED AIRCRAFT TRACKING SYSTEM USING MONOCULAR TECHNICAL VISION SYSTEM IN A GYRO-STABILIZED SUSPENSION

V.G. Bondarev¹, D.A. Smirnov¹, N.A. Mayгурова¹, A.V. Nikolenko¹, K.Yu. Gusev², S.Yu. Vakhmin¹

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

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the structure of the monocular vision system in gyrostabilization and object tracking modes is presented. In the tracking mode of the object of interest, the image is processed to determine its coordinates on the photomatrix, and then the tracking process is reduced to such a movement of the cardan suspension frames, which ends with the specified position of the image on the photomatrix. At the same time, the development of such a position of the suspension frames is shown so that the image of a singular point, which is a simple model of objects of interest, always tends to the center of the photomatrix, which improves the image quality of the camera and reduces the level of vibration during the movement of aircraft. This allows one not only to monitor the object of interest, but also to escort and capture various objects, as well as to solve the problems of aircraft navigation using a monocular vision system in a gyro-stabilized suspension. A further development of the mode of tracking the object of interest is tracking an extended object, on which two or more special points can be distinguished, then all three frames of the gimbal are controlled and not only the linear, but also the angular position of the image of the object on the photomatrix is stabilized

Key words: monocular system, technical vision, tracking system, gyrostabilization mode, vibration level, lighthouse constellation

References

1. Williams K.W. “A summary of unmanned aircraft accident”, Incident data: human factors implications. Civil Aerospace Medical Institute, Oklahoma City, 2004, pp. 287-294.
2. Shivrinskiy V.N. “Aircraft navigation systems” (“Navigatsionnye sistemy letatel'nykh apparatov”), Ulyanovsk, UISTU, 2012, 149 p.
3. Alpatov B.A., Babayan P.V., Balashov O.E., Stepashkin A.I. “Methods for automatic detection and tracking of objects” (“Metody avtomaticheskogo obnaruzheniya i soprovozhdeniya ob"ektov”), Moscow, Radiotekhnika, 2008, 176 p.

4. Logvin A.I., Volkov A.V. "Algorithms for the automatic recognition of the runway on video images", *Scientific Bulletin of the MSTU GA (Nauchnyy vestnik MGTU GA)*, 2015, no. 213, pp. 115-117.
5. Bondarev V.G., Bondarev V.V., Bondarev M.V. "A method of measuring the coordinates of an object and a device for its implementation" ("Sposob izmereniya koordinat ob"ekta i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya"), pat. 2401436 Russian Federation, IPC7 G 01s 11/00. / No. 2008110814/09; bull. 28,10 p.
6. Sil'vestrov M.M., Begichev Yu.I., Varochko A.G. et al. "Technology for creating control systems for multi-purpose unmanned and manned aerospace systems" ("Tekhnologiya sozdaniya kompleksov upravleniya mnogotselevykh bespilotnykh i pilotiruemyykh aerokosmicheskikh sistem"), Moscow, Publishing House of IBA, 2014, 296 p.
7. Rubtsov E.A., Ponomarev V.V., Yurlovskaya N.A. "The use of optical systems at the stage of aircraft landing", *Proc. of Int. Scientific-Practical Conf.: Actual Research Issues in Avionics (Aktual'nye voprosy issledovaniy v avionike: mat. mezhd. nauch.-prakt. konf.)*, Voronezh, 2019 pp. 121-124.
8. Bondarev V.G. "Video navigation of the aircraft", *Scientific Bulletin of the MSTU GA (Nauchnyy vestnik MGTU GA)*, 2015, no. 213, pp. 65-72.
9. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. "A reference book in mathematics for engineers and students of technical colleges" ("Spravochnik po matematike dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov"), Moscow, Lan', 2018, 608 p.
10. Bondarev V.G. "Algorithm of the vision system of the landing module", *Mechanics, Management and Computer Science (Mekhanika, upravleniye i informatika)*, 2013, no. 1 (13), pp. 353-360.

Submitted 22.09.2019; revised 18.10.2019

Information about the authors

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

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

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

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

Konstantin Yu. Gusev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. (473) 243-77-20, e-mail: gusev_konstantin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-05175737>

Sergei Yu. Vakhmin Cand. Sc. (Phys.-Math.), Lecturer, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces "N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy" (54 «A» Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394064, Russia), tel. 89081401791

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С АСТАТИЧЕСКИМ МОДАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ И ФИЛЬТРОМ КАЛМАНА В КАЧЕСТВЕ НАБЛЮДАТЕЛЯ

А.П. Харченко¹, Ю.С. Слепокуров², Ю.Н. Каревская¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: дистанционное управление следящей системы (СС) с автоматическим регулятором или системой управления (СУ) на основе модального регулятора, наблюдателя и фильтра Калмана должно обеспечивать заданные показатели качества управления СС при минимальных аппаратных и программных средствах. При программной и аппаратной реализации модального регулятора, наблюдателя и фильтра Калмана необходимо учитывать требуемый объем информации, обеспечивающий заданные параметры качества управления. Исследуются варианты реализации автоматического регулятора СС с модальным регулятором и двумя фильтрами Калмана, установленными в цепи обратной связи, в цепи задающего сигнала и в цепи рассогласования. При моделировании в среде Matlab структурной схемы СС с векторно-матричным описанием фильтр Калмана используется в режиме прогнозирования, фильтрации и сглаживания. Один из установленных в структурную схему СС фильтров Калмана выполняет и функции наблюдателя для восстановления составляющих управляемого вектора состояния X . Сравниваются показатели качества настройки коэффициентов передаточной функции фильтра Калмана для трех вариантов структурных схем СС с модальным регулятором и фильтром Калмана при переменной и постоянной скорости изменения заданного входного сигнала. Для одной из структурных схем СС с модальным регулятором и двумя фильтрами Калмана исследуется влияние скорости задающего входного сигнала на коэффициент формирования входного сигнала с учетом выходного сигнала модального регулятора и на время задержки настройки коэффициентов передаточной функции фильтра Калмана. В зависимости от структурной СС с модальным регулятором и фильтром Калмана помехи задаются в цепи обратной связи, в цепи задания входного сигнала и в цепи рассогласования, то есть исследуется помехозащищенность или восстановление полезного сигнала при приеме и передаче

Ключевые слова: мобильные транспортные системы, структурная схема, астатический модальный регулятор, фильтр Калмана, временные характеристики, время задержки

Введение

При дистанционном управлении мобильными объектами в условиях воздействия возмущений и помех, например, мобильной транспортной системы с установленным промышленным роботом, выполняющим технологические операции (сборки, сварки, покраски) в соответствии с выполняемой технологической операцией, необходимо поддерживать безаварийный режим работы, а также должны контролироваться и регулироваться заданные параметры (например, поддерживаться постоянными). Это параметры качества управления: быстродействие и точность. Для современных автоматических систем перспективно использование следящих систем (СС) с модальным регулятором, наблюдателем и фильтром Калмана (ФК).

Фильтр Калмана может использоваться в режиме прогнозирования, фильтрации и сглаживания, то есть при фильтрации автоматически выполняется восстановление составляющих управляемого вектора состояния СС. Ал-

горитм построения фильтра Калмана строится с учетом законов математической статистики, что позволяет восстанавливать неизвестный параметр системы, уменьшая при этом влияние помех при измерении.

Известно, что при проектировании оптимального фильтра Калмана [1 – 2] предполагают, что на вход многомерного фильтра подается искаженный сигнал

$$X(t) = X(t) + X^*(t),$$

где $X(t)$, $X^*(t)$ – полезный сигнал и сигнал помехи.

При этом полагают, что существует идеальный выход системы $Y(t)$, который определяет желаемый в процессе оптимизации выход, определяемый соотношением

$$Y(t) = \int K_{фк}(t, \tau) * X(t, \tau) d\tau,$$

где $K_{фк}(t, \tau)$ – матрица импульсной переходной функции; τ – время задержки фильтра Калмана.

Вид матрицы импульсной переходной функции, используемый в структурных схемах, определяется поставленной целью, при

постановке цели фильтрации управляемых и управляющих сигналов выполняются условия

$$Y(t) = X(t, \tau), \quad K_{фк}(t, \tau) = C * \delta(t - \tau),$$

где C – единичная матрица; $\delta(t - \tau)$ – дельта функция.

Постановка задачи

Исследования СС с модальным регулятором, наблюдателем и фильтром Калмана в среде Matlab, которые входят в СУ СС, приведенные в [3 – 4], доказали возможность обработки сигнала управления в условиях воздействия возмущения и помех по входному сигналу и в цепи датчика. Для моделирования используется одноконтурная СС с одним датчиком обратной связи по положению burster 8820 EN, который имеет измерительный диапазон $350^\circ \pm 4^\circ$ с разрешением 0.01° . При векторно-матричном описании СС с объектом управления двигателем постоянного тока и использовании модального регулятора, наблюдателя и фильтра Калмана необходимо иметь информацию о физических величинах X_1 (перемещение), X_2 (скорость), X_3 (ток) и X_4 (напряжение). То есть необходимо устанавливать или дополнительные датчики (датчик тока – X_3 и датчик напряжения – X_4), или использовать для восстановления значений X_2 , X_3 и X_4 наблюдателя, но в условиях воздействия помех необходимо дополнительное при-

менение фильтра Калмана, который может использоваться и в режиме прогнозирования. Не исследованы возможности включения фильтра Калмана в структурную схему СС при сохранении заданных параметров качества регулирования для вариантов структурных схем, где отсутствует как элемент наблюдатель, имеющий строго определенные входные сигналы.

Существуют варианты реализации СУ СС с модальным регулятором и фильтром Калмана:

модальный регулятор, два фильтра Калмана – на входе и в цепи датчика, фильтр Калмана в цепи датчика выполняет и функции наблюдателя;

модальный регулятор, два фильтра Калмана, фильтр Калмана в цепи датчика выполняет и функции наблюдателя, второй фильтр Калмана установлен на выходе сумматора;

модальный регулятор, два фильтра Калмана, фильтр Калмана, установленный на выходе сумматора структурной схемы СС, выполняет и функции наблюдателя.

Во всех случаях для СС реализуется СУ в составе модального регулятора и двух фильтров Калмана.

На рис. 1 представлена структурная схема СС № 1 с астатическим модальным регулятором и двумя фильтрами Калмана, помехи создаются в цепи входного сигнала и в цепи обратной связи. Фильтр Калмана в цепи датчика выполняет функции наблюдателя.

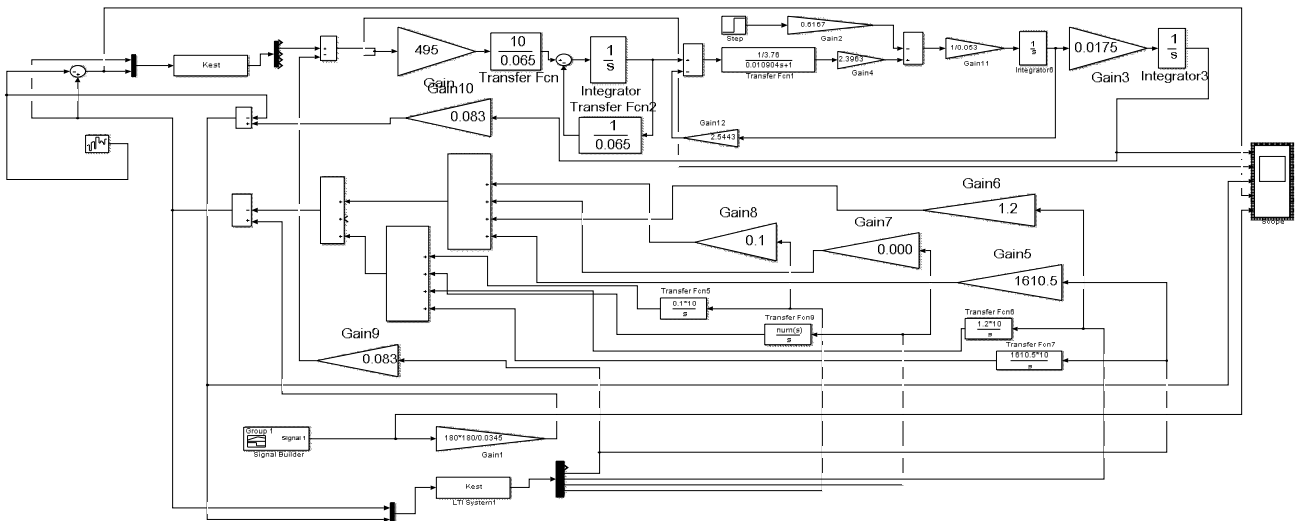


Рис. 1. Структурная схема СС № 1 с астатическим модальным регулятором и двумя фильтрами Калмана, установленными в цепи датчика и в цепи входного сигнала, фильтр Калмана в цепи датчика выполняет функции наблюдателя

Временные характеристики выходного сигнала, скоростной ошибки, выходного сигнала датчика, выходного сигнала фильтра

Калмана, входного сигнала СС № 1 с различной скоростью – рис. 2.

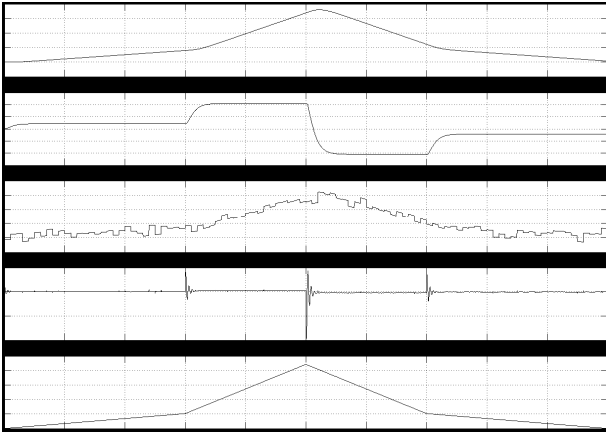


Рис. 2. Временные характеристики выходного сигнала, скоростной ошибки, выходного сигнала датчика, выходного сигнала фильтра Калмана и входного сигнала СС № 1 с различной скоростью

На рис. 3 представлена структурная схема СС № 2 с астатическим модальным регулятором и двумя фильтрами Калмана, первый фильтр Калмана в цепи датчика выполняет функции наблюдателя. Второй фильтр Калмана – в цепи рассогласования.

Временные характеристики выходного сигнала, скоростной ошибки, выходного сигнала датчика, выходного сигнала фильтра Калмана, входного сигнала СС № 2 с различной скоростью – рис. 4.

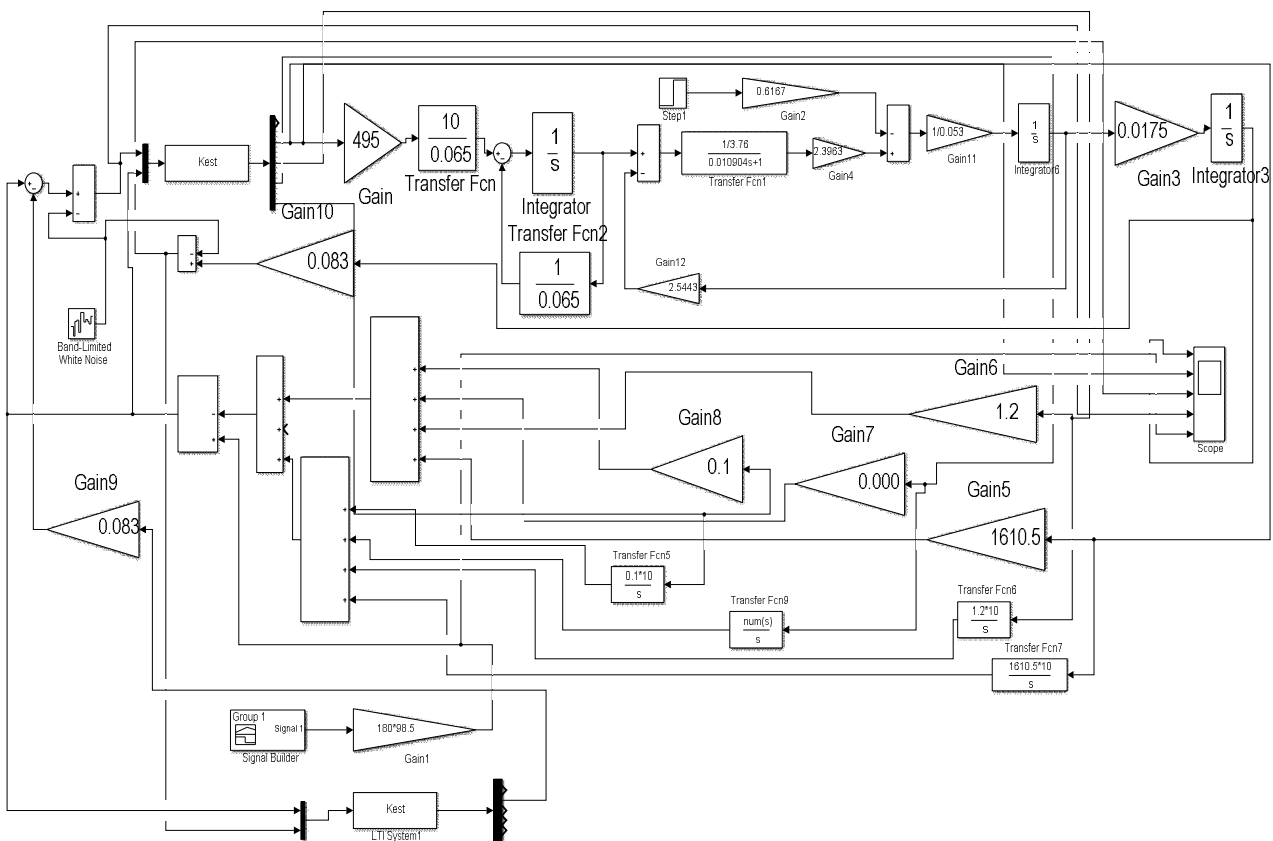


Рис. 3. Структурная схема № 2 СС с астатическим модальным регулятором и двумя фильтрами Калмана, установленными в цепи датчика и в цепи рассогласования, фильтр Калмана в цепи датчика выполняет функции наблюдателя

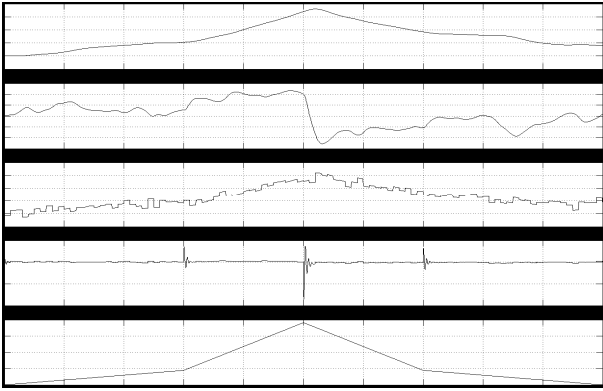


Рис. 4. Временные характеристики выходного сигнала, скоростной ошибки, выходного сигнала датчика, выходного сигнала фильтра Калмана и входного сигнала СС № 2 с различной скоростью

На рис. 5 представлена структурная схема СС № 3 с астатическим модальным регулятором и двумя фильтрами Калмана, второй фильтр Калмана в цепи рассогласования выполняет функции наблюдателя. Помехи создаются в цепи датчика и в цепи рассогласования.

Временные характеристики СС № 3 и СС № 1 совпадают. Для СС № 2 искажаются временные характеристики выходного сигнала и скоростной ошибки.

Используя переходной процесс настройки коэффициентов фильтра Калмана, сравним параметры качества фильтра Калмана СС № 1 – 3 при отработке угла 180 град. для переменной скорости задания входного сигнала: 14 град./сек. и 69 град./сек.

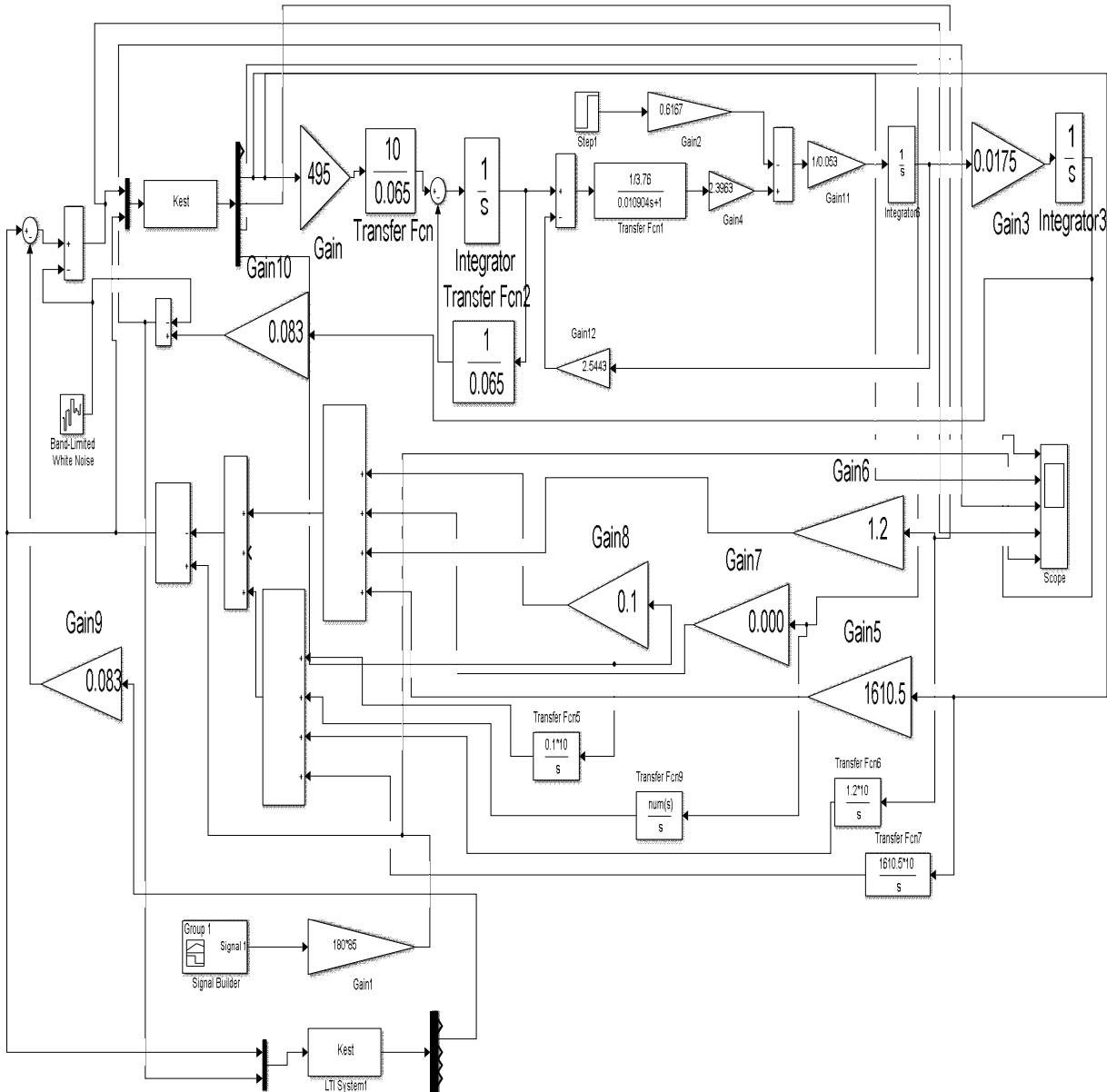


Рис. 5. Структурная схема СС № 3 с астатическим модальным регулятором и двумя фильтрами Калмана, фильтр Калмана в цепи рассогласования выполняет функции наблюдателя

В табл. 1 представлены параметры качества переходного процесса фильтра Калмана, где K_f – коэффициент усиления на входе СС с модальным регулятором и фильтром Калмана для отработки угла (0–180–0) град.; hm_1 , hm_2 – максимальная амплитуда переходного процесса фильтра Калмана при изменении скорости задания входного сигнала; τ – время задержки фильтра Калмана.

Таблица 1

Параметры качества фильтра Калмана при переменной скорости входного сигнала

Номер схемы	K_f	hm_1 град./сек.	hm_2 град./сек.	τ сек.
СС № 1	195.8	19	48	0.2
СС № 2	425.2	35	85	0.2
СС № 3	491,6	40	97	0.2

Исследования, приведенные в табл. 1, подтверждают, что время задержки τ фильтра Калмана не зависит от использования в СС № 1 – 3 первого или второго фильтра Калмана в качестве наблюдателя, при этом требуется подстройка коэффициентов K_f .

Максимальная амплитуда переходного процесса настройки фильтра Калмана в моменты изменения скорости входного сигнала (hm_1 , hm_2) СС № 2-3 соизмерима.

В табл. 2 представлены параметры качества переходного процесса настройки фильтра Калмана при постоянной заданной скорости входного сигнала, где K_f – коэффициент усиления на входе СС № 3 с модальным регулятором и фильтром Калмана для отработки заданного угла.

Таблица 2

Параметры качества фильтра Калмана при постоянной скорости входного сигнала

Скорость град./сек.	K_f	hm_2 / hm_1 град./сек.	τ сек.
90	523.43	135 / 63	0.2
180	523.43	266 / 120	0.2
270	523.43	400 / 185	0.2
360	523.43	536 / 247	0.2

Время задержки τ фильтра Калмана для трех вариантов структурных схем СС с модальным регулятором не более 0.2 сек. независимо от скорости изменения линейного входного сигнала. Чем больше скорость изменения линейного входного сигнала, тем больше максимальное значение hm переходного процесса настройки фильтра Калмана.

В табл. 3 представлены максимальная амплитуда переменных составляющих

управляемого вектора состояния СС № 1– 3 (X^*_{1m} , X^*_{2m} , X^*_{3m} и X^*_{4m}) для фильтра Калмана в режиме прогнозирования с учетом заданных коэффициентов (K_1 , K_2 , K_3 и K_4) модального регулятора СС, где $X^*_{im} = X_{im} * K_i$ – преобразованный выходной сигнал фильтра Калмана.

Таблица 3

Максимальная амплитуда переменных составляющих управляемого вектора состояния СС № 1 – 3 для фильтра Калмана в режиме прогнозирования с учетом заданных коэффициентов модального регулятора

Номер схемы	X^*_{1m}	X^*_{2m}	X^*_{3m}	X^*_{4m}
СС № 1	6389.23	1655.52	485.28	560.16
СС № 2	6589.26	1705.48	498.24	577.66
СС № 3	5236.11	1353.32	397.44	459.14

При сравнении параметров выходных сигналов фильтра Калмана в режиме прогнозирования, следует отменить соизмеримость максимальных амплитуд переменных составляющих управляемого вектора состояния для СС № 1–3.

В табл. 4 представлены параметры настройки качества фильтра Калмана и параметры качества СС № 1, 3 при заданном изменении коэффициентов модального регулятора согласно [4] (выбор полинома p), где ε_{2m} – максимальная скоростная динамическая ошибка СС; $K = 360$ град./сек. – скорость изменения входного сигнала.

Таблица 4

Параметры качества фильтра Калмана и СС при изменении коэффициентов модального регулятора

Кратность корней	τ сек.	hm_1 / hm_2	ε_{2m} / K	K_f
$2p$	0.2	19/67	0.024	10.2
$3p$	0.2	78/123	0.024	58.5
$4p$	0.2	156/289	0.024	185.9
$5p$	0.2	285/520	0.024	464.3
$6p$	0.2	523/1000	0.024	997.1

Исследования СС № 1–3, приведенные в табл. 3, показывают, что время задержки τ фильтра Калмана и максимальная скоростная ошибка ε_{2m} СС не зависят от коэффициентов модального регулятора.

В табл. 5 представлены время задержки τ фильтра Калмана и динамическая ошибка при изменении постоянных времени T структурной схемы СС с модальным регулятором и двумя

фильтрами Калмана и изменении входного сигнала ($0 - 360 - 0$) град.

Таблица 5

Время задержки τ фильтра Калмана и динамическая ошибка СС с модальным регулятором и двумя фильтрами Калмана при изменении постоянных времени T

Постоянная времени	τ сек.	ε_{2m}/K
T	0.22	0.024
$T/2$	0.2	0.019
$T/4$	0.185	0.0175

Выводы

В СС с модальным регулятором наблюдатель выполняет функции восстановления недостающих составляющих X_2 , X_3 и X_4 управляемого вектора состояния X , используя входной и выходной сигналы, но не подавляет помехи в системе управления.

В СС с модальным регулятором фильтр Калмана выполняет функции фильтрации и прогнозирования, при этом возможно включение фильтра Калмана в цепь датчика, в цепь входного сигнала и в цепь рассогласования, возникающее при этом время задержки τ одинаковое.

Коэффициенты формирования требуемого входного сигнала K_f для СС с учетом выходного сигнала модального регулятора незначительно отличаются.

При отработке различных углов задания при переменной скорости входного сигнала время задержки τ фильтра Калмана и коэффициент K_f постоянные.

С увеличением угла отработки при постоянной скорости входного сигнала увеличива-

ется максимальная амплитуда переменной составляющей переходного процесса настройки коэффициентов фильтра Калмана.

Амплитуды переменных составляющих управляемого вектора состояния для СС № 1 – 3 на выходе фильтра Калмана в режиме прогнозирования соизмеримые.

Изменение коэффициентов модального регулятора для СС с двумя фильтрами Калмана не влияет на время задержки τ фильтра Калмана и максимальную скоростную динамическую ошибку ε_{2m} .

Уменьшение времени задержки фильтра Калмана пропорционально уменьшению постоянных времени СС;

При аппаратной и программной реализации вариантов СУ СС в составе модального регулятора и двух фильтров Калмана вычислительные ресурсы соизмеримые.

Литература

1. Методы классической и современной теории автоматического управления: учебник; 2-е изд., перераб. и доп. Т. 2. Статистическая динамика и идентификация систем автоматического управления / под ред. К.А. Пупкова, Н.Д. Егупова. М.: Издательство МГУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 640 с.
2. Теория автоматического управления: методы исследования автоматических систем в среде Matlab: учеб. пособие / А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, В.В. Кольцова, О.В. Белоусова. Воронеж: ВГТУ, 2012. 201 с.
3. Харченко А.П., Слепокуров Ю.С., Каревская Ю.Н. Исследование следящей системы в Matlab при возмущении в системе управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 4. С. 41 – 45.
4. Харченко А.П., Слепокуров Ю.С., Каревская Ю.Н. Исследование следящей системы с астатическим модальным регулятором в Matlab // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 1. С. 35 – 41.

Поступила 01.08.2019; принята к публикации 16.10.2019

Информация об авторах

Харченко Александр Петрович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: N210713@yandex.ru

Слепокуров Юрий Сергеевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры автоматизации и вычислительной техники, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, Солнечная, 29Б), e-mail: usrs@list.ru

Каревская Юлия Николаевна – старший преподаватель кафедры электропривода, автоматизации и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: eafts@yandex.ru

RESEARCH OF SERVO SYSTEM WITH ASTATIC MODAL REGULATOR AND A KALMAN FILTER AS OBSERVER

A.P. Kharchenko¹, Yu.S. Slepokurov², Yu.N. Karevskaya¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: remote control of the servo system (SS) with an automatic controller or control system (CS) based on a modal controller, observer and Kalman filter should provide specified indicators of SS control quality with minimal hardware and software. In the software and hardware implementation of the modal controller, observer and Kalman filter, it is necessary to take into account the required amount of information that provides the specified control quality parameters. Variants of the implementation of the automatic SS controller with a modal controller and two Kalman filters installed in the feedback circuit, in the drive signal circuit and in the mismatch circuit are investigated. When modeling a structural diagram of a SS with a vector-matrix description in the Matlab environment, the Kalman filter is used in the prediction, filtering, and smoothing mode. One of the Kalman filter installed in the structural diagram of the SS performs the functions of an observer to restore the components of the controlled state vector X. The quality indicators of setting the transfer function coefficients of the Kalman filter for three variants of the structural diagrams of the SS with a modal controller and Kalman filter are compared for a variable and constant rate of change of a given input signal. For one of the SS structural diagrams with a modal controller and two Kalman filters, the influence of the speed of the driving input signal on the input signal formation coefficient is studied taking into account the output signal of the modal controller and on the delay time of setting the transfer coefficients of the Kalman filter. Depending on the structural SS with a modal controller and Kalman filter, the interference is set in the feedback circuit, in the input signal setting circuit and in the mismatch circuit, i.e., noise immunity or restoration of the useful signal during reception and transmission is studied

Key words: mobile transport systems, block diagram, automatic regulator, astatic modal regulator, Kalman filter, time characteristics

References

1. Pupkov K.A., Egupov N.D. ed. "Methods of classical and modern theory of automatic control. Statistical dynamics and identification of automatic control systems" ("Metody klassicheskoy i sovremennoy teorii avtomaticheskogo upravleniya. Statisticheskaya dinamika i identifikatsiya sistem avtomaticheskogo upravleniya"), Moscow, Publishing House of N.E. Bauman Moscow State University, 2004, 640 p.
2. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Koltsova V.V., Belousova O.V. "Theory of automatic control: methods of research of automatic systems in Matlab: manual" ("Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: metody issledovaniya avtomaticheskikh sistem v srede Matlab: ucheb. posobie"), Voronezh State Technical University, 2012, 201 p.
3. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Kanevskaya Yu.N. "Investigation of the tracking system in Matlab under perturbation in the control system", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 4, pp. 41-45.
4. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Kanevskaya Yu.N. "Study of the tracking system with astatic modal regulator in Matlab", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 1, pp. 35-41.

Submitted 01.08.2019; revised 16.10.2019

Information about the authors

Aleksandr P. Kharchenko Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: N210713@yandex.ru

Yuriy S. Slepokurov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, International Institute of Computer Technologies (29B Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: usrs@list.ru

Yuliya N. Karevskaya, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: eayts@yandex.ru

ТЕХНИЧЕСКАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ ВЫСОКОСКОРОСТНОГО ИНФОРМАЦИОННОГО КАНАЛА РАДИОСВЯЗИ С БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА НА НАЗЕМНЫЙ ПУНКТ УПРАВЛЕНИЯ

Д.Г. Пантенков¹, Н.В. Гусаков², А.Т. Егоров¹, А.А. Ломакин¹,
В.П. Литвиненко³, В.И. Великоиваненко⁴, Е.Ю. Лю-Кэ-Сю⁵

¹Акционерное общество «Кронштадт», г. Москва, Россия

²Акционерное общество «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий», г. Смоленск, Россия

³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

⁴Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения», г. Королёв, Россия

⁵Общество с ограниченной ответственностью «СТЭК.КОМ», г. Москва, Россия

Аннотация: в настоящее время в РФ активно развивается беспилотная авиация в интересах различных заказчиков. При этом по состоянию на 2019 год отечественной промышленностью разработан типоряд комплексов с беспилотными летательными аппаратами (БЛА) различного класса и целевого назначения – лёгкие («Типчак», «Zala 421-04М», «Элерон-3»), средние («Элерон-10», «Форпост», «Корсар»), тяжелые («Орион»), сверхтяжелые («Альтаир», «Охотник»), которые решают как задачи повышения обороноспособности и безопасности РФ, так и отвечают интересам гражданских потребителей. Одним из ключевых элементов БЛА является радиолиния передачи командно-телеметрической и целевой информации прямой радиовидимости между БЛА и наземным пунктом управления и обработки информации (НПУОИ). Беспилотные летательные аппараты тяжелого класса могут иметь в своем составе одновременно несколько целевых нагрузок – оптико-электронную систему, радиолокационную систему, систему радиомониторинга и т.д. В связи с тем, что поток информации, поступающий с целевых нагрузок на вход радиолинии, в пиковые моменты может быть достаточно большим, серьезные требования предъявляются как к аппаратуре первичной обработки целевой информации на борту БЛА и её сжатия в аппаратуре регистрации информации, так и к пропускной способности радиолинии в части передачи целевой информации на НПУОИ для последующего её анализа и обработки оператором комплекса. В данной статье рассмотрен перспективный метод OFDM модуляции (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов) и COFDM модуляции (OFDM с канальным кодированием) применительно к высокоскоростному информационному каналу БЛА-НПУОИ, представлены результаты расчетов параметров высокоскоростной радиолинии, а также проведена оценка помехоустойчивости OFDM сигнала с каскадным кодом (низкоплотностным LDPC-кодом совместно с кодом Рида-Соломона)

Ключевые слова: комплексы с беспилотными летательными аппаратами, высокоскоростная информационная радиолиния прямой видимости, OFDM-сигналы, COFDM, помехоустойчивое кодирование, LDPC-код, код Рида-Соломона, вероятность ошибки, сигнал/шум, бортовые антенны, наземные антенны

Введение

Современную систему связи БЛА с НПУОИ на уровне обработки сигнала целесообразно рассматривать как программно-определяемую сетевую радиосистему, что позволит в зависимости от условий прохождения сигнала на трассе БЛА–НПУОИ–БЛА (БЛА–БЛА) адаптивно изменять виды и параметры сигнально-кодовых конструкций (модуляцию, выходную мощность передатчика, виды канального кодирования сигнала, параметры расширения спектра сигнала, скорость передачи данных).

Сетевая радиосистема управления базируется на создании пространственно-распределенных, работающих на различных физических принципах, в широком диапазоне частот систем разведки, наблюдения и связи, многоканальной сетевой дублируемой защищенной системы передачи больших объемов данных в масштабе времени близком к реальному, многоуровневой иерархической системы оценки обстановки, принятия решений, контроля эффективности использования энергетических и частотных ресурсов при выполнении целевых задач. По существу, использование сетевых принципов построения системы сводится к реализации адаптивной радиосети с коммутацией пакетов, а эффективность оценивается по

критерию минимума среднего времени доставки по сети от исходящего узла ко входящему [1]. При этом информационный канал является полудуплексным каналом с временным разделением. Канал разбивается на последовательность интервалов (окон), длительность которых достаточна для передачи одного информационного пакета и передачи положительной ответной квитанции от узла назначения. Тогда маршрутизация сообщения осуществляется на основании маршрутной информации, получаемой каждым узлом от соседних узлов по служебному каналу. Задача маршрутизации – определение последовательности узлов ретрансляции для передачи пакета и выбор оптимальной последовательности. Предполагается, что в каждом транзитном узле пакет становится в очередь и ожидает передачи. В процессе передачи пакета анализируются следующие параметры сети: вероятность искажения пакета на маршруте; количество повторений на передачу на маршруте; суммарная загрузка узлов, входящих в маршрут; суммарная длина очереди узлов, входящих в выбранный маршрут.

Проведенный анализ [1-10] показывает, что в высокоскоростных информационных радиопереносных БЛА-НПУОИ активно используются:

- COFDM-сигналы, обладающие простой аппаратной реализацией, высокой помехоустойчивостью, способностью к иерархической модуляции, обеспечивают устойчивый прием и проведение трансляций в движении, несклонны к межсимвольным помехам и интерференции между поднесущими, высокой эффективностью использования радиочастот. К недостаткам можно отнести жесткие требования: по высокой синхронизации частоты и времени, чувствительности к линейности трактов (высокий пик-фактор), чувствительность к эффекту Доплера, фазовый шум гетеродинов. Широкая полоса канала, в которой можно найти лучшие частоты, и метод передачи высокоскоростных данных на основе OFDM-сигналов – наиболее эффективны в условиях многолучевого распространения радиосигналов и наличия отраженных сигналов высокого уровня на входе приемного устройства;

- ACM: адаптивное кодирование и модуляция (используемая сигнально-кодовая конструкция от кадра к кадру меняется в зависимости от текущего состояния канала). ACM нашло применение в общепризнанном стандарте DVB-S2, в котором используются следующие виды модуляции – BPSK, QPSK, 16APSK, 32APSK. ACM имеет много достоинств, но в то же время

необходимо обратить внимание на то, что имеются жесткие требования по синхронизации, а также при использовании модуляции высокого порядка в условиях повышенного шума требуется вводить пилот-сигналы [1].

В командных радиопереносных линиях целесообразно рассмотреть методы широкополосной передачи (с прямым расширением спектра или псевдослучайной перестройкой рабочих частот), позволяющей осуществлять разделение нескольких лучей с различным запаздыванием для устранения эффекта замиранья, вызванного многолучевым распространением сигналов, а также работать в условиях преднамеренных помех [1-3].

При многолучевом распространении радиоволн на пересеченной местности и множественных переотражениях сигналов актуальна технология многоантенных систем MIMO, базирующаяся на применении метода цифрового формирования диаграммы направленности антенны. Наличие двух антенн на корпусе ЛА позволяет решить проблему поддержки надежной связи при разных ориентациях корпуса ЛА относительно направления на наземную станцию. Основное условие успешного применения MIMO-систем – стационарность коэффициентов передачи радиоканала с момента их оценивания до завершения трансляции массива данных [1-5].

В качестве используемых кодов возможно применение различных кодов, в том числе каскадных кодов (БЧХ и LDPC), которые применяются и уже хорошо зарекомендовали себя в телекоммуникационной отрасли, в том числе в форматах DVB-S2, DVB-T2.

Применительно к функционированию радиопереносной линии передачи командно-телеметрической и целевой информации применяются две разновидности интерфейсов.

Интерфейсы обмена узкополосной информацией. Что касается выбора интерфейсов, то тут необходимо отметить, что к наиболее распространенным последовательным интерфейсам относятся RS-485, МКИО (мультиплексный канал информационного обмена, ГОСТ Р 52070-2003), CAN (ARINC 825). Они существенно отличаются по аппаратной реализации, алгоритмам организации обмена и способам упаковки и передачи данных.

Интерфейсы обмена широкополосной информацией. Среди современных стандартов построения информационно-телекоммуникационной инфраструктуры, интегрированной модульной Авионики можно отметить 2 наиболее перспективных стандарта: ARINC 664 («Информационные сети летатель-

ных аппаратов»), ARINC 818 («Цифровой видеоинтерфейс авиационного радиоэлектронного оборудования с высокой скоростью передачи данных»).

В основу стандарта ARINC 664 положен протокол AFDX (авиационный полнодуплексный коммутируемый Ethernet), стандартизованный рабочей группой ARINC и построенный на базе широко известного стандарта IEEE 802.3.

Применение данного протокола позволяет использовать традиционную логическую структуру современных сетей (стек протоколов TCP/IP). Вместе с этим данный протокол обеспечивает требования к бортовым авиационным системам в части надежной передачи пакетов и ограничений по задержке передачи. В основе сети AFDX лежит определение всех узлов и их сетевых адресов, а также создание избыточности линейного оборудования и аппаратного обеспечения на физическом уровне.

1. Основные требования (вариант) к информационной радиолинии из состава КБЛА тяжелого класса, схема организации информационного обмена между составными частями из состава КБЛА

В рамках данной статьи зададимся следующими основными требованиями для информационной радиолинии БЛА-НПУОИ:

- дальность связи: 250 км;
- диапазон частот: С (4/6 ГГц);
- вероятность ошибки на бит передаваемой информации: не хуже 10^{-7} ;
- скорость передачи информации: до 20 Мбит/сек;
- задержка передачи данных: не более 100 мс.

На рис. 1 представлена схема организации обмена целевой и командно-телеметрической информацией между двумя БЛА (вариант) и НПУОИ.



Рис. 1. Схема организации обмена целевой и командно-телеметрической информацией между двумя БЛА (вариант) и НПУОИ

2. Методы формирования и кодирования радиосигналов

2.1. Формирование частотных каналов в радиоканале С-диапазона

Допущения и условия:

- основной радиоканал С-диапазона частот должен обеспечивать обмен информацией между бортовым терминалом передачи данных (БТПД) и наземным терминалом передачи данных (НТПД) из состава ИРЛ С-диапазона частот от 4,4 до 5,0 ГГц в полосе шириной 0,6 ГГц;

- должны быть обеспечены работа в составе сети не менее двух БЛА и наземных терминалов за счет многолитерности, возможность выбора литер для всех каналов передачи данных, участвующих в информационном обмене по команде с НПУОИ. Всего переключаемых литер будет не менее 20.

Весь рабочий диапазон предлагается разделить на 20 независимых частотных каналов связи с фиксированной центральной частотой. Центральные частоты соседних каналов разнесены на 30 МГц (рис. 2).

Каждый приемопередатчик может работать в любом из 20 каналов по выбору оператора НПУОИ.

Работа нескольких БЛА и наземных терминалов в одной пространственной области достигается путем:

- частотного разделения каналов;
- применения направленных антенн;
- автоматической регулировки мощности.

Все БЛА, находящиеся в одной зоне, работают независимо и без общей синхронизации. Однако по команде с внешнего устройства наземный терминал или БЛА могут переключиться на любой другой свободный канал [2,4].

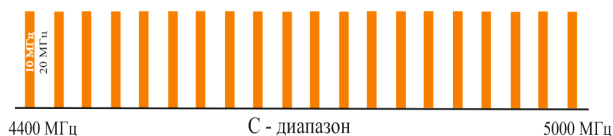


Рис. 2. Двадцать каналов с защитными интервалами в С-диапазоне частот

Для обеспечения номинальной скорости передачи 10 Мбит/с в каждом канале необходимо использовать ширину спектра сигнала порядка 10 МГц. Таким образом, используя защитные интервалы шириной 20 МГц, получим помеху по соседнему каналу на уровне минус 45 дБн.

Для успешного декодирования сигнала необходимо отношение сигнал/шум на входе приемника на уровне 2 дБ. Таким образом, передатчик соседнего канала может быть расположен в 140 раз ближе к нашему приемнику, чем наш передатчик. Это соответствует наихудшему случаю, когда азимут нашего передатчика и передатчика соседнего канала совпадают. В противном случае, за счет направленных антенн достигается дальнейшее подавление соседнего канала до 30 дБ и более (т.е. отношение расстояний может быть еще увеличено в 30 раз).

Дополнительным фактором, уменьшающим влияние соседних каналов, является автоматическая регулировка мощности передатчика, не позволяющая включать передатчик на полную мощность при малом расстоянии до приемника и высоком отношении сигнал/шум [2].

Выбор ширины полосы канала связи зависит от скорости передаваемых данных и вида модуляции. В бортовом и наземном радиомодемах предлагается применять квадратурную амплитудную модуляцию 4-QAM, при которой на каждой поднесущей частоте COFDM-сигнала передаются по два бита.

Можно выбрать полосу уже 10 МГц, но для этого потребуется переходить на более сложную модуляцию 16-QAM, когда на каждой поднесущей передаются уже по 4 бита. В этом случае полосу можно уменьшить, но отношение сигнал/шум потребуется выше.

Расширение полосы возможно, но надо иметь в виду, что при этом возрастает мощность шума в канале и вероятность попадания радиопомех эфира в полосу канала [1,4,13,14].

Предлагается ширину полосы частотных каналов выбирать из ряда: 5; 10; 20 или 30 МГц. Это позволит более гибко подходить к выбору параметров канала в зависимости от условий распространения и ослабления радиосигнала. Тем самым будет выполнено требование ТЗ по автоматической адаптации скорости передачи данных и мощности излучаемого сигнала в зависимости от уровня помех и условий распространения сигнала.

При наличии резервного канала следует отметить, что одновременная работа основного и резервного канала достигается путем частотного разделения каналов с использованием соответствующих фильтров, а также пространственным разнесением антенн [1, 2, 4].

2.2. Формирование высокоскоростных и низкоскоростных каналов в одном радиоканале

От БТПД на НТПД по каналу «вниз» (DNL10M1) должны передаваться высокоскоростные информационные данные, например, со скоростью не менее 10 Мбит/с, а по каналу «вверх» – от НТПД к БТПД (UPL100K1) информационные данные со скоростью не менее 100 кбит/с.

Указанные каналы передачи информации образуются в одной полосе частот шириной 10 МГц с использованием временного разделения, что позволяет более эффективно использовать частотный диапазон и сохранять 20 каналов с частотным разделением.

Кроме этого, в основном канале

С-диапазона между НТПД и БТПД в обе стороны должны передаваться низкоскоростные командно-телеметрические данные со скоростью 16 кбит/с (каналы DNL16K1 и UPL16K1). Эти симметричные каналы также формируются в полосе канала с использованием временного разделения [1, 4, 13-16].

Все цифровые данные в канале формируются и синхронизируются таким образом, что каждый информационный поток периодически получает канал в свое распоряжение на фиксированный промежуток времени. На рис. 3 представлены временные диаграммы использования ресурса канала между прямым и обратным информационными каналами, а также между высокоскоростными информационными и низкоскоростным командно-телеметрическим каналами [1].

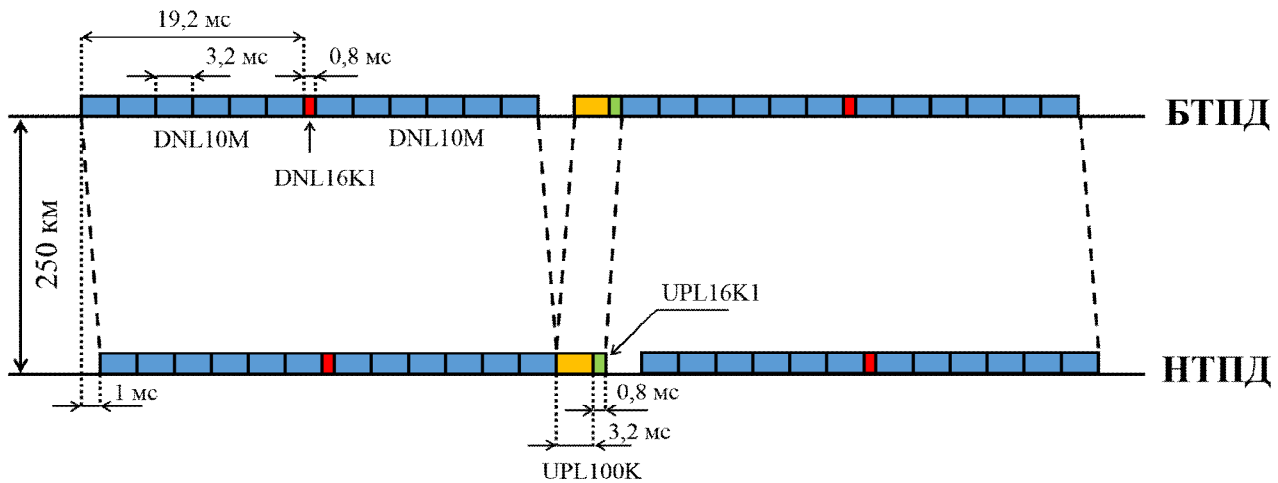


Рис. 3. Временная диаграмма использования ресурса канала

Большая часть времени канала выделена на высокоскоростную передачу данных с бортового терминала на наземный терминал (длинные блоки на рис. 3). Передача осуществляется блоками из 64800 бит и длительностью 3,2 мс. Каждый блок представляет собой многочастотный OFDM- сигнал с каскадным помехоустойчивым кодированием данных методом LDPC и Рида-Соломона (РС). Эти блоки заняты FEC-блоками [3].

После передачи шести FEC-блоков (суммарной длительностью 19,2 мс) выделяется короткий временной слот длительностью 0,8 мс на передачу низкоскоростных телеметрических данных с борта БЛА на наземный терминал также в виде OFDM-сигнала, но с прореженным числом поднесущих (малые блоки на рис. 3). Затем выделяется еще 19,2 мс для передачи высокоскоростных данных с БТПД на НТПД, по-

сле чего бортовой терминал переводится в режим приема низкоскоростных данных со скоростью 100 кбит/с, передаваемых по обратному каналу от наземного терминала (длительностью 3,2 мс).

После приема всех OFDM-блоков от бортового терминала наземный терминал переходит в режим передачи двух командных блоков: один FEC-блок с повышенной избыточностью длительностью 3,2 мс, второй более короткий длительностью 0,8 мс.

Если высокоскоростные данные не передаются по каким-либо причинам, то вся полоса и все время выделяются для передачи низкоскоростных данных для повышения чувствительности и помехоустойчивости приоритетного командно-телеметрического канала (временные диаграммы представлены на рис. 4).

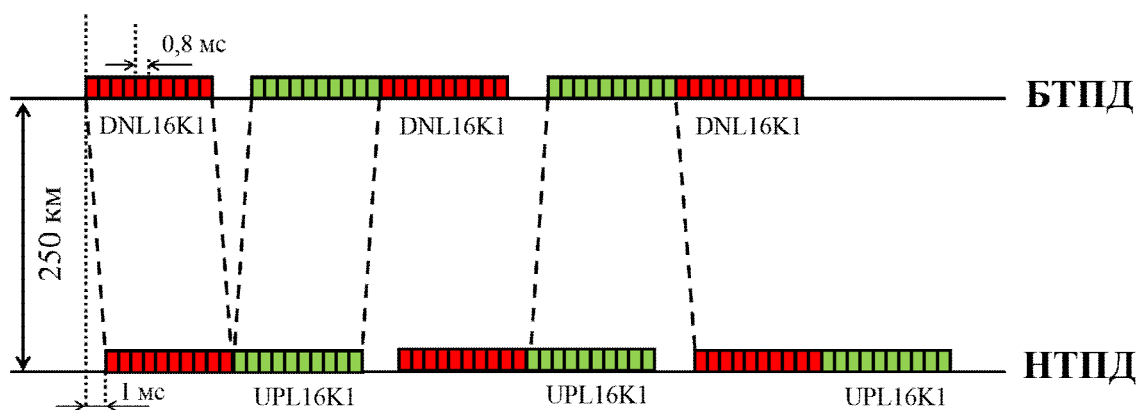


Рис. 4. Временная диаграмма (при отсутствии передачи высокоскоростной информации)

В основном высокоскоростном канале максимальное время выделяется для передачи информационных данных от БТПД на НТПД. Для обратного информационного и командно-телеметрического каналов временные окна значительно меньше [2].

Частотное разделение 20-ти каналов, временное разделение прямых и обратных потоков данных внутри одного канала, выделение временных окон для организации передачи командно-телеметрических данных позволяют наиболее эффективно использовать весь частотный диапазон для организации многоканальной связи с разной пропускной способностью [1, 4, 13-16].

2.3. Синхронизация основного канала

Синхронизация выполняется в два этапа: вначале, после ориентации антенн, устанавливается начальная синхронизация на низкой скорости, а затем с использованием этих результатов устанавливается синхронизация в высокоскоростном канале.

После подачи питания на наземный или бортовой комплект оборудования возможно потребуется незначительное время для прогрева некоторых элементов, критичных к низким температурам. После этого требуется несколько секунд для загрузки процессоров и других компонентов из ПЗУ. Далее система приступает к поиску синхронизации и установки связи [4].

Приемная сторона осуществляет поиск синхронизации на основе структуры сигнала. В детерминированные моменты времени передатчик начинает посылку OFDM-блока. Приемник производит оцифровку этого высокочастотного сигнала, сохраняя отсчеты в буфере процессорной системы обработки данных. В данном буфере накапливаются два OFDM-блока суммарной длительностью 1,6 мс (16200 отсчетов). По-

иск первоначальной синхронизации начинается с определения положения начала OFDM-символа в буфере, осуществляется поиск и циклическое замыкание длиной 512 отсчетов в структуре сигнала автокорреляционным методом (рис. 5).

После нахождения начала OFDM-блока необходимо компенсировать сдвиг поднесущих частот. Производится несколько обработок блока OFDM (преобразование Фурье) с небольшими сдвигами по частоте, после демодуляции структура сигнала сравнивается со структурой 4-QAM. Подбирается сдвиг, который обеспечивает наибольшее совпадение структуры принятого сигнала со структурой сигнала 4-QAM по принципу максимального отношения правдоподобия. Правильность определения синхронизации проверяется на этапе помехоустойчивого декодирования по скорости сходимости принятой последовательности к кодовому слову. Для предложенного способа нахождения синхронизации достаточно принять 2-3 OFDM-блока по 0,8 мс.

Поддержание синхронизации приемника и передатчика осуществляется путем сравнения демодулированного сигнала с исходным принятым сигналом.

После кратковременного (десятьки секунд) пропадания сигнала на входе приемника нет необходимости искать начало OFDM-блока. Достаточно скомпенсировать сдвиг поднесущих частот [2].

Для восстановления связи после ее потери требуется восстановить все точные настройки приемника на сигнал передатчика с учетом возможных изменившихся условий приема. Для этого приемнику типично требуется несколько пакетов данных, что заведомо меньше 200 мс.

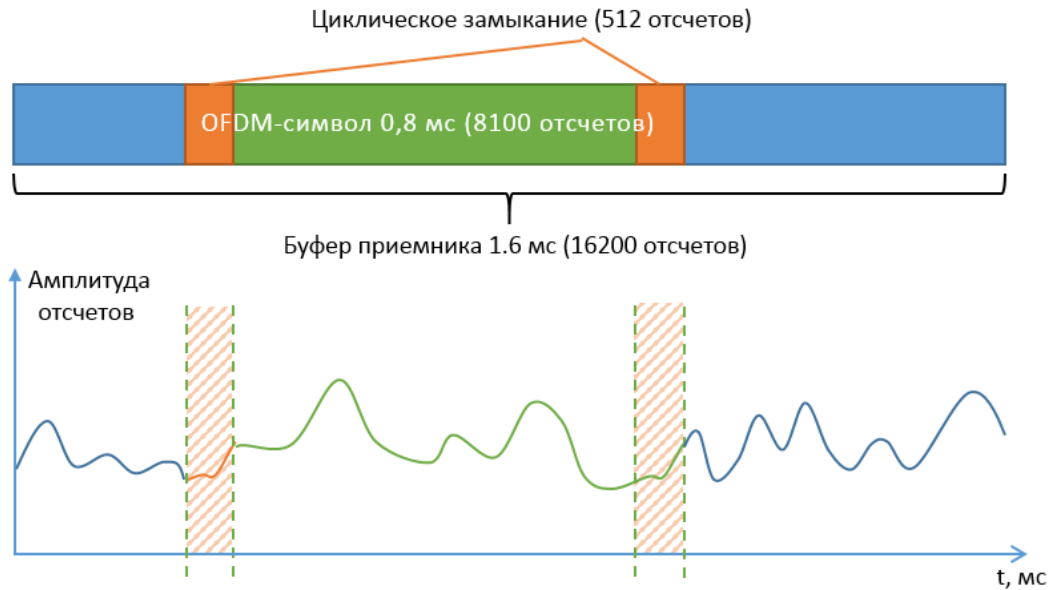


Рис. 5. Процесс поиска и циклического замыкания 512 отсчетов в структуре сигнала автокорреляционным методом

Особенность синхронизации заключается в том, что она производится по информационному сигналу после приема и анализа нескольких десятков, а в плохих условиях распространения - нескольких сотен FEC-блоков кодированных данных. При этом традиционные синхроимпульсы, которые выделяются на фоне случайных информационных данных и являются главной и наиболее доступной мишенью для пеленгации и атак средств радиоэлектронной борьбы (РЭБ) противника, в предлагаемом радиоканале не используются, т.к. это привело бы к существенному снижению его реальной помехоустойчивости в условиях преднамеренных помех [2, 8].

2.4. Преобразование цифрового сигнала

На рис. 6 показана структура сигнала в виде блоков данных, которые передаются строго в определенные моменты времени, известные цифровым блокам на передающей и приемной сторонах.

Последовательность преобразования исходного фрагмента битовых данных, входящих в один FEC-блок, длительностью 3.2 мс, представлена на рис. 6.

Передаваемые данные делятся на блоки с длиной, соответствующей выбранной скорости кодирования FEC-кода, и кодируются помехоустойчивыми кодами каскадным способом, в котором код Рида-Соломона является внешним кодом, а низкоплотный LDPC-код – внутренним. При этом к передаваемым данным добавляются избыточные символы, которые ис-

пользуются для исправления ошибок на приемной стороне. Для борьбы с пакетными ошибками и для уменьшения схожести передаваемых и исходных данных производится псевдослучайное перемешивание бит итогового кодового слова с последующим маскированием псевдослучайной последовательностью с очень большим периодом повторения ($N = 2^{256}$). Полученный битовый вектор модулируется, формируя OFDM-блоки, и передается по радиоканалу [2].

Таким образом, каждый FEC-блок представляет собой псевдослучайную последовательность нулей и единиц. В этом потоке данных нет синхроимпульсов или синхропакетов, которые бы упростили выделение более крупных информационных данных [2].

В один FEC-блок входят четыре OFDM-символа длительностью по 0,8 мс, которые содержат 16200 бит.

OFDM-блоки передаются непрерывно без явного разделения защитными интервалами, что затрудняет анализ сигнала. В структуре передаваемого сигнала отсутствуют синхроимпульсы, поэтому восстановить структуру FEC-блоков невозможно [2].

Используемый вид цифрового сигнала усложняет его анализ и выявление его структуры. Проверка целостности принятой информации, осуществляемая как при снятии маскирования ПСП, так и в процессе декодирования FEC-блока и обработки на уровне информационных пакетов, обеспечивает высокую имитостойкость передаваемых данных [1-5].

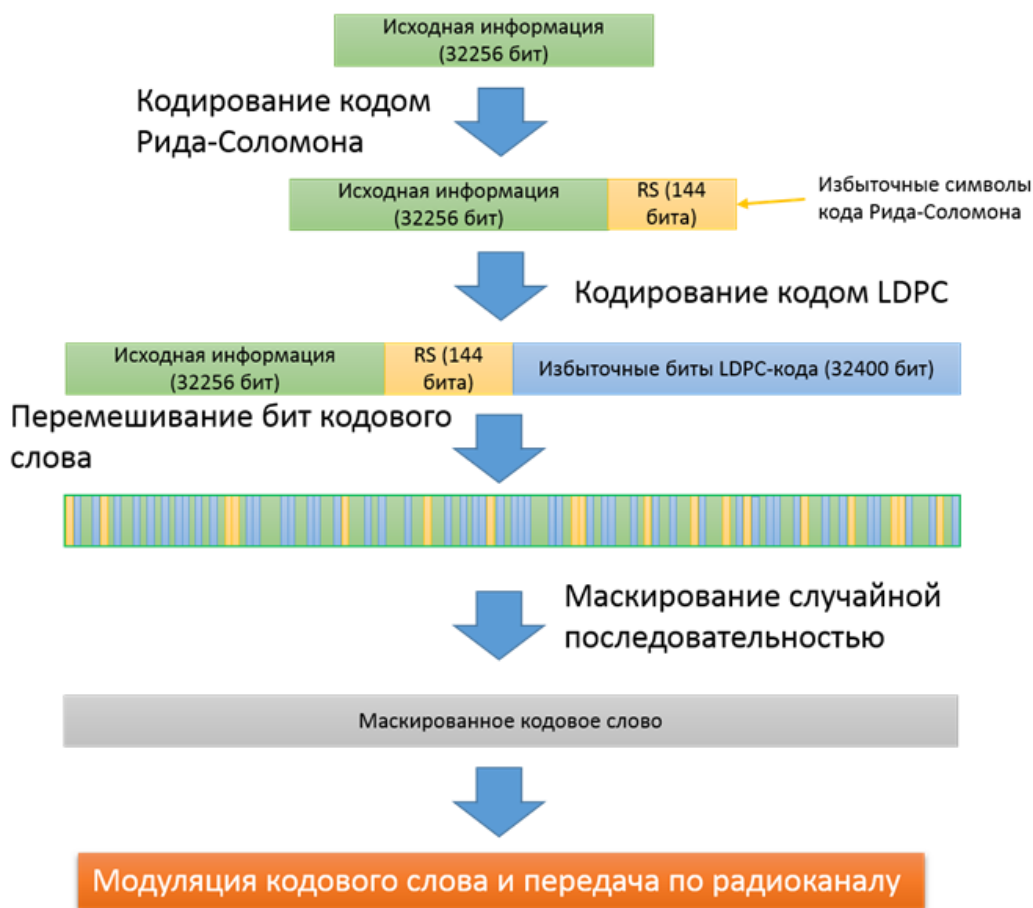


Рис. 6. Последовательность преобразования исходного фрагмента битовых данных, входящих в один FEC-блок длительностью 3.2 мс

С учетом вышесказанного, в данной статье оптимальные параметры OFDM-сигнала канала в С-диапазоне:

- 8000 поднесущих или число комплексных коэффициентов преобразования Фурье, поэтому появление мощной помехи на любой частоте в рабочей полосе сигнала может привести к подавлению только небольшого числа поднесущих (это достигается применением специальных сглаживающих фильтров в процессе цифрового демодулирования COFDM-сигнала);
- размер FEC-блока с помехоустойчивым кодированием – 64800 бит;
- скорость кодирования - 1/4, 1/2, 3/4;
- тип модуляции - 4-QAM, при данном виде модуляции на одной несущей передаются по два бита и при заданном количестве поднесущих один OFDM-символ в кодированном виде может передать до 16000 бит. Модуляция на каждой поднесущей, наименее чувствительная к ошибкам, обусловленным шумом, и требует минимального отношения сигнал/шум;
- циклическое замыкание - 512 отсчетов или 1/16 длительности символа;

- длительность защитного интервала - 15 мкс, что допускает разность путей прямого и отраженного сигналов до достаточно большого значения - 4500 м. Такое решение обеспечивает хорошую защиту от интерференции прямого и отраженных сигналов и в то же время не позволяет существенно снижать скорость информационных данных;

- помехоустойчивое кодирование LDPC, что позволяет принимать сигнал при уровне сигнал/шум не более 2 дБ;
- длительность OFDM-символа 500 мкс.

Основным фактором, определяющим допустимую величину блокирующей помехи, является мгновенный динамический диапазон ВЧ и ПЧ тракта приемника, а также АЦП.

Предлагаемый вариант OFDM-метода наиболее близок к варианту DVB-T (8k). Конечно, он менее универсальный, но более оптимальный для решения поставленной задачи. В частности, цифровой сигнал имеет вид псевдослучайной последовательности практически без периода повторения. Это говорит о высокой разведзащищенности и имитостойкости радио-

канала С-диапазона [1].

3. Методы помехоустойчивого кодирования в высокоскоростном информационном радиоканале БЛА-НПУОИ

Помехоустойчивое кодирование является обязательным преобразованием информационных данных в современных цифровых каналах связи. Методы кодирования постоянно совершенствуются. Например, еще недавно популярными были турбо-коды, в европейском стандарте цифрового телевидения первого поколения DVB-T применялось сверхточное кодирование в сочетании с кодом Рида-Соломона. Но в новой аппаратуре подобные коды не применяются. Так, в стандарте цифрового телевидения второго поколения DVB-T2 применяется наиболее эффективный и на сегодняшний день самый популярный метод низкоплотных кодов LDPC или с низкой плотностью проверок на четность.

Практика кодирования на базе LDPC- кодов показала существенное повышение помехозащищенности по сравнению с защитой, используемой в DVB-T. Выигрыш в уровне сиг-

нал/шум за счет LDPC-кодирования может составлять до 3 дБ для типичного уровня ошибок и при одинаковой доле контрольных символов. По существу, это улучшение позволяет повысить пропускную способность канала за счет более сложных типов модуляции примерно на 30%.

На рис. 7 представлены зависимости вероятности битовой ошибки декодирования от отношения сигнал/шум на бит для FEC-кодов со скоростью кодирования 1/2, используемых в современных системах связи, при одинаковых параметрах модуляции. Минимальное отношение E_b/N_0 равно величине 0.2 дБ (пунктиром « $C=1/2$ » на рис. 7 показан предел Шеннона). Видно, что при переходе от турбокодирования (кривая TCC DVB-S) к низкоплотным кодам (кривая LDPC DVB-S2) выигрыш в уровне сигнал/шум может составлять до 3 дБ для типичного уровня ошибок и при одинаковой доле проверочных символов [1, 2, 3, 8, 15]. Также из рис. 7 видно, что скорость уменьшения вероятности битовой ошибки от отношения сигнал/шум на бит больше для семейства LDPC-кодов.

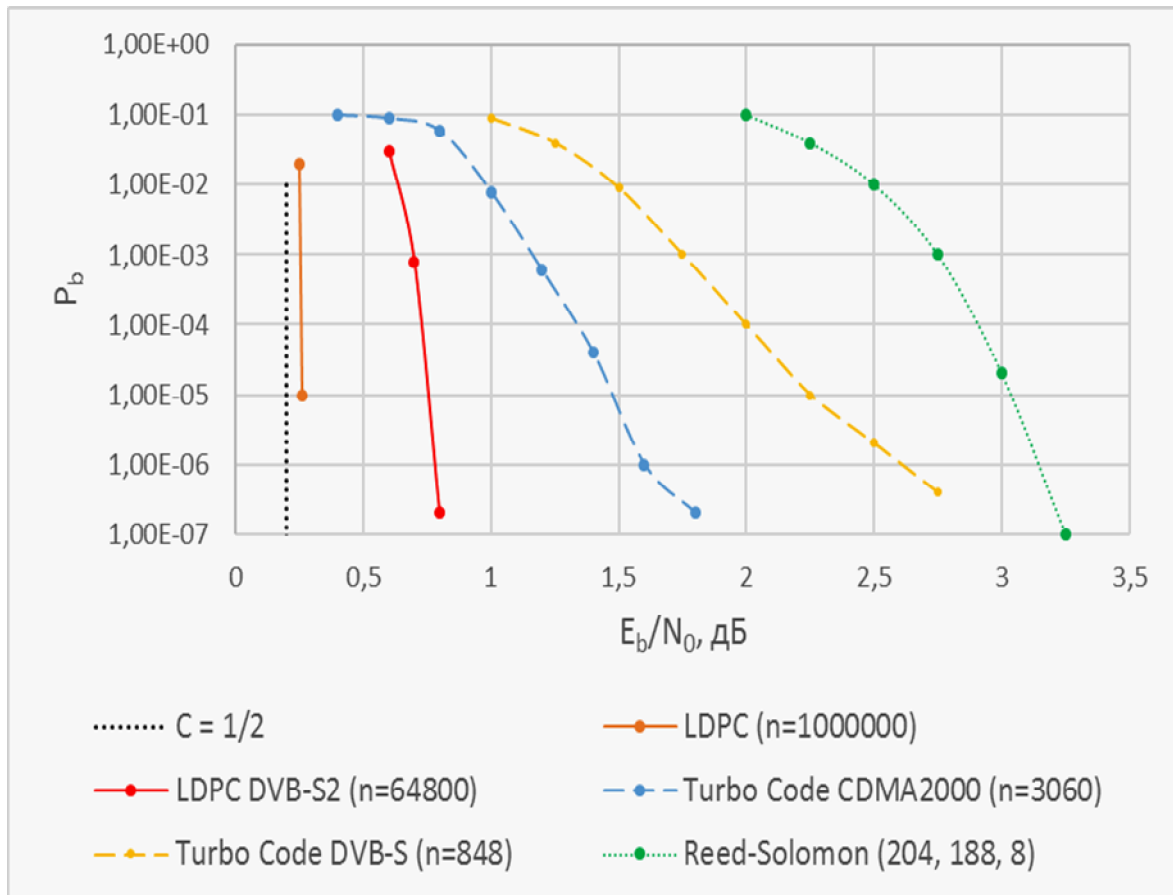


Рис. 7. Зависимости вероятности битовой ошибки декодирования от отношения сигнал/шум на бит для FEC-кодов со скоростью кодирования 1/2, используемых в современных системах связи, при одинаковых параметрах модуляции

LDPC-код большой длины с мягким режимом декодирования позволяет приближаться к теоретическому пределу Шеннона при Гауссовском характере помех. Однако этот код является также эффективным для широкополосных импульсных помех и помех, вызывающих стирание сигнала.

Низкоплотностные коды являются линейными блоковыми кодами. Математически операция кодирования для получения кодового слова сводится к умножению исходного информационного вектора на порождающую матрицу. Эта операция связывает биты исходного сообщения с проверочными битами. Порождающая матрица построена так, что одни и те же биты входят в разные проверки, обеспечивая высокую корректирующую способность кода [2, 3].

Особенностью низкоплотностного кода является малая плотность значимых элементов в матрице – единиц, означающих связь битов кодового слова с соответствующими проверками. Также за счет этой особенности достигается относительная простота реализации средств кодирования [2, 3, 8, 15].

Корректность принятого кодового слова можно проверить, умножив его на проверочную матрицу, обратную порождающей матрице. Если в результате умножения получается нулевой вектор, то в принятом кодовом слове нет ошибок [1, 2, 8, 15].

Как видно из рис. 7, для эффективного декодирования длина кодового слова N должна быть очень большой, что приводит к очень большому размеру проверочной матрицы. Например, в случае длины кодового слова $N = 64800$ бит и скорости кодирования $R = 1/2$ про-

верочная матрица имеет 32400 строк и 64800 столбцов. Эффективное и быстрое декодирование в соответствии с такой большой матрицей делает разработку декодера нетривиальной задачей. Наибольшую эффективность представляют низкоплотностные коды со случайным заполнением проверочной матрицы (кривая LDPC ($N=1000000$) на рис. 7), но в этом случае нет возможности производить декодирование параллельно. Поэтому в современных стандартах цифровой связи построение проверочной матрицы LDPC-кода производят псевдослучайным образом по специальному закону, что позволяет реализовать параллельное декодирование при сохранении высокой корректирующей способности кода [1].

Построение эффективной структуры проверочной матрицы низкоплотностного кода является очень трудоемкой задачей, поэтому в данной статье использовалась структура кода на базе стандарта цифрового спутникового вещания второго поколения DVB-S2. Структуры LDPC-кодов имеют высокую корректирующую способность, позволяющую при применении методов итеративного декодирования практически вплотную приблизиться к пропускной способности канала по Шеннону, а также позволяют осуществлять обработку до 360 проверок в параллель при декодировании. Пример структуры проверочной матрицы представлен на рис. 8 ($R = 2/3$, $N = 16200$). Линиями и штрихами помечены единицы, белым цветом – нули. Как видно из рис. 8, количество единиц значительно меньше числа нулей, следовательно, матрица является низкоплотностной.

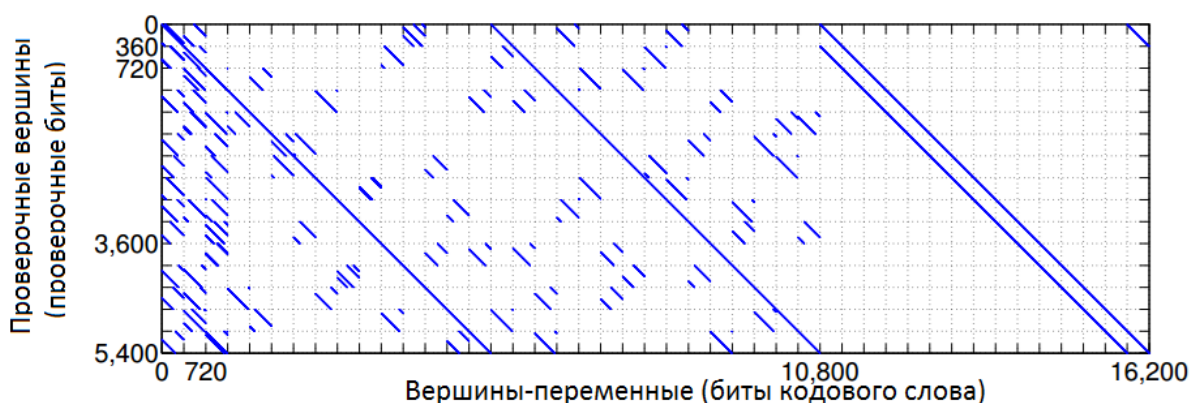


Рис. 8. Структура проверочной матрицы ($R = 2/3$, $N = 16200$)

Для обеспечения адаптивной подстройки корректирующей способности декодера и скорости передачи данных в статье реализованы

три скорости кодирования для длины кодового слова $N = 64800$ бит (рис. 9).

Скорость кодирования $R=1/2$ обеспечивает

передачу данных при отношении сигнал/шум 1.0 дБ, скорость кодирования $R=1/4$ позволяет улучшить корректирующую способность кода на 3 дБ при уменьшении скорости передачи данных на 25%.

Скорость кодирования $R=3/4$ позволяет увеличить скорость передачи данных на 25% при ухудшении корректирующей способности кода на 3 дБ. Для уменьшения задержек передачи данных были реализованы 3 дополнительные скорости кодирования для длины кодового сло-

ва $N=16200$, которые могут быть задействованы при необходимости [1-4,13-16].

Закон построения генерирующих матриц и таблицы с константами для разных скоростей кодирования позволяют реализовать кодер низкоплотностного кода с выбранными параметрами. В таком кодере будет применяться каскадное кодирование. Исходная информация кодируется «слабым» кодом Рида-Соломона с малым числом проверочных символов.

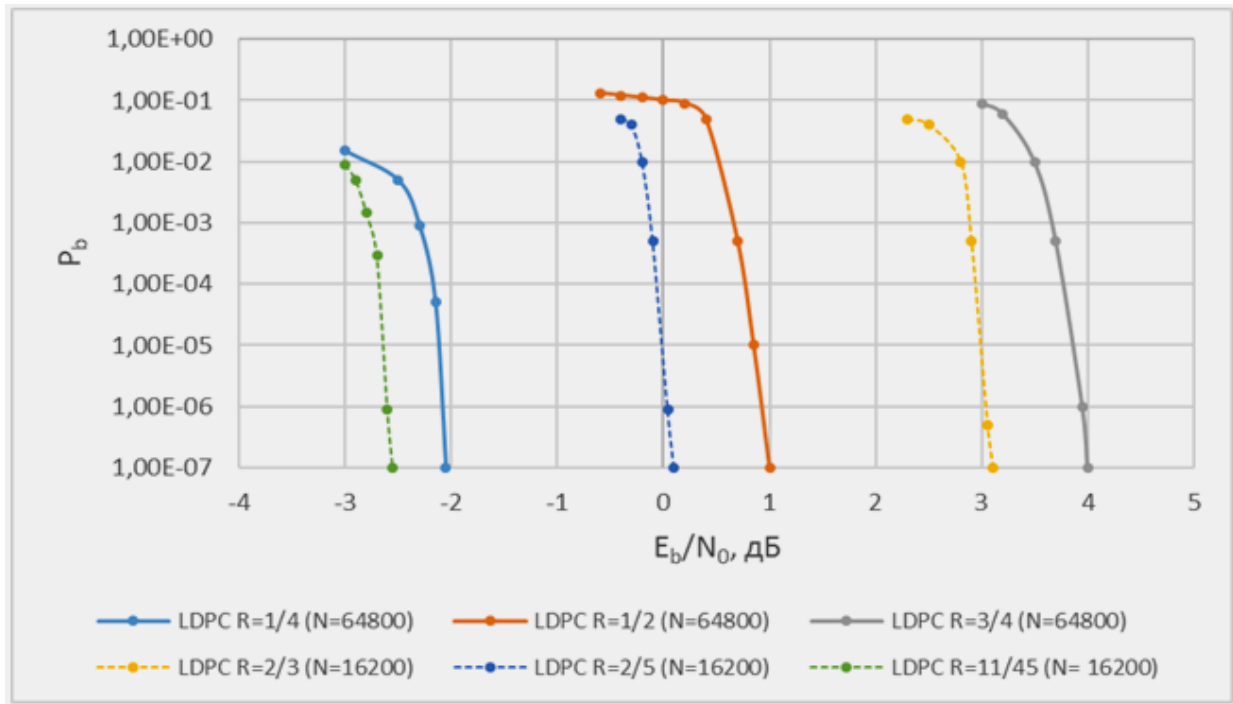


Рис. 9. Зависимости вероятности битовой ошибки декодирования от отношения сигнал/шум на бит для LDPC-кодов с разной скоростью кодирования (11/45, 1/4, 2/5, 1/2, 2/3, 3/4) для двух длин кодового слова (64800 и 16200) при одинаковых параметрах модуляции

Полученный вектор кодируется LDPC-кодом с заданной скоростью кодирования, а затем биты полученного кодового слова перемешиваются псевдослучайным способом (рис. 10).

Перемешивание необходимо для борьбы с пакетными ошибками. Если при передаче в кодовом слове подряд будут внесены несколько ошибок, то при восстановлении исходного порядка бит эти ошибки будут распределены по длине всего кодового слова более равномерно (рис. 11).

Низкоплотностный код обеспечивает высокую помехоустойчивость. Код Рида-Соломона используется для нивелирования области насыщения вероятности ошибки LDPC-кода, в которой скорость уменьшения вероятности ошибки при повышении отношения сигнал/шум значительно замедляется, что может привести к при-

сутствию нескольких остаточных ошибок в декодированном кодовом слове даже при хорошем отношении сигнал/шум. Более того, кодом Рида-Соломона контролируется целостность передаваемой информации [1-4, 13-16].

Для повышения чувствительности приемника за счет улучшения качества декодирования низкоплотностного кода на практике реализуется демодулятор, выдающий на выходе «мягкие» значения демодулированных бит кодового слова. В отличие от «жестких» бит, где значения принятого вектора имеют только два значения 0 или 1, демодулятор выдает вероятности приема 0 или 1. В нем имеется 127 квантовых уровней, где -63 означает прием «уверенной» единицы, 63 прием «уверенного» нуля, а 0 означает неопределенность в значении принятого бита.

В реализованном декодере LDPC-кода используется метод итеративного декодирования на основе принципа мажоритарного многократного обновления значений вероятностей демодулированных бит принятого кодового слова. Биты кодового слова, взаимосвязанные проверочными битами друг с другом, участвуют в проверках, в ходе которых обновляют вероятности друг друга стремясь получить искомое кодовое слово. То есть правильные биты на основе своих вероятностей пытаются «подтянуть» значения вероятностей битов, принятых с ошибками, к верным значениям. Процесс итеративного декодирования небольшого отрезка кодового слова при малом отношении сигнал/шум представлен на рис. 12. Как видно из рис. 12, правильные биты (точки) «усиливают» свое значение после каждой итерации, стремясь к «уве-

ренному» значению по модулю равному 63. Биты, содержащие ошибки (квадратики), вначале уменьшают свою вероятность до нуля, а затем меняют знак на правильный и также начинают стремиться к «уверенному» уровню. После завершения третьей итерации на данном участке кодового слова все биты имеют правильные значения. Если искомое кодовое слово найдено, то декодер завершает декодирование.

При использовании «мягких» демодулированных бит появляется возможность использовать «стирания», то есть зануление демодулятором вероятностей для заведомо ошибочных бит. Реализованный FEC-код показывает высокую степень устойчивости к стираниям. Как видно из табл. 1, для длины кодового слова $N=64800$ возможно стереть до 37.5% демодулированных бит, при сохранении декодируемости блока.

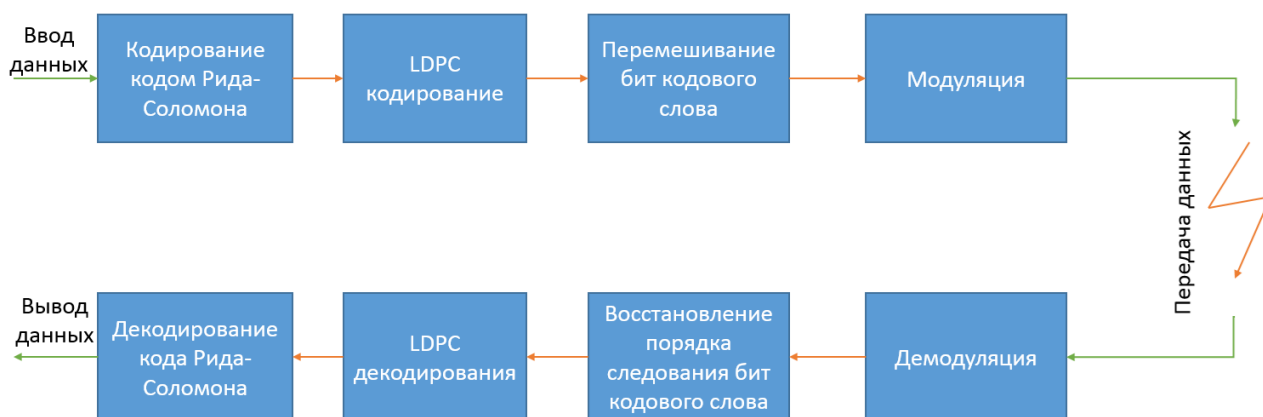


Рис. 10. Структурная схема, обеспечивающая реализацию перемешивания бит псевдослучайным образом

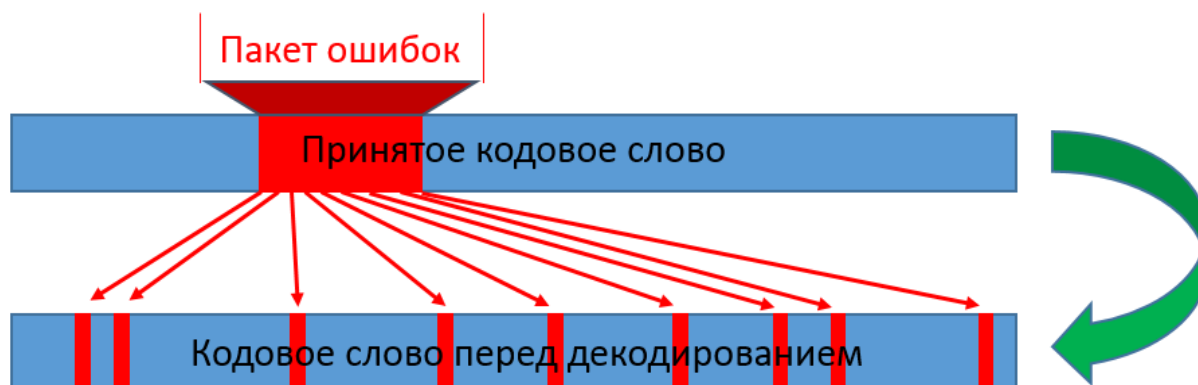


Рис. 11. Распределение пакета с ошибками по всей длине кодового слова



Рис. 12. Процесс итеративного декодирования небольшого отрезка кодового слова при малом отношении сигнал/шум

Таблица 1
Требование к отношению сигнал/шум в зависимости от скорости кодирования для разного процента стертых битов

Скорость кодирования, R	Необходимое отношение сигнал/шум на бит (дБ) для сохранения декодируемости кодового слова N = 64800 бит			
	0 % стертых бит	12.5 % стертых бит	25 % стертых бит	37.5 % стертых бит
1/4	-2.05 дБ	-2.05 дБ	0 дБ	3 дБ
1/2	1.1 дБ	2.1 дБ	5.1 дБ	нет
3/4	4.05 дБ	8 дБ	нет	нет

Рассмотренный высокоэффективный механизм каскадного помехоустойчивого кодирования включает кодирование информации кодом Рида-Соломона с последующим низкоплотным кодированием и перемешиванием бит. Данная схема позволяет обеспечить высокие скорости передачи данных при малом отношении сигнал/шум на бит кодового слова. На рис. 13 представлена зависимость вероятности ошибки на бит на выходе декодера от вероятности ошибки на бит на входе. Для обеспечения требуемого уровня ошибки на бит не хуже 10^{-6} при скорости кодирования $R=1/2$ вероятность ошибки на входе декодера должна быть не более $5 \cdot 10^{-2}$.

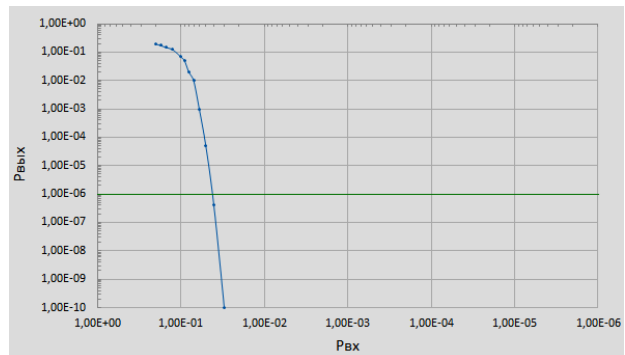


Рис. 13. Зависимость вероятности ошибки на бит на выходе декодера от вероятности ошибки на бит на входе

В рамках взаимодействия БЛА с НПУОИ используется временное разделение прямого и обратного каналов, поэтому цифровой блок обработки поочередно работает на прием и на передачу, используя высокочастотные аналоговые блоки приема и передачи. Для передачи информационных данных, а также командно-телеметрических низкоскоростных данных в С-диапазоне используются сигналы COFDM. То есть используется ортогональное частотное разделение каналов с помехоустойчивым кодированием.

Каскадное кодирование кодом Рида-Соломона и LDPC-кодом длиной 64000 с мягким декодированием обеспечивает прием высокоскоростных данных при отношении сигнал/шум около 2 дБ и плотности скорости передачи 1 бит/Гц.

Различие высокоскоростного и низкоскоростного каналов заключается в числе поднесущих, используемых для передачи, а также степени кодирования помехоустойчивого кода. Блок-схема последовательности преобразования данных представлена на рис.12.

В случае передачи данных ЦОС выполняет:

- каскадное помехоустойчивое кодирование кодами Рида-Соломона и LDPC с различной избыточностью;
- получение FEC-блоков;
- сложение с ПСП;
- выполняется модуляция каждой поднесущей COFDM-символа (по два бита на одну поднесущую, модуляция 4-QAM);
- OFDM-сигнал во временной плоскости формируется с помощью быстрого обратного преобразования Фурье (ОБПФ), реализованного в ПЛИС.

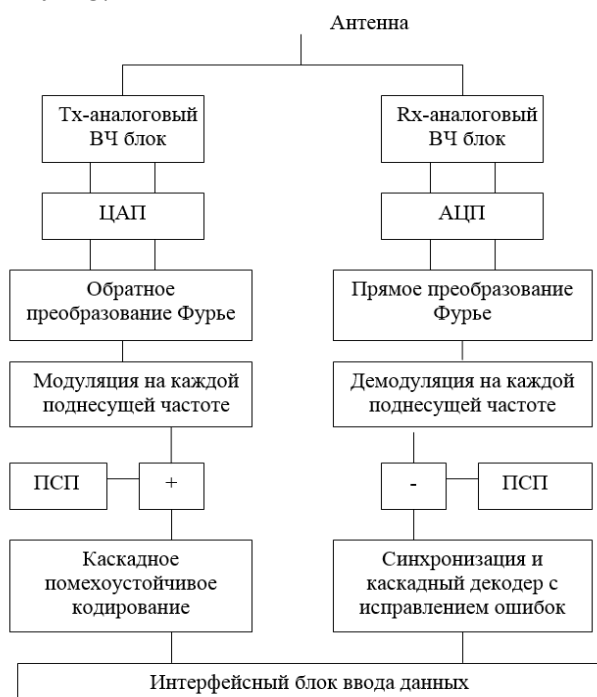


Рис. 14. Блок-схема последовательности преобразования данных

В приемнике происходят преобразования в обратной последовательности:

- выходной аналоговый сигнал ВЧ-блока поступает на АЦП и получается два цифровых квадратурных сигнала;
- выполняется прямое преобразование Фурье, результатом которого является получение спектра сигнала и 8000 комплексных коэффициентов;
- демодуляция на каждой поднесущей частоте;
- синхронизация и декодирование FEC-

блока с исправлением ошибок;

- снятие с информационных данных ПСП.

Для реализации командно-телеметрической линии в С-диапазоне частот предлагается использовать расширение спектра на основе также COFDM-сигнала, но со случайным выбором используемых частот и помехоустойчивым кодом с высокой избыточностью, позволяющим исправить до 70% ошибок. Полоса сигнала командно-телеметрической линии в С-диапазоне частот будет более 320 кГц при скорости 16 кбит/с.

При слишком высоком уровне полезного сигнала на входе приемника мощность передатчика автоматически уменьшается (в результате обмена служебной информацией между приемником и передатчиком). Параметры радиоканала представлены в табл. 2.

Таблица 2
Расчетные параметры радиоканала
БЛА-НПУОИ

Характеристики	Параметры		
Диапазон частот	4400-5000 МГц		
Ширина полосы	10 МГц		
Параметры COFDM-сигнала:			
Общее количество частотных каналов	8100		
Количество информационных частотных каналов	8000		
Модуляция каждой поднесущей	4-QAM		
Длительность COFDM-символа	800 мкс		
Защитный интервал между COFDM-символами	50 мкс		
Помехоустойчивое кодирование			
Тип кода	Каскадный код (Рид-Соломон+LDPC)		
Размер одного FEC-блока	8 кбайт		
Длительность одного FEC-блока	0,8 мс		
FEC	1/4	1/2	3/4
Скорость передачи данных, Мбит/с	5	10	15
Чувствительность приемника, дБм	- 99	- 98	- 95
Мощность передатчика	От 1 до 10 Вт		
Допустимый уровень ошибок на входе декодера при FEC=1/2	0,12		
Уровень ошибок на выходе декодера после исправления ошибок при FEC=1/2	10 ⁻¹²		
Защитный временной интервал между передачей и приемом	2 мс		

При ухудшении условий приема для предотвращения полного обрыва связи может увеличиваться мощность передатчика и/или скорость передачи информации может уменьшаться (за счет уменьшения скорости кодирования помехоустойчивого кода). Избыточность при кодировании изменяется в широких пределах и адаптивным образом: если ошибок в канале меньше, то и избыточность меньше, а информационная скорость больше. При увеличении уровня ошибок избыточность возрастает (скорость кодирования LDPC-кода уменьшается) и в результате полезная скорость падает. Поскольку скорость кодирования может быть разной, то при использовании одного и того же типа модуляции скорость передачи информационных данных оказывается различной. При этом в информационном канале модем сообщает внешнему устройству возможную скорость передачи в радиоканале, что позволяет внешнему устройству формировать поток данных с нужной скоростью.

В радиоканале для БЛА важное значение имеет временная задержка, поэтому алгоритм повторной передачи ошибочных блоков (ARQ) нельзя применять, и основная ответственность на передачу без ошибок ложится на FEC-декодер и его возможности по исправлению ошибок. Использование адаптивного изменения скорости передачи данных с учетом реальной пропускной способности канала связи делает радиоканал «резинообразным» - устойчивым к текущим изменениям условий распространения радиосигнала, снижающим скорость передачи данных в случае необходимости, но не приводящим к разрывам связи, что для радиолиний БЛА недопустимо. Тем самым, выполняется требование ТЗ по автоматической адаптации скорости передачи данных в зависимости от уровня помех и условий распространения сигнала.

4. Бортовые и наземные антенны из состава БЛА и НПУОИ

4.1. Антенна БТПД (вариант)

В достаточно высоком С-диапазоне частот ослабление, имеющее место при распространении в свободном пространстве, существенно возрастает. Например, на частоте 4500 МГц ослабление на 20 дБ выше, чем на частоте 500 МГц (на удалении БЛА от НПУОИ в 100 км соответственно ~140 и ~120 дБ).

Вместе с тем, в С-диапазоне частот возможно реализовать направленные антенны небольших габаритов и с достаточно высокими

коэффициентами усиления, что позволяет компенсировать значительное ослабление радиосигнала в пространстве по сравнению с УКВ диапазоном длин волн. В этом заключается преимущество С-диапазона частот.

Одним из оптимальных конструктивных исполнений является плоская антенная решетка.

Для БТПД целесообразно рассмотреть малогабаритную направленную ПАТЧ-антенну для одного канала с размерами 0,1x0,1x0,01 м.

Для случая резервирования требуется наличие двух бортовых направленных планарных (ПАТЧ-антенны, рис. 15) антенн для двухканального приемопередатчика, размещаются на платформе общего поворотного устройства и одновременно ориентируются по азимуту в направлении НТПД или другого БПЛА (при наличии режима ретрансляции) по командам, поступающим от специального блока управления.



Рис. 15. Внешний вид бортовой антенной решетки с двумя элементами - ПАТЧ-антеннами (вариант)

Обе бортовые направленные антенны вместе с опорно-поворотным устройством (ОПУ) размещаются под аэродинамическим радиопрозрачным обтекателем.

Основным моментом антенной решетки является выбор излучающего элемента с широкой рабочей полосой (около 13% относительно центральной рабочей частоты 4,7 ГГц). Данная антенна реализуется на двухслойной печатной плате.

Отличительной особенностью антенны является широкая полоса рабочих частот, малые габариты и высокий коэффициент усиления для таких малых размеров [3].

Частотная характеристика КСВ бортовой антенной решетки представлена на рис. 16.

По характеристике из рис. 16 можно судить о широкополосности антенны (около 12%), уровень КСВ в рабочем диапазоне частот не превышает 2,25.

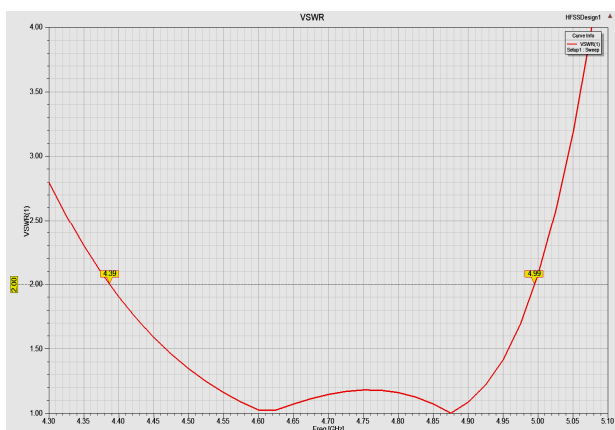


Рис. 16. Частотная характеристика КСВ бортовой антенной решетки с двумя ПАТЧ-антеннами

Разрезы диаграммы направленности (ДН) в плоскости рабочей вертикальной поляризации для частот 4,4; 4,7; 5,0 ГГц представлены на рис. 17.

На рис. 17 по оси абсцисс отложены значения углов, по оси ординат – коэффициенты усиления. Максимальное усиление решетки на частоте 5 ГГц - 15,2 дБи. Минимальное усиление на частоте 4,4 ГГц - 12 дБи.

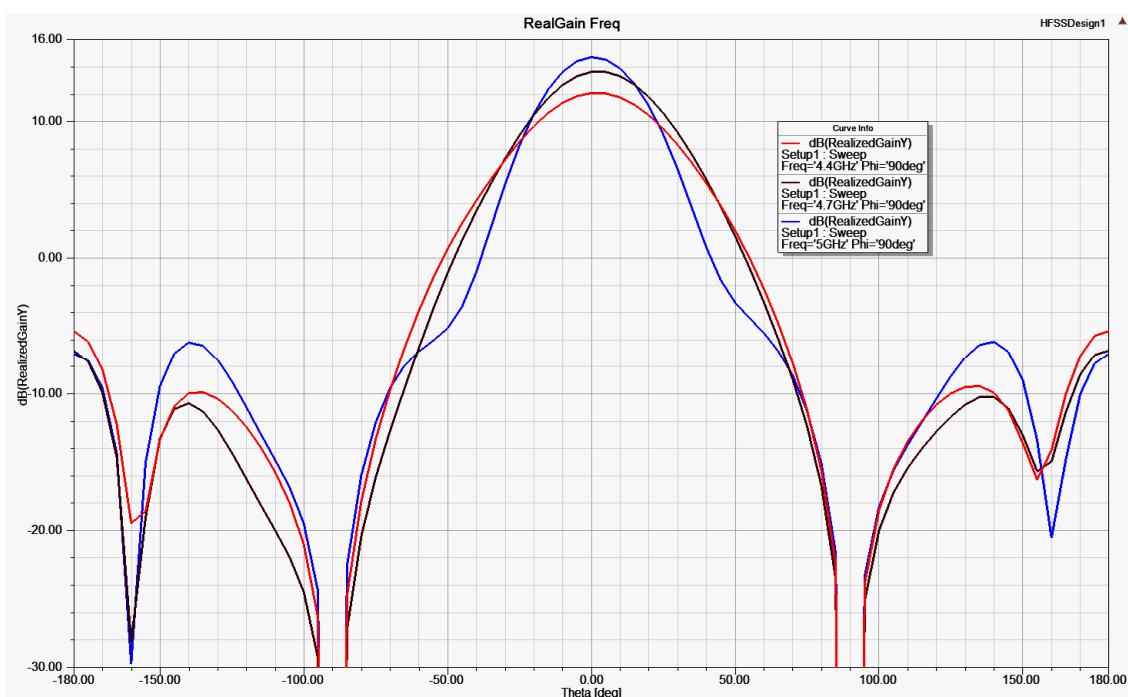


Рис. 17. Разрезы диаграммы направленности в плоскости рабочей вертикальной поляризации для частот 4,4; 4,7; 5,0 ГГц

4.2. Антенна НТПД (вариант)

Наземную антенну целесообразно реализовать в виде, представленном на рис. 18.

Геометрически форма рефлектора представляет собой прямоугольный сегмент тела вращения параболы, в фокусе которого располагается облучатель. Зеркало имеет решетчатую структуру для уменьшения парусности. Для работы двух каналов используются две антенны. Они располагаются на опорно-поворотном устройстве и вращаются в азимутальной и угломестной плоскостях [3].

Облучатель для прямофокусной антенны имеет вертикальную поляризацию.

Модель облучателя имеет примерные габаритные размеры 0,06x0,04x0,04 м.



Рис. 18. Внешний вид наземной решетчатой обрезанной зеркальной антенны (вариант)

Численное моделирование проводилось в частотной области методом конечных элементов [3].

Расчетная частотная характеристика КСВ показана на рис. 19. По оси абсцисс отложены значения частот в ГГц, по оси ординат – значения КСВ. По графику видно, что в рабочей полосе частот уровень КСВ не более 1,4.

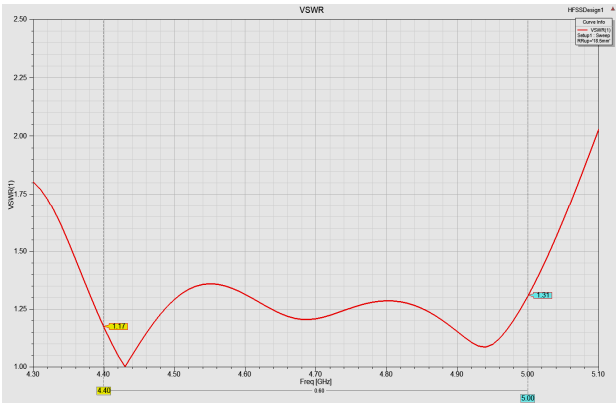


Рис. 19. Частотная характеристика КСВ наземной антенны решетчатой структуры

На рис. 20 представлена диаграмма направленности наземной решетчатой антенны.

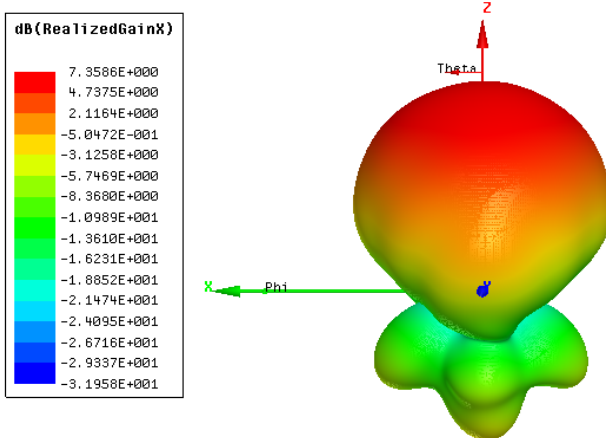


Рис. 20. Объемная диаграмма направленности наземной решетчатой антенны

Облучатель имеет направленность с коэффициентом усиления 7,35 дБи. Разрезы ДН в полярной системе координат для различных частот показаны на рис. 21, на полярных радиусах отложены коэффициенты усиления [2, 3, 13-16].

По трём кривым на графике можно судить о равномерности коэффициента усиления (КУ) в зависимости от частоты. Графики приведены для частот 4,4; 4,7; 5 (ГГц).

Оценка коэффициента направленного действия (КНД) для параболической антенны проводилась с помощью формулы:

$$D = 10 \log \left(4\pi \frac{S \cdot K}{\lambda^2} \right), \quad (1)$$

где S – площадь апертуры, K – апертурный коэффициент использования поверхности, λ – длина волны.

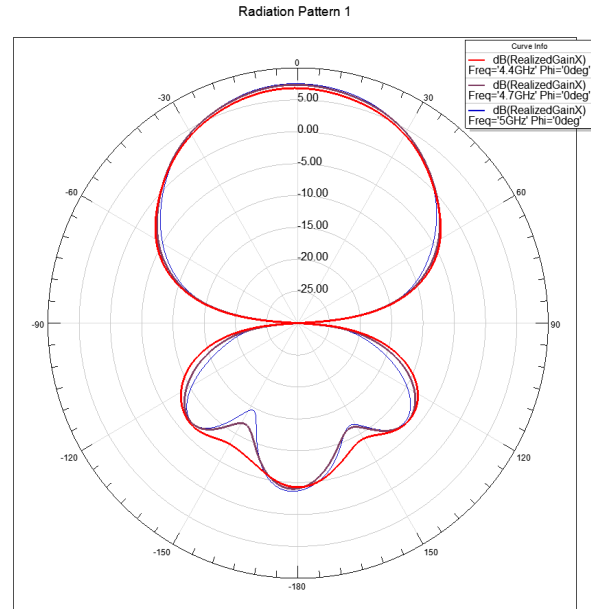


Рис. 21. Разрезы ДН наземной решетчатой антенны в полярной системе координат для различных частот

Рассчитанный КНД для апертуры рефлектора и центральной рабочей частоты $f_c=4.7$ ГГц:

$$D = 10 \log \left(4\pi \frac{0.6 \cdot 0.9 \cdot 0.55}{0.06383^2} \right) \approx 29.6 \quad (2)$$

КНД при данной апертуре на центральной рабочей частоте равен около 29,6 дБ. Стоит отметить, что апертурный коэффициент использования поверхности взят равным 0,55 для параболического круглого рефлектора. Для прямоугольного рефлектора он будет меньше. Для расчета КУ рефлектора с рассматриваемым излучателем проведено численное моделирование системы методом конечных элементов. Для сокращения области расчета было задано граничное условие в виде идеальной магнитной стенки в плоскости симметрии системы.

Габаритные размеры наземной антенны 0,6x0,9x0,45 м.

Запитка облучателя производится с помощью трубки, которая проходит от рефлектора к облучателю. Для работы с двумя каналами две антенны будут располагаться на опорно-поворотном устройстве. Объемная ДН представлена на рис. 22, разрез ДН представлен на рис. 23. По оси абсцисс отложены значения углов, по оси ординат – коэффициент усиления.

Из рис. 22 и 23 видно, что коэффициент уси-

ления антенны на центральной частоте 4,7 ГГц равен 29,15 дБи, на 4,4 ГГц – 28,83 дБи и на частоте 5,0 ГГц – 29,65 дБи. Максимальный уровень боковых лепестков – не превышает 12 дБи.

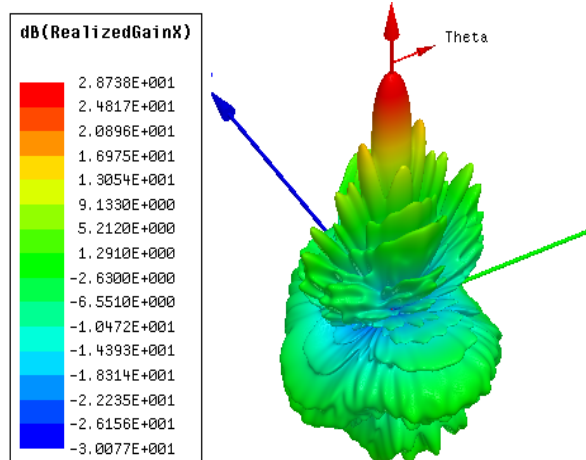


Рис. 22. Объемная диаграмма направленности двух наземных решетчатых антенн на ОПУ

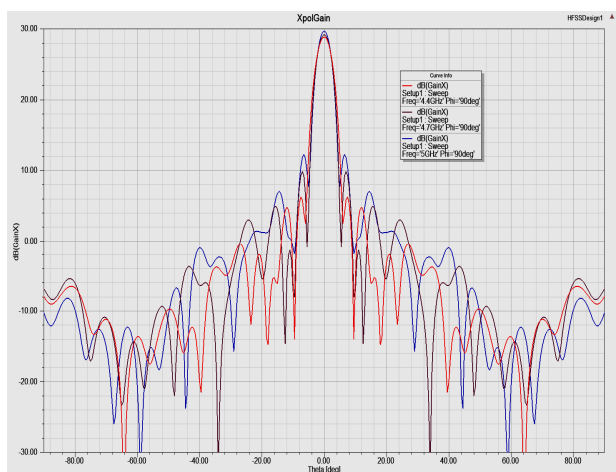


Рис. 23. Разрезы ДН наземных решетчатых антенн в полярной системе координат для различных частот

Заключение

1. Основным преимуществом OFDM- сигналов по сравнению со схемой с одной несущей является способность противостоять сложным условиям в канале - бороться с узкополосными помехами и частотно-избирательным затуханием, вызванным многолучевым характером распространения, без использования сложных фильтров-эквалайзеров. Канальная эквализация упрощается вследствие того, что OFDM-сигнал может рассматриваться как множество медленно модулируемых узкополосных сигналов, а не как один быстро модулируемый широкополосный сигнал. Низкая символьная скорость делает возможным использование защитного интервала

между символами, что позволяет справляться с временным рассеянием и устранять межсимвольную интерференцию (МСИ).

2. Реализация в командно-телеметрическом канале OFDM-сигнала с внутрискановой псевдослучайной перестройкой рабочей частоты позволит обеспечить высокую скрытность и помехоустойчивость канала управления БЛА.

3. Предложенные в данной научно-технической статье бортовые и наземные антенные системы совместно с COFDM- сигналом (OFDM с канальным кодированием) позволят обеспечить передачу больших потоков информации с целевых нагрузок БЛА на НПУОИ со скоростями от 15-20 Мбит/сек. и более в реальном масштабе времени.

Литература

1. Верба В.С., Татарский Б.Г. Комплексы с беспилотными летательными аппаратами в 2-х книгах. Кн. 1: Принципы построения и особенности применения комплексов с БЛА. Кн. 2: Робототехнические комплексы на основе БЛА. М.: Изд. «Радиотехника», 2016. 1352 с.
2. Технология OFDM: учеб. пособие для вузов / М.Г. Бакулин, В.Б. Крейнделин, А.М. Шлома, А.П. Шумов. М.: Издательство «Горячая линия-Телеком», 2017. 360 с.
3. Сомов А.М., Кабетов Р.В. Многолучевые зеркальные антенны: геометрия и методы анализа. М.: Издательство «Горячая линия-Телеком», 2019. 256 с.
4. Журавлев В.И., Руднев А.В. Цифровая фазовая модуляция. М.: Издательство «Радиотехника», 2012. 208 с.
5. Васильев К.К., Служивый М.Н. Математическое моделирование инфокоммуникационных систем. М.: Издательство «Горячая линия-Телеком», 2018. 236 с.
6. Мартюшев Ю.Ю. Практика цифрового функционального моделирования в радиотехнике. М.: Издательство «Горячая линия-Телеком», 2016. 188 с.
7. Специальная радиосвязь. Развитие и модернизация оборудования и объектов / под ред. А.Л. Бузова. М.: Издательство «Радиотехника», 2017. 448 с.
8. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием / под ред. В.Н. Лепина. М.: Издательство «Радиотехника», 2017. 416 с.
9. Рудой В.М. Системы передачи информации. М.: Издательство «Радиотехника», 2007. 280 с.
10. Марковская теория оценивания в радиотехнике / под ред. М.С. Ярлыкова. М.: Издательство «Радиотехника», 2004. 504 с.
11. Шелухин О.И., Тенякшев А.М., Осин А.В. Моделирование информационных систем. М.: Издательство «Радиотехника», 2005. 368 с.
12. Помехозащита радиоэлектронных систем управления летательными аппаратами и оружием / В.Н. Лепин, В.Н. Антипов, А.Ю. Викентьев, Е.Е. Колтышев, В.В. Мухин, А.Ю. Трущинский, А.Ю. Фролов, В.Т. Янковский. М.: Издательство «Радиотехника», 2017. 416 с.
13. Пантенков Д.Г., Литвиненко В.П., Гусаков Н.В. Математическое моделирование потенциальной скрытности канала связи в многоканальных радиоприемах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 1. С. 47-49.
14. Определение степени доступности канала связи со сложными широкополосными сигналами /

Д.Г. Пантенков, Н.В. Гусаков, В.П. Литвиненко, А.В. Башкиров // Системные проблемы надежности, качества, информационно-телекоммуникационных и электронных технологий в управлении инновационными проектами (Инноватика-2011): материалы Междунар. конф. и Рос. науч. шк. М.: Энергоатомиздат, 2011. Ч. 2. С. 268-277.

15. Патент 0002556429, Российская Федерация, МПК Н 04 В 1/10 (2006.01). Некогерентный цифровой демодулятор «в целом» кодированных сигналов с фазовой манипуляцией / Литвиненко В.П., Глушков А.Н., Пантенков Д.Г.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет». 10.07.2015, Бюл. № 19. 7 с.

16. Методический подход оценки компенсации доплеровского смещения частоты в спутниковых линиях информационного обмена при эксплуатации космических систем связи / А.В. Вейко, В.И. Великоиваненко, А.А. Ломакин, Д.Г. Пантенков, В.С. Константинов, Д.Д. Тюрина // Проблемные вопросы развития наземных комплексов, стартового оборудования и эксплуатации летательных аппаратов: сб. науч. тр. М.: Филиал ФГУП «ЦЭНКИ»-КБТХМ, 2018. № 13. Ч. 1. С. 289-297.

17. Ложкин К.Ю. Помехоустойчивость приема OFDM-сигнала с однократной фазовой манипуляцией и корректирующим кодированием на фоне полигармонической помехи // Радиотехника XXI век: международный научно-технический журнал. 2018. № 11. С. 58-63.

Поступила 19.05.2019; принята к публикации 01.10.2019

Информация об авторах

Пантенков Дмитрий Геннадьевич – канд. техн. наук, начальник отделения радиосвязного оборудования, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, 18, кор. 9), тел. 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru

Гусаков Николай Васильевич – канд. техн. наук, заместитель генерального директора по космическим проектам, АО «Научно-исследовательский институт современных телекоммуникационных технологий» (214012, Россия, г. Смоленск, ул. Ново-Ленинградская, 10), тел. 8(916)551-81-36, e-mail: N.V.Gusakov@mail.ru

Егоров Александр Тимофеевич – начальник отдела систем радиосвязи, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, 18, кор. 9), e-mail: Aleksander.Egorov@kronshtadt.ru

Ломакин Андрей Александрович – канд. техн. наук, старший научный сотрудник, ведущий научный сотрудник, АО «Кронштадт» (115432, Россия, г. Москва, проспект Андропова, 18, кор. 9), e-mail: Andrei.Lomakin2@kronshtadt.ru

Литвиненко Владимир Петрович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: litvinvp@gmail.com

Великоиваненко Владимир Ильич – д-р техн. наук, профессор, академик Российской Академии космонавтики им. К.Э. Циолковского, академик Академии проблем качества, главный научный сотрудник, ФГУП «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения» (141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, 4), тел. 8(495) 513-45-66, e-mail: velikoivanenkovi@tsniimash.ru

Лю-Кэ-Сю Елена Юльевна – руководитель направления по работе с заказчиками на авиационном транспорте, ООО «СТЭК.КОМ» (123060, г. Москва, ул. Берзарина, 36, строение 1), тел. 8(495)363-91-40, e-mail: elena.lukesu@stecom.ru

TECHNICAL IMPLEMENTATION OF HIGH-SPEED DATA RADIO CHANNEL FROM AN UNMANNED AERIAL VEHICLE TO GROUND CONTROL STATION

**D.G. Pantenkov¹, N.V. Gusakov², A.T. Egorov¹, A.A. Lomakin¹,
V.P. Litvinenko³, V.I. Velikoivanenko⁴, E.Yu. Lu-Ke-Syu⁵**

¹Co "Kronstadt", Moscow, Russia

²Scientific Research Institute of Modern Telecommunication Technologies", Smolensk, Russia

³Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

⁴Central Research Institute of Mechanical Engineering, Korolyev, Russia

⁵LLC "STEK.COM", Moscow, Russia

Abstract: currently the Russian Federation is actively developing unmanned aircraft in the interests of various Customers. At the same time, as of 2019, the domestic industry has developed a series of complexes with unmanned aerial vehicles (UAV) of various classes and purposes – light ("Tipchak", "Zala 421-04M", "Aleron-3"), medium ("Aleron-10", "Forpost", "Corsair"), heavy ("Orion"), superheavy ("Altair", "Hunter"), which solve both the problems of increasing the defense and security of the Russian Federation, and meet the interests of civilian consumers. One of the key elements complexes with unmanned aerial vehicles is a radio link the transmission of command and telemetry information and target direct radio line of sight between the UAV and the ground control and information processing station (GCIPS). Unmanned aerial vehicles of a heavy class can have several target loads in their composition at the same time – an optical-electronic system, a radar system, a radio monitoring system, etc. Due to the fact that the flow of information coming from the target loads to the input of the radio line at peak moments can be quite large, serious requirements are imposed both to the equipment of primary processing of the target information on board the UAV and its compression in the equipment of information registration, and to the capacity of the radio line in terms of transmission of target information to the GCIPS for its subsequent analysis and processing by the operator of the complex. This article describes a promising method of modulation OFDM (multiplexing orthogonal frequency division) and OFDM modulation (OFDM with channel coding) applied to high-speed data channel UAV-GCIPS, the results of calculations of parameters of high-speed radio, as well as the evaluation of the noise immunity of the OFDM signal with the cascade code (low-density LDPC code in conjunction with code Reed-Solomon)

Key words: complexes with unmanned aerial vehicles, high-speed line-of-sight information radio link, OFDM signals, COFDM, noise-resistant coding, LDPC code, Reed-Solomon code, error probability, signal/noise, on-Board antennas, ground antennas

References

1. Verba V.S., Tatarsky B.G. "Complexes with unmanned aerial vehicles. Book 1: Principles of construction and features of application of complexes with UAV. Book 2: Robotic systems based on UAV" ("Kompleksy s bespilotnymi letatel'nymi apparatami v 2-kh knigakh. Kn. 1: Printsipy postroeniya i osobennosti primeneniya kompleksov s BLA. Kn. 2: Robototekhnicheskie kompleksy na osnove BLA"), Moscow, Radiotekhnika, 2016, 1352 p.
2. Bakulin M.G., Kreindelin V.B., Shloma A.M., Shumov A.P. "OFDM technology. Textbook for universities" ("Tekhnologiya OFDM: ucheb. posobie dlya vuzov"), Moscow, Goryachaya Liniya Telekom, 2017, 360 p.
3. Somov A.M., Kabatov R.V. "Multibeam mirror antenna: geometry and methods of analysis" ("Mnogoluchevye zerkal'nye anteny: geometriya i metody analiza"), Moscow, Goryachaya Liniya Telekom, 2019, 256 p.
4. Zhuravlev V.I., Rudnev A.V. "Digital phase modulation" ("Tsifrovaya fazovaya modulyatsiya"), Moscow, Radiotekhnika, 2012, 208 p.
5. Vasil'ev K.K., Sluzhivyy M.N. "Mathematical modeling of infocommunication systems" ("Matematicheskoe modelirovanie infokommunikatsionnykh sistem"), Moscow, Goryachaya Liniya Telekom, 2018, 236 p.
6. Martyushev Yu.Yu. "Practice of digital functional modeling in radio engineering" ("Praktika tsifrovogo funktsional'nogo modelirovaniya v radiotekhnike"), Moscow, Goryachaya Liniya Telekom, 2016, 188 p.
7. Buzova A.L. ed. "Special radio. Development and modernization of equipment and facilities" ("Razvitie i modernizatsiya oborudovaniya i ob'ektov"), Moscow, Radiotekhnika, 2017, 448 p.
8. Lepina V.N. ed. "Interference protection of radio electronic control systems of aircraft and weapons" ("Pomekhozashchita radioelektronnykh sistem upravleniya letatel'nymi apparatami i oruzhiem"), Moscow, Radiotekhnika, 2017, 416 p.
9. Rudoy V.M. "Information transmission systems" ("Sistemy peredachi informatsii"), Moscow, Radiotekhnika, 2007, 280 pages.
10. Yarlykova M.S. "Markov theory of evaluation in radio engineering" ("Markovskaya teoriya otsenivaniya v radiotekhnike"), Moscow, Radiotekhnika, 2004, 504 p.
11. Shelukhin O.I., Tanachev A.M., Osin A.V. "Modeling of information systems" ("Modelirovanie informatsionnykh sistem"), Moscow, Radiotekhnika, 2005, 368 p.
12. Lepin V.N., Antipov V.N., Vikentiev A.Yu., Koltyshev E.E., Mukhin V.V., Trushchinskiy A.Yu., Frolov A.Yu., Yankovskiy V.T. "Interference protection of electronic control systems for aircraft and weapons" ("Pomekhozashchita radioelektronnykh sistem upravleniya letatel'nymi apparatami i oruzhiem"), Moscow, Radiotekhnika, 2017. - 416 p.
13. Pantenkov D.G., Litvinenko, V.P., Gusakov N.V. "Mathematical modeling of the potential stealth of a communication channel in a multichannel radio links", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no. 1, pp. 47-49.
14. Pantenkov D.G., Gusakov N.V., Litvinenko V.P., Bashkirov A.V. "Determination of the degree of availability of communication channel with complex broadband signals", *Proc. of the International Conference and the Russian Scientific School: System Problems of Reliability, Quality, Information and Telecommunication and Electronic Technologies in the Management of Innovative Projects (Innovatika-2011) (Sistemnye problemy nadezhnosti, kachestva, informatsionno-telekommunikatsionnykh i elektronnykh tekhnologiy v upravlenii innovatsionnymi proektami (Innovatika-2011): materialy Mezhdunar. konf.)*, Part 2, Moscow, Energoatomizdat, 2011, p. 268-277.
15. Litvinenko V.P., Glushkov A.N., Pantenkov D.G. "Non-coherent digital demodulator "in General," coded signals with phase manipulation" ("Nekogerentnyy tsifrovoy demodulyator «v tselom» kodirovannykh signalov s fazovoy manipulyatsiyey"), patent 0002556429, Russian Federation, IPC N 04 V 1/10 (2006.01), bull. 19, 7 p.
16. Veiko V.A., Velikoivanenko V.I., Lomakin A.A., Pantenkov D.G., Konstantinov V.S., Tyurin D.D. "Methodical approach of estimation of compensation of Doppler frequency offset in the satellite lines of information exchange in the operation of space communication systems", *Coll. of Sci. Papers: Problems of Development of ground complexes, launching equipment, and Aircraft Operation (Problemye voprosy razvitiya nazemnykh kompleksov, startovogo oborudovaniya i ekspluatatsii letatel'nykh apparatov: sb. nauch. tr.)*, Moscow, 2018, pp. 289-297.
17. Lozhkin K.Yu. "The noise immunity of the reception OFDM signal with a single phase-shifting and correction encoding on the background of the polyharmonic", *Technology of the XXI Century: International Scientific-Technical Journal (Radiotekhnika XXI vek: mezhdunarodnyy nauchno-tekhnicheskii zhurnal)*, 2018, no. 11, pp. 58-63.

Submitted 19.05.2019; revised 01.10.2019

Information about the authors

Dmitriy G. Pantenkov, Cand. Sc. (Technical), Kronstadt (18 Andropova prospect, Moscow 115432, Russia), tel. 8(926)109-23-95, e-mail: pantenkov88@mail.ru
Nikolay V. Gusakov, Cand. Sc. (Technical), Deputy General Director, Scientific Research Institute of Modern Telecommunication Technologies (10 Novo-Leningradskaya str., Smolensk 214012, Russia), tel. 8(916)551-81-36, e-mail: N.V.Gusakov@mail.ru
Aleksandr T. Egorov, Head of the Department of Radiocommunication Systems of JSC "Kronstadt" (18 Andropova prospekt, Moscow 115432, Russia), e-mail: Aleksander.Egorov@kronshtadt.ru
Andrey A. Lomakin, Cand. Sc. (Technical), Leading Researcher, Kronstadt (18 Andropova prospekt, Moscow 115432, Russia), e-mail: Andrei.Lomakin2@kronshtadt.ru
Vladimir P. Litvinenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: litvinvp@gmail.com
Vladimir I. Velikoivanenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Academician of Russian Academy of Cosmonautics. K. E. Tsiolkovsky, Academician of Academy of Quality Problems, Chief Researcher, Central Research Institute of Mechanical Engineering" (4 Pionerskaya str., Moscow region, Korolyev 141070, Russia), tel. 8(495)513-45-66, e-mail: velikoivanenkovi@tsniimash.ru
Elena Yu. Lu-Ke-Syu, Head of work with clients on air transport, LLC "STEK.COM" (36/1 Berzarina str., Moscow 123060, Russia), tel. 8(495) 363-91-40, e-mail: elena.lukesu@steccom.ru

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПИРОЛИТИЧЕСКИХ МЕТАЛЛООКСИДНЫХ ПЛЕНОК ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭНЕРГИИ

В.Е. Полковников¹, Д.С. Пермяков¹, М.А. Белых¹, Ш.Х. Юлчиев², С.И. Рембеза¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура, г. Андижан, Узбекистан

Аннотация: в данной работе описана технология изготовления металлооксидных пленок ZnO, SnO₂, Zn₂SnO₄ и CuO из водных растворов соответствующих солей методом спрей-пиролиза. В методе спрей-пиролиза аэрозоль водных растворов солей осаждается на горячую (420 °С) стеклянную подложку. Приведены режимы и условия напыления металлооксидных пленок на горячие стеклянные подложки. Произведен контроль состава полученных структур с помощью рентгенофазового анализа. Измерения электрических параметров пленок производились методом Ван-дер-Пау и с помощью эффекта Холла. Измерены поверхностное сопротивление пленок, тип проводимости, концентрация и подвижность носителей зарядов. Концентрация носителей зарядов в металлооксидных пленках изменялась от $n=2 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$ (ZnO) до $6,53 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ (SnO₂) и составила $3,2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}$ для CuO. Металлооксидные пленки ZnO, SnO₂, Zn₂SnO₄ имели n-тип проводимости, а пленка CuO обладала р-типом проводимости. Исследования параметров пленок ZnO, SnO₂, Zn₂SnO₄, CuO производились для оценки возможности использования их в качестве элементов конструкции тонкопленочного солнечного элемента. Ширина запрещенной зоны определялась по спектрам поглощения света и находилась в пределах 3,2...3,5 эВ для оксидов на основе Zn и Sn, для оксида меди (II) ширина запрещенной зоны составила 1,6 эВ. Синтезированные пленки n-типа можно использовать для изготовления солнечного элемента со светопоглощающим слоем р-CuO. Предварительные результаты на пленочных структурах n-SnO₂/р-CuO при дневном освещении показали значения $I_{\text{кз}}=3 \text{ мкА}$ $U_{\text{хх}}=48 \text{ мВ}$. Для повышения эффективности солнечного элемента требуются дополнительные исследования

Ключевые слова: спрей-пиролиз, тонкие пленки, оксид цинка, оксид олова, оксид меди, станнат цинка, электрофизические параметры

Благодарности: работа выполнена в рамках исследований по программе У.М.Н.И.К.

Введение

Полупроводниковые металлооксиды уже много лет применяются в фотоэлектрических технологиях. Универсальность их свойств и возможность применения простейших, недорогих и легко воспроизводимых методов изготовления делают их перспективными материалами для изготовления фотоэлектрических приборов [1]. Оксиды металлов (Sn, Zn) являются полупроводниками с шириной запрещенной зоны от 3 до 3,6 эВ. Широкозонные полупроводники (ZnO, SnO₂, Zn₂SnO₄) [2-4] имеют n-тип проводимости из-за дефицита кислорода и отклонений от стехиометрии, прозрачны в видимой области оптического спектра. Тонкие пленки металлооксидов широко используются в изделиях оптоэлектроники, фотоэлектроники, газовой сенсорики и прозрачной электроники. Электрофизические свойства металлооксидов зависят не только от их элементного состава, но и от способа их синтеза. Тонкие пленки металлооксидов могут быть получены золь-гель тех-

нологией [5], магнетронным распылением [6], электронно-лучевым испарением [7] и другими методами. Оксид меди (II) обладает благоприятными свойствами для применения в солнечных элементах в качестве поглощающего слоя р-типа проводимости. Спрей-пиролиз позволяет получить CuO с небольшой шириной запрещенной зоны 1,3 – 1,7 эВ [8]. В данной работе был использован спрей-пиролиз метод, так как он является не трудоемким и позволяет получить требуемые материалы с необходимыми характеристиками и минимальным количеством технологических операций. Спрей-пиролиз – это метод, который заключается в распылении аэрозоля на нагретую подложку. Аэрозоль получается из раствора солей металлов, распыляемых под давлением, после попадания на подложку испаряется, образуя в ходе химической реакции необходимое напыляемое вещество [9].

Цель работы заключается в определении оптимальных параметров изготовления металлооксидных пленок методом спрей-пиролиза, а также в исследовании параметров изготовленных пленок ZnO, SnO₂, Zn₂SnO₄ и CuO для оценки возможности использования их в каче-

стве элементов конструкции тонкопленочного солнечного элемента.

Оборудование и методика эксперимента

Нанесение раствора методом спрей-пиролиза производилось на предметные стекла для микропрепаратов (ГОСТ 9284-75) размером $26 \times 76 \times 1$ мм. Стекло нагревалось керамическим тепловым элементом размером 245×60 мм. Температура поверхности контролировалась пирометром HoldPeak hp-1500. Были опробованы разные температуры от 300 до 500 °C и была выбрана оптимальная температура 420 °C для CuO, ZnO, SnO₂, Zn₂SnO₄. Для нанесения раствора создавался аэрозоль при помощи аэрографа OPHIR AC004A, имеющего сопло диаметром 0,3 мм, давление воздуха для аэрографа создавалось безмасляным поршневым компрессором AS186.

Синтез оксида меди (II) осуществлялся из водного раствора хлорида меди [CuCl₂ · 2H₂O], молярное содержание меди в растворе 0,1 М. Для синтеза пленки оксида олова в качестве прекурсора использовался хлорид олова [SnCl₂ · 2H₂O], раствор оксида цинка синтезировался из ацетата цинка [Zn(CH₃COO)₂ · 2H₂O]. В роли растворителя использовалась дистиллированная вода в объеме 200 мл. Количество соли в растворе соответствовало концентрации 0,25 М. Для того чтобы избежать гидролиза соли хлорида олова в воде, добавлялась соляная кислота HCl в количестве 1 мл. Затем растворы перемешивались в течение 30 минут. Перемешивание совершалось при комнатной температуре на магнитной мешалке IKA RH basic 2. Упрощенная схема изготовления пленок SnO₂, ZnO и CuO методом спрей-пиролиза показана на рис. 1.

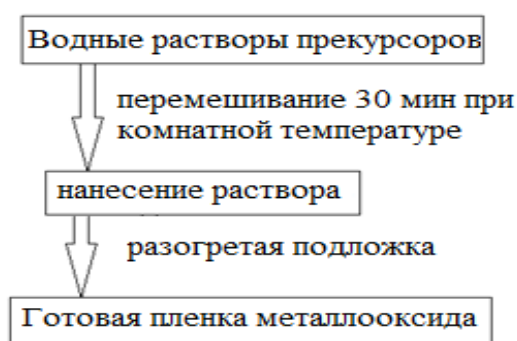


Рис. 1. Схема изготовления пленок CuO, SnO₂ и ZnO методом спрей-пиролиза

Параметры нанесения CuO были выбраны следующие: давление компрессора 1,5 бар, расстояние от источника аэрозоля до подложки 80 см, расход раствора 7 мл/мин. Для поддержания температурного режима процесса нанесения через каждые 6 минут выдерживалась пауза длительностью 4 минуты. После напыления пленки CuO производилась дополнительная операция изотермического отжига при 500 °C в течение 3 часов для снижения сопротивления посредством кристаллизации.

Напыление пленок SnO₂ и ZnO осуществлялось при давлении воздуха 2 бара со скоростью 8 мл/мин. Расстояние от распыляющей головки до предварительно разогретого предметного стекла составляло 85 см. Пленка SnO₂ наносилась в один слой в течение 18 минут. Многослойное напыление пленки ZnO происходило по 1 мин. с последующим перерывом в 30 секунд для восстановления температуры подложки. Таким образом было получено 14 слоев.

Для синтеза пленки станната цинка в качестве прекурсоров были выбраны ацетат цинка [Zn(CH₃COO)₂ · 2H₂O] и хлорид олова [SnCl₂ · 2H₂O]. Ацетат цинка [Zn(CH₃COO)₂ · 2H₂O] был использован в качестве источника оксида цинка, а хлорид олова [SnCl₂ · 2H₂O] в качестве источника оксида олова при синтезе соединения Zn₂SnO₄. Молярное соотношение ацетата цинка и хлорида олова в растворе подбиралось как 2:1. Рассчитанное количество хлорида олова и ацетата цинка растворялось в дистиллированной воде для формирования двух растворов. К раствору хлорида олова добавлялась соляная кислота HCl для предотвращения гидролиза соли. Затем два раствора смешивались, и в конечном растворе выпадал осадок, и добавлялась еще соляная кислота.

Дальнейшее перемешивание осуществлялось в течение 2 часов при комнатной температуре. Упрощенная схема изготовления пленки Zn₂SnO₄ методом спрей-пиролиза показана на рис. 2.

Режим нанесения многослойной пленки состоял из циклов по 1,5 мин. непрерывной подачи аэрозоля на поверхность разогретой подложки, паузы в 40 секунд до полного восстановления температуры поверхности подложки. Расстояние до подложки составляло 85 см. В итоге на поверхности подложки за один цикл формировался 1 слой, всего было сформировано 7 слоев пленки Zn₂SnO₄.

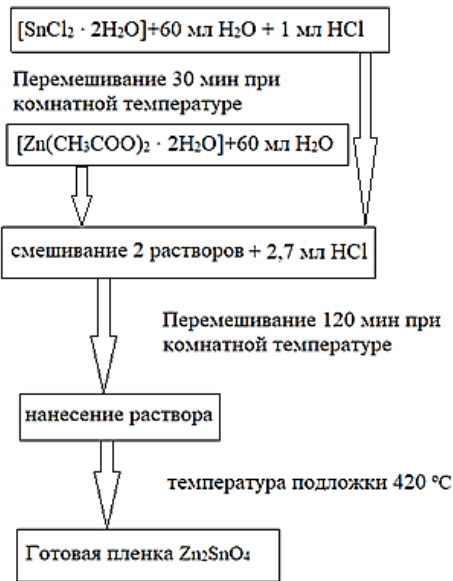


Рис. 2. Схема изготовления пленки Zn_2SnO_4 методом спрей-пиролиза

Полученные пленки для определения состава нанесенного вещества подвергались рентгенофазовому анализу. Данные рентгенофазового анализа показаны на рис. 3, 4, 5, 6.

Рис. 3 показывает, что получена хорошо кристаллизованная пленка SnO_2 , на что указывают четкие пики рефлексов от разных плоскостей кристаллов. Это говорит о кристаллизации в достаточной мере сразу после нанесения методом спрей-пиролиза. Пленка SnO_2 имеет 4 основных рефлекса от плоскостей (1,1,0), (1,0,1), (2,0,0), (2,1,1), положение пиков 2θ (26.51), (33.80), (37.89), (54.65), кристаллическое строение пленки SnO_2 соответствует тетрагональной решетке типа рутила.

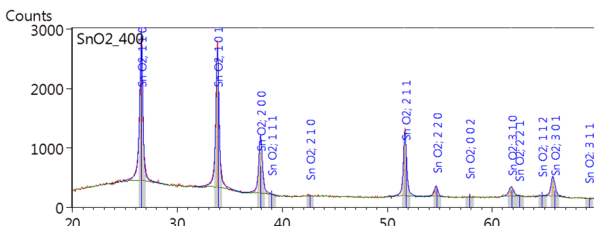


Рис. 3. Рентгенофазовый анализ пленки SnO_2

Из рис. 4 видно, что полученная пленка ZnO обладает несколькими пиками. Слабая интенсивность большинства рефлексов ZnO (кроме плоскости 0,0,2), указывает на частичную кристаллизацию пленки ZnO . Основной пик соответствует плоскости (0,0,2) положение данного пика 2θ (34,42), кристаллическая решетка соответствует гексагональной решетке вюрцита.

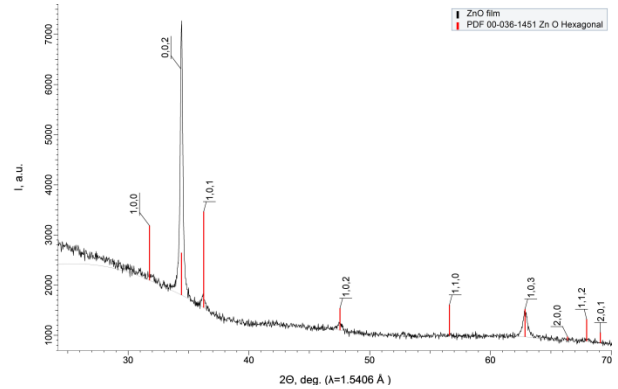


Рис. 4. Рентгенофазовый анализ пленки ZnO

На рис. 5 рентгеновский спектр пленки Zn_2SnO_4 содержит заметный широкий рефлекс от плоскости (3,1,1) положение пика 2θ (34,52), основной пик Zn_2SnO_4 соответствует кубической решетке. Слабо выраженные другие рефлексы соответствуют SnO_2 , ZnO и Zn_2SnO_4 , что указывает на аморфный и смешанный состав пленки.

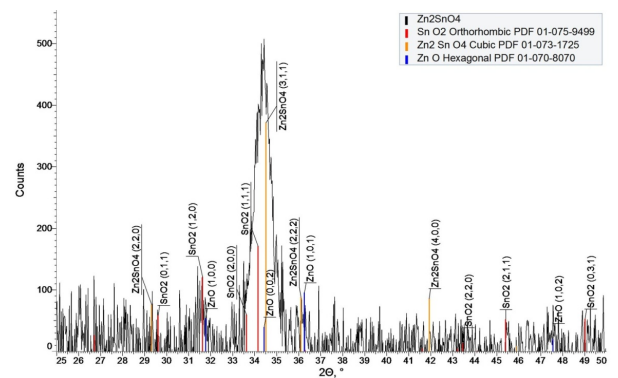


Рис. 5. Рентгенофазовый анализ пленки Zn_2SnO_4

На рис. 6 по высоте пиков видно, что пленка CuO частично кристаллизована после отжига при $500\text{ }^\circ\text{C}$ в течение 3 часов. Рентгенофазовый анализ пленки CuO показал 3 основных рефлекса от плоскостей (1,1,0), (0,0,2), (1,1,1) положение пиков 2θ (32,48), (35,42), (38,61) исходя из данных, структура решетки CuO является моноклинной.

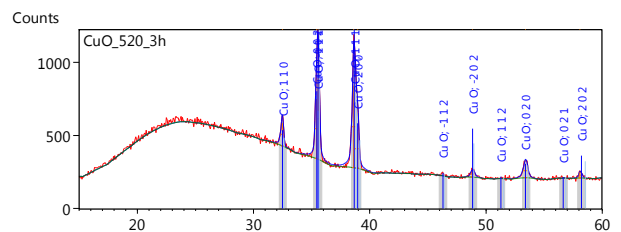


Рис. 6. Рентгенофазовый анализ пленки CuO

Электросопротивление, концентрация и подвижность носителей заряда металлооксидных пленок измерялись методом Ван-дер-Пау и с помощью эффекта Холла в магнитном поле 0,63 Тл. Результаты измерений приведены в таблице. Тип проводимости определялся с помощью термозонда и эффекта Холла и был установлен как n-тип проводимости для пленок ZnO, Zn₂SnO₄, SnO₂ и p-тип для CuO.

Результаты измерений электрофизических свойств металлооксидных пленок

Хим. формула	Rs, Ом/□	ΔEg, эВ	μ, см ² /В·с	n, см ⁻³
ZnO	85530	3,2	3,53	2·10 ¹⁷
Zn ₂ SnO ₄	9807	3,5	4,86	1,5·10 ¹⁸
SnO ₂	141	3,3	6,78	6,53·10 ¹⁹
CuO	389000	1,6	5	3,2·10 ¹⁶

Из таблицы видно, что наименьшим сопротивлением обладает пленка SnO₂. Подвижность носителей заряда всех исследуемых пленок меняется в пределах от 3 до 7 см²/(В·с), а концентрация носителей заряда 10¹⁶ – 10¹⁹ см⁻³. Интересно, что аморфная пленка Zn₂SnO₄ обладает высокой электропроводностью и концентрацией свободных носителей (n=1.5·10¹⁸ см⁻³), что обусловлено особенностями токопереноса в аморфной пленке Zn₂SnO₄ [2]. Таким образом, пленки ZnO, Zn₂SnO₄, SnO₂, изготовленные спрей-пиролизом, пригодны для производства низкоомных покрытий. А пленку CuO благодаря p-типу проводимости можно использовать в качестве нижнего поглощающего слоя солнечного элемента.

Оптические данные о пленках были получены на спектрофотометре СПЕКС ССП-715-М. Спектры пропускания ZnO, Zn₂SnO₄, SnO₂, CuO приведены на рис. 7.

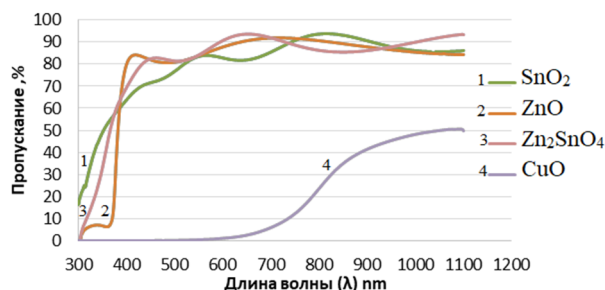


Рис. 7. Спектр пропускания (прозрачность) пленок ZnO, Zn₂SnO₄, SnO₂, CuO

Спектры пропускания для пленок SnO₂, ZnO, Zn₂SnO₄ имеют в видимой и инфракрасной части спектра прозрачность более 80%. По-

рог прозрачности приходится на ультрафиолетовый диапазон. Это делает их пригодными для использования в прозрачной электронике и солнечной энергетике. В соответствии с литературными данными [10-12], все синтезированные оксиды металлов обладали прямозонной структурой. Образец оксида меди (II) имеет прозрачность 50% только в инфракрасной части спектра, что делает данные пленки пригодными, по оптическим характеристикам, для использования в качестве поглощающего слоя многослойного солнечного элемента.

Из порогов поглощения можно определить коэффициент поглощения и ширину запрещенной зоны пленки в координатах $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$. Данные расчета ширины запрещенной зоны показаны на рис. 8, 9, 10.

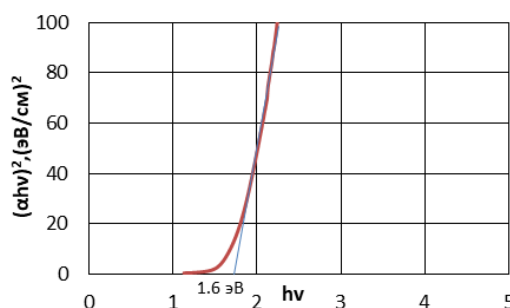


Рис. 8. Зависимости $(\alpha h\nu)^2$ от энергии света для CuO

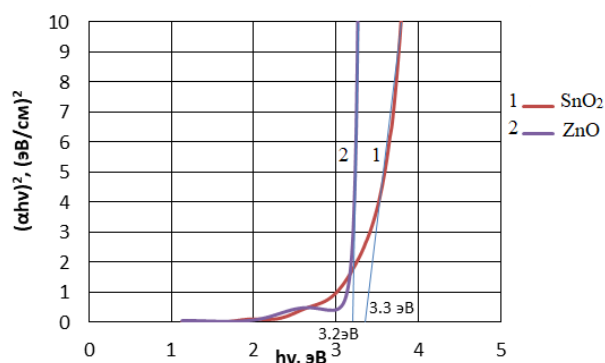


Рис. 9. Зависимости $(\alpha h\nu)^2$ от энергии света для пленок SnO₂, ZnO

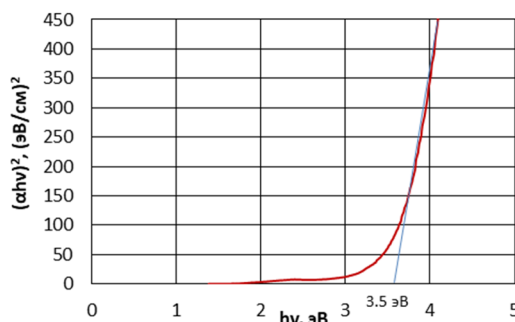


Рис. 10. Зависимости $(\alpha h\nu)^2$ от энергии света для Zn₂SnO₄

Ширина запрещенной зоны была определена по спрямлению графика $(\alpha h\nu)^2 = f(h\nu)$ и составила 3,5 эВ для Zn_2SnO_4 , 3,3 эВ для SnO_2 и 3,2 эВ для ZnO . Пленка CuO имеет небольшую ширину запрещенной зоны 1,6 эВ это важно, если рассматривать ее в качестве светопоглощающего слоя.

Заключение

В соответствии с задачами исследований, разработана методика и определены условия и параметры синтеза пленок оксидов металлов (CuO , ZnO , SnO_2 , Zn_2SnO_4) с помощью спрей-пиролиза. Пленки были синтезированы из водных растворов, основные отличия методик заключались в составе прекурсоров, в режимах и времени нанесения. Состав вещества готовых пленок определялся рентгенофазовым анализом. Сразу после нанесения пленки имели удовлетворительные электрофизические параметры, что делает их пригодными для практического использования сразу после нанесения и сокращает количество технологических операций и удешевляет производство. Для всех пленок были определены прозрачность в видимом диапазоне, ширина запрещенной зоны, тип проводимости, поверхностное сопротивление, концентрация носителей заряда и подвижность носителей заряда. Подвижность носителей заряда пленок меняется в пределах от 3 до 7 $cm^2/(V \cdot s)$, а концентрация носителей заряда $10^{16} - 10^{19} cm^{-3}$. Лучшей проводимостью обладает пленка SnO_2 , которую рациональнее всего использовать в солнечном элементе в качестве прозрачного проводящего оптического окна n-типа проводимости. Как альтернатива SnO_2 в солнечном элементе могут использоваться пленки Zn_2SnO_4 и ZnO . Возможно, в сочетании с CuO пленка Zn_2SnO_4 может показать лучшее КПД солнечного элемента за счет аморфной структуры. Пленку CuO благодаря p-типу проводимости и низкой прозрачности в видимой

части спектра можно использовать в качестве поглощающего слоя солнечного элемента.

Предварительные результаты на пленочных структурах n- SnO_2 /p- CuO при дневном освещении показали значения $I_{кз} = 3$ мкА $U_{хх} = 48$ мВ. Для повышения эффективности солнечного элемента требуются дополнительные исследования.

Литература

1. Metal oxides in photovoltaics: all-oxide, ferroic, and perovskite solar cells / A. Perez-Tomas, A. Mingorance, D. Tanenbaum, M. Lira-Cantu // *The Future of Semiconductor Oxides in Next-Generation Solar Cells*. 2018. Т. 8. № 1. P. 267-356.
2. Hosono H. Ionic amorphous oxide semiconductors: Material design, carrier transport, and device application // *Journal of Non-Crystalline Solids*. 2006. Т. 352. № 1. P. 851-858.
3. Batzill M., Diebold U. The surface and materials science of tin oxide // *Progress in Surface Science*. 2005. № 79. P. 47-154.
4. Пронин И.А. Управляемый синтез газочувствительных пленок диоксида олова, полученных методом золь-гель-технологии // *Молодой ученый*. 2012. № 5. Вып. 40. С. 57-60.
5. Stjerna B., Granqvist C.G. Optical and electrical properties of SnO_x thin films made by reactive R.F. magnetron sputtering // *Thin Solid Films*. 1990. № 193/194. P. 704-711.
6. Якушова Н.Д. Методы синтеза пленок модифицированного диоксида олова и их сенсорные свойства // *Молодой ученый*. 2013. № 2. Вып. 49. С. 9-14.
7. Characterization techniques of Fe-doped CuO thin films deposited by the Spray Pyrolysis method / F.Z. Chafi, L. Bahmad, N. Hassanain, B. Fares, L. Laanab, A. Mzerd // *Faculty of Science - BP. 1014 - Av. Ibn Batouta Rabat, Morocco*. 2018. № 1. P. 1-13.
8. Loredana E.M., Florentina E.I. The automatized systems for spray pyrolysis deposition // *Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering*. 2008. Т. 7. № 17. P. 1385-1388.
9. Chitra M. $ZnO/SnO_2/Zn_2SnO_4$ nanocomposite: preparation and characterization for gas sensing applications // *Nanosystems: physics, chemistry, mathematics*. 2016. Т. 7. № 4. P. 707-710.
10. Kamarulzaman N. Band Gap Narrowing and Widening of ZnO Nanostructures and Doped Materials // *Nanoscale Res Lett*. 2015. Т. 10. № 346. P. 1-9.
11. Mounkachi O. Band-gap engineering of SnO_2 // *Solar Energy Materials and Solar Cells*. 2016. № 148. P. 34-38.

Поступила 24.09.2019; принята к публикации 18.10.2019

Информация об авторах

Полковников Владимир Евгеньевич - магистрант, инженер кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: polkovnikov.vova.net@yandex.ru

Пермяков Дмитрий Сергеевич - магистрант, лаборант кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: Dima.P.S@yandex.ru

Белых Максим Александрович - магистрант, лаборант кафедры полупроводниковой электроники и наноэлектроники, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: belykh.maks@yandex.ru

Юлчиев Шахриер Хусайнович - канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики, Андижанский государственный университет им. З.М. Бабура (170100, Республика Узбекистан, г. Андижан, ул. Университетская, 129), e-mail: Yulchiev1970@mail.ru

Рембеца Станислав Иванович – д-р физ.-мат. наук, профессор, зав. кафедрой полупроводниковой электроники и наноэлектроники, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: rembeza@yandex.ru

METAL OXIDE PYROLYTIC FILMS FOR THE PRODUCTION OF PHOTO-ELECTRICAL ENERGY CONVERTERS

V.E. Polkovnikov¹, D.S. Permyakov¹, M.A. Belykh¹, Sh.Kh. Yulchiev², S.I. Rembeza¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
²Z.M. Babur Andijan State University, Andijan, Uzbekistan

Abstract: the paper describes the technology for manufacturing metal oxide films ZnO, SnO₂, Zn₂SnO₄, CuO from aqueous solutions of the corresponding salts by spray pyrolysis. In the spray pyrolysis method, an aerosol of aqueous solutions of salts is deposited on a hot (420 °C) glass substrate. The regimes and conditions for the deposition of metal oxide films on hot glass substrates are given. The composition of the obtained structures was controlled using X-ray phase analysis. The electrical parameters of the films were measured by the Van Der Pauw method and using the Hall effect. The surface resistance of the films, the type of conductivity, the concentration and mobility of charge carriers are measured. The concentration of charge carriers in metal oxide films varied from $n=2 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (ZnO) to $6.53 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (SnO₂) and was $3.2 \cdot 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ for CuO. The metal oxide films ZnO, SnO₂, Zn₂SnO₄ had n-type conductivity, and the CuO film had p-type conductivity. The properties of the ZnO, SnO₂, Zn₂SnO₄, and CuO films were studied to estimate the possibility of using them as structural elements of a thin-film solar cell. The band gap was determined from the light absorption spectra and was in the range of 3.2...3.5 eV for oxides based on Zn and Sn; for copper oxide (II), the band gap was 1.6 eV. Synthesized n-type films can be used to make a solar cell with a p-CuO light-absorbing layer. Preliminary results on film structures of n-SnO₂/p-CuO in daylight showed values of $I_{kz} = 3 \text{ } \mu\text{A}$ $U_{xx} = 48 \text{ mV}$. More research is needed to increase the efficiency of the solar cell

Key words: spray pyrolysis, thin films, zinc oxide, tin oxide, copper oxide, zinc stannate, electrophysical parameters

Acknowledgements: the work is carried out in the framework of the research program U.M.N.I.K.

References

1. Perez-Tomas A., Mingorance A., Tanenbaum D., Lira-Cantu M. "Metal oxides in photovoltaics: all-oxide, ferroic, and perovskite solar cells", *The Future of Semiconductor Oxides in Next-Generation Solar Cells*, 2018, vol. 8, no. 1. pp. 267-356.
2. Hosono H. "Ionic amorphous oxide semiconductors: Material design, carrier transport, and device application", *Journal of Non-Crystalline Solids*, 2006, vol. 352, no. 1, pp. 851-858.
3. Batzill M., Diebold U. "The surface and materials science of tin oxide", *Progress in Surface Scienc*, 2005, no. 79, pp. 47-154.
4. Pronin I. A. "Controlled synthesis of gas-sensitive tin dioxide films obtained by the sol-gel technology", *Young Scientist (Yuny Ucheny)*, 2012, vol.40, no. 5, pp. 57-60.
5. Stjerna B., Granqvist C.G. "Optical and electrical properties of SnO_x thin films made by reactive R.F. magnetron sputtering", *Thin Solid Films*, 1990, no. 193/194, pp. 704-711.
6. Yakushova N.D. "Methods for the synthesis of films of modified tin dioxide and their sensory properties" *Young Scientist (Yuny Ucheny)*, 2013, vol. 49, no. 2, pp. 9-14.
7. Chafi F. Z., Bahmad L., Hassanain N., Fares B., Laanab L., Mzred A. "Characterization techniques of Fe-doped CuO thin films deposited by the Spray Pyrolysis method", *Faculty of Science- BP. 1014- Av. Ibn Batouta Rabat, Morocco*, 2018, no. 1, pp. 1-13.
8. Loredana E. M., Florentina E. I. "The automatized systems for spray pyrolysis deposition", *Annals of the Oradea University, Fascicle of Management and Technological Engineering*, 2008, vol. 7, no. 17, pp. 1385-1388
10. Chitra M. "ZnO/SnO₂/Zn₂SnO₄ nanocomposite: preparation and characterization for gas sensing applications", *Nanosystems: Physics, Chemistry, Mathematics*, 2016, vol. 7, no. 4, pp. 707-710.
11. Kamarulzaman N. "Band gap narrowing and widening of ZnO nanostructures and doped materials", *Nanoscale Res Lett.*, 2015, vol. 10, no. 346, pp. 1-9.
12. Mounkachi O. "Band-gap engineering of SnO₂", *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2016, no. 148, pp. 34-38.

Submitted 24.09.2019; revised 18.10.2019

Information about the authors

Vladimir E. Polkovnikov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: polkovnikov.vova.net@yandex.ru

Dmitriy S. Permyakov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: Dima.P.S@yandex.ru

Maksim A. Belykh, MA, Voronezh State University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: belykh.maks@yandex.ru

Sh.Kh. Yulchiev, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Andijan State University (129 Universitetskaya str., Andijan 170100, Republic of Uzbekistan), e-mail:Yulchiev1970@mail.ru

Stanislav I. Rembeza, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: rembeza@yandex.ru

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В БЛИЖНЕМ ПОЛЕ МЕТОДОМ ГРИНА

В.В. Глотов, Т.С. Глотова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: решение вопросов электромагнитной совместимости становится в настоящее время неотъемлемым элементом деятельности предприятий - разработчиков и изготовителей радиоэлектронных средств, основой которых, как правило, являются печатные модули. Чтобы не отставать от новых трендов инженерам-конструкторам приходится миниатюризировать электронные компоненты, из-за чего увеличиваются шансы сбоев в работе электронных средств. Так, например, обычная печатная плата может иметь сотни или даже тысячи цепей, при этом каждый контур является потенциальным источником энергии, который в конечном итоге может непреднамеренно воздействовать на другие цепи или элементы. Поскольку проблемы, появляющиеся с решением вопросов электромагнитной совместимости, стоят на поздних стадиях процесса разработки радиоэлектронных средств, то получаемые новые методы оценки электромагнитных помех должны прогнозировать на ранних стадиях проектирования. В случае сложных печатных плат, содержащих встроенные микроконтроллеры, а также большое количество дорожек, для оценки необходимо найти компромисс между точностью и временем моделирования тестируемого печатного модуля. В статье представлен базовый алгоритм, используемый в новом инструменте прогнозного анализа электромагнитных излучений. Он способен точно учитывать фактическое сечение между металлической плоскостью и воздухом для каждой дорожки, элемента печатной платы. Это сравнивается с теоретическими формулами для проверки. Описано влияние покрытия печатной платы на дипольное излучение

Ключевые слова: печатная плата, провод, корпус, модель Грина, электромагнитная совместимость, ближнее поле

Введение

Проблема, с которой сегодня сталкиваются разработчики электронных схем, заключается не только в том, чтобы убедиться, что продукты работают «сами по себе», но и в том, чтобы их продукты взаимодействовали с большим сообществом электронных систем. Во всех случаях электронное оборудование в основном состоит из печатных плат (ПП), поэтому производители ПП должны будут надлежащим образом ограничить излучение производимых ими ПП. В настоящее время наиболее распространенным методом обработки электромагнитных излучений является тестирование на соответствие первого прототипа, уже внедренного.

В случае с ПП было бы необходимо изготовить первую тестовую плату изготовителем, и если она не прошла испытания, то повторить все производственные процессы. Но это может задержать дату завершения продукта и увеличить стоимость единицы изделия, потому что у разработчика не так много вариантов для исправления проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) на поздних стадиях процесса разработки. Решением, позволяющим избежать этой возможной итерации, является прогнози-

рование электромагнитного поля на этапе проектирования благодаря компьютерно-ориентированному анализу ЭМС.

Цель этой статьи – показать, как алгоритм, используемый в новом инструменте прогнозирующего анализа электромагнитных излучений, интегрирован в мощную среду моделирования после компоновки и способен вычислять электромагнитное поле, излучаемое ПП. С помощью метода излучающих диполей Герца излучающие проводники делятся на сегменты, которые можно рассматривать как элементарные излучающие диполи. При условии, что длина каждого диполя является долей соответствующей длины волны, ток для каждого сегмента проводника можно считать постоянным. Значение тока может быть принято равным току в центре сегмента. В этих условиях мы можем использовать классическую формулировку для полей электрического (E) и магнитного (H), связанных с герцовым диполем, помещенным в начало координат. Этот метод довольно быстрый, но он предполагает, что каждый диполь находится в воздухе.

В действительности между проводником и заземляющим слоем имеется один (или несколько) диэлектрический слой (слои), и над проводником могут быть также диэлектрические покрытия.

Полноволновые подходы такие, как метод моментов или метод конечных элементов, могут быть использованы для получения почти точных численных результатов. Их точность по существу ограничена только доступной вычислительной мощностью. Они могут быть использованы для имитации излучения общих структур, включая эффекты корпуса. Однако эти методы слишком дороги в вычислительном отношении. Необходим метод, который дает хорошее приближение к реальности, не занимая слишком много времени. Фактически алгоритм должен повторить расчет поля для всех критических следов излучения, которые могут быть значительными.

Электромагнитная формулировка

Представленный способ [1] использует двоичную функцию Грина, которая точно учитывает описание поперечного сечения ПП. Ключевым моментом является определение фактического тока диполя:

$$\begin{aligned} E(r) &= -j\omega\mu_0 \iint G(r, r') \cdot J_\varepsilon(r') d(r') \\ H(r) &= \iint \Delta x G(r, r') \cdot J_\varepsilon(r') d(r') \end{aligned} \quad (1)$$

где r – это координата точки, где вычисляется электрическое поле (например, положение измерительной антенны);

r' – это координата точки, расположенной на прямолинейной трассе.

Однако если предположить, что он находится в условиях дальнего поля, модель Грина может быть существенно упрощена. Конкретные измерения [5], проведенные на ПП, показали, что условие дальнего поля можно использовать для частот выше 30 МГц, а также для расчета поля на расстоянии до 3 метров, что оправдывает использование функций Грина и в дальнем поле.

Поскольку сложно рассчитать электрическое поле напрямую из-за плотности тока сегмента, погруженного в диэлектрические слои, метод дальнего поля применяет тот же источник тока к точке наблюдения, где необходимо рассчитать электромагнитное поле, и использует теорию взаимности [6].

Предполагается, что поле, пребывающее на поверхности раздела двух сред воздух – диэлектрик, представляет собой плоскую волну, которую можно разделить на две составляющие: поперечную электрическую и поперечную магнитную. Затем применяется теория линии

передачи к распространению этих двух волн во встроеной микрополосковой структуре, и создаются две передаточные функции для реальной среды между металлической плоскостью и воздухом. Следующее выражение электрического поля в условиях дальнего поля получается для любого прямолинейного излучения, как показано на рис. 1.

$$E(R) = -j \frac{Z_0}{2R\lambda_0} \cdot e^{-jk_0 R} e^{jk_0 \cos\theta} \{ P_{ex}(\theta, \varphi)x + P_{ey}(\theta, \varphi)y + P_{ez}(\theta, \varphi)z \} \quad (2)$$

где $Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}}$ – волновое сопротивление в воздухе;

$K_0 = \frac{2\pi}{\varepsilon_0}$ – постоянная распространения;

λ_0 – длина волны в воздухе;

h – расстояние между металлической плоскостью и проводником;

$P_{ex}(\theta, \varphi)$, $P_{ey}(\theta, \varphi)$ и $P_{ez}(\theta, \varphi)$ являются по существу плоско-волновыми передаточными функциями слоистой диэлектрической среды [1], которые объединяют электрическую и магнитную плоско-волновые среды. Они зависят от сферических координат положения измерительной антенны в локальной системе координат трассы.

Пространственное преобразование Фурье плотности тока на трассе. На рис. 2 показано сечение с двумя диэлектрическими слоями, но теория может учитывать произвольное количество слоев.

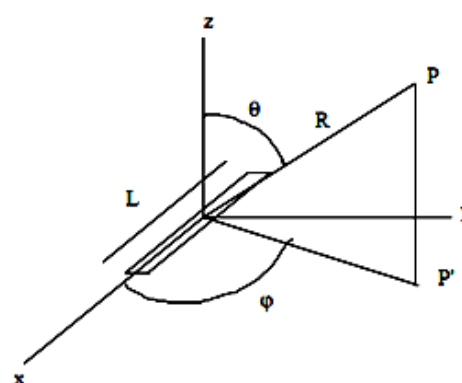


Рис. 1. Графическое представление прямолинейного излучения

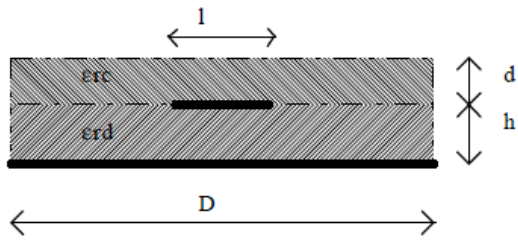


Рис. 2. Вид поперечного сечения

Метод Грина учитывает для каждого излучения ПП наличие диэлектрических слоев между металлической плоскостью и воздухом. Этот алгоритм был интегрирован в среду PRESTO. Это высокопроизводительное программное обеспечение для проверки качества после компоновки, которое выполняет точное электрическое моделирование целых печатных модулей (печатных плат, микроконтроллеров, межсоединений) для оценки целостности сигнала, а также проблем с ЭМС таких, как перекрестные помехи. Эта интеграция позволяет использовать потенциал встроенного в PRESTO механизма моделирования SPRINT [7] (симуляционная программа реагирования интегрированных сетевых переходных процессов). Фактически все сети могут быть проанализированы за один прогон, так что все паразитные эффекты (отражения, перекрестные помехи, несовпадения, отскок от поверхности корпуса и платы) учитываются одновременно.

PRESTO выполняет симуляцию целостности сигнала всей платы и выдает фактические текущие распределения по сетям во временной области. Быстрое преобразование Фурье выполняется для получения сигналов напряжения и тока в частотной области. В соответствии с пользовательской конфигурацией отображается частотный спектр излучений для отдельных сетей.

Численные проверки и результаты

Хотя метод Грина можно использовать для произвольного анализа излучений на многослойной печатной плате, мы будем использовать электромагнитное излучение для анализа двух простых структур, для которых хорошо известны диаграммы направленности, для того, чтобы подтвердить подход и реализацию.

В качестве первого примера будет рассмотрен радиационный анализ короткого прямолинейного следа над печатным модулем. Мы сравним результаты электромагнитного излучения с теоретическими для диполя Герца, чтобы увидеть, как алгоритм, основанный на методе Грина, следует изменению расстояния меж-

ду металлической плоскостью и излучающим диполем. Поперечное сечение структуры показано на рис. 3.

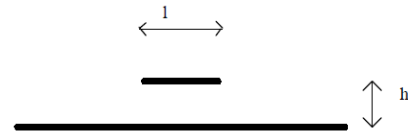


Рис. 3. Герцовый диполь над металлической плоскостью

Мы взяли:

- l (ширина диполя) = 1 мм
- L (длина диполя) = 0,4 м
- $f = 75$ МГц $\Rightarrow l = 4$ м
- $I = 1$ А
- R («положение антенны») = 10 м

Обратите внимание, что $l \ll L$ и $L \ll l$.

Результаты могут быть проверены против классического подхода [9] массива из двух идентичных вертикальных диполей Герца.

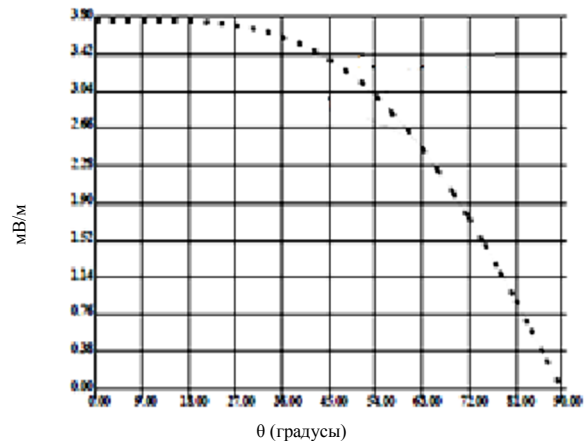


Рис. 4. H-плоскость для герцовского диполя над металлической плоскостью ($h = 1$ м)

На рис. 4, 5 показано сравнение двух методов для плоскости H (θ от 0 до 90 градусов $\varphi = 90$ градусов) в двух случаях: $h = 1$ м (а) и $h = 1$ см (б). Мы видим хорошее соответствие между электромагнитными излучениями и используемой классической формулой. Чем больше излучающий диполь закрыт металлической плоскостью, тем меньше он излучает. Когда точка наблюдения находится на металлической плоскости, электрическое поле становится равным нулю с учетом условия интерфейса.

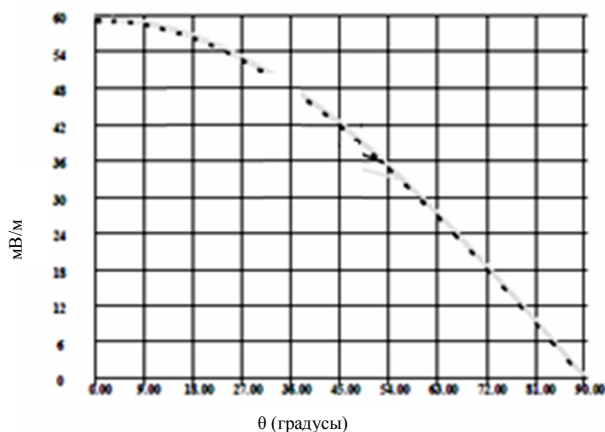


Рис. 5. H-плоскость для герцовского диполя над металлической плоскостью ($h = 1$ см)

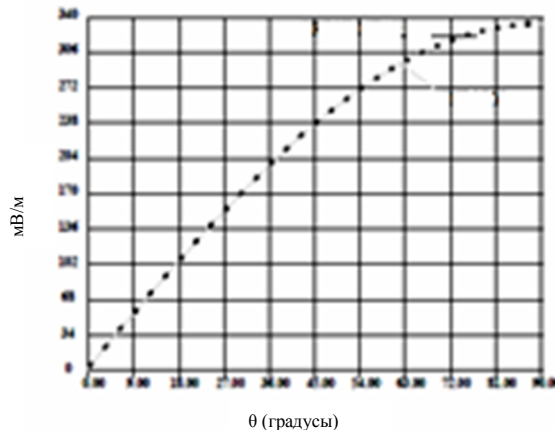


Рис. 7. Диаграмма H-плоскости для рамочной антенны

Выводы

Чтобы точно количественно определить проблемы электромагнитных помех на сложных ПП, содержащих большое количество сетей, необходимо найти компромисс между точностью и временем моделирования. Алгоритм, используемый в излучениях ближнего электромагнитного поля, позволяет прогнозировать электромагнитное поле, излучаемое ПП, с учетом точного описания сечения ПП посредством соответствующих передаточных функций, основанных на диадической функции Грина. Результаты синхронизации позволяют имитировать спектр излучения всех сетей сложной ПП. Представленный алгоритм открыт для будущего прогноза излучений ПП.

Связанные с программным комплексом PRESTO электромагнитные излучения ближнего поля становятся полностью интегрированными в среду, которая быстро проверяет макеты с точки зрения электромагнитной совместимости.

Литература

1. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «ГруппаИДТ», 2007. 616 с.
2. Макаров О.Ю., Муратов А.В., Ромашенко М.А. Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств: монография. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 234 с.
3. Ромашенко М.А. Основные задачи анализа обеспечения ЭМС в конструкциях РЭС и принципы его выполнения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 4. С. 106-109.
4. Суриков В.В. Электромагнитная совместимость приемно-передающих устройств, расположенных на элементах конструкций сложной формы: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.04.03. СПб., 2010. 36 с.
5. Князев А.Д., Кечиев Л.Н., Петров Б.В. Конструирование радиоэлектронной и электронно-

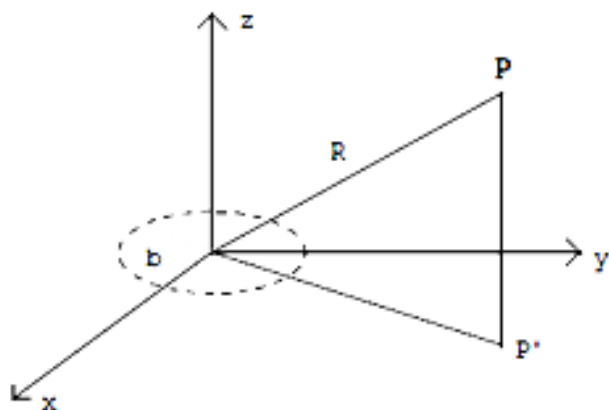


Рис. 6. Излучающая рамочная антенна, изготовленная из 16 электрически небольших диполей, соединенных вместе в плоскости xy

Кроме того, излучение от рамочной антенны можно сравнить с классическими [9] результатами для элементарного магнитного диполя. Структура показана на рис. 6. Шестнадцать коротких сегментов соединены вместе, чтобы сделать петлю с эквивалентным радиусом $b = 0,01$ м, с рабочей частотой 50 МГц.

Диаграмма H-плоскости на рис. 7 показывает сравнение двух моделей с R (положение антенны) = 10 метров, I (сила тока) = 1А. Мы наблюдаем отличную согласованность между этими двумя методами.

вычислительной аппаратуры с учетом электромагнитной совместимости. М.: Радио и связь, 1989. 224 с.

6. Ромащенко М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчи-

вости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук: 05.12.04. Воронеж, 2014. 36 с.

7. Ромащенко М.А. Методика анализа помехоустойчивости печатных плат при проектировании РЭС с учетом ЭМС // Радиотехника. 2014. № 3. С. 92-95.

Поступила 15.08.2019; принята к публикации 11.10.2019

Информация об авторах

Глотов Вадим Валерьевич - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

Глотова Татьяна Сергеевна - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9122-8988>

FORECASTING ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE IN THE NEAR FIELD USING GREEN METHOD

V.V. Glotov, T.S. Glotova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: solving electromagnetic compatibility issues is now becoming an integral element of the activities of enterprises - developers and manufacturers of electronic devices, the basis of which, as a rule, are printed modules. In order to keep up with new trends, design engineers have to miniaturize electronic components, which increases the chances of failures in the work of electronic tools. So, for example, a conventional printed circuit board can have hundreds or even thousands of circuits, with each circuit being a potential source of energy that can ultimately unintentionally affect other circuits or elements. Since the problems that arise when solving the issues of electromagnetic compatibility are in the late stages of the development of electronic equipment, the resulting new methods for assessing electromagnetic interference should be predicted in the early stages of design. In the case of complex printed circuit boards containing integrated microcontrollers, as well as a large number of tracks, to evaluate it is necessary to find a compromise between the accuracy and simulation time of the tested printed module. The basic algorithm used in the new tool for the predictive analysis of electromagnetic radiation is presented in the article. It is able to accurately take into account the actual cross section between the metal plane and the air for each track, an element of the printed circuit board. This is compared with theoretical formulas for verification. The effect of PCB coating on dipole radiation is described

Key words: printed circuit board, wire, case, Green model, electromagnetic compatibility, near field

References

1. Kechiev L.N. "Design of printed circuit boards for digital high-speed equipment" ("Proektirovanie pechatnykh plat dlya tsifrovoy bystrodeystvuyushchey apparatury"), Moscow, GruppaiDT LLC, 2007, 616 p.
2. Makarov O.Yu., Muratov A.V., Romashchenko M.A. "Methods for ensuring intra-equipment electromagnetic compatibility and noise immunity in electronic equipment designs" ("Metody obespecheniya vnutriapparaturnoy elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti v konstruktivnykh elektronnykh sredstv"), monograph, Voronezh State Technical University, 2013, 234 p
3. Romashchenko M.A. "The main tasks of the analysis of providing EMC in the designs of RES and the principles of its implementation", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 4, pp. 106-109.
4. Surikov V.V. "Electromagnetic compatibility of transmitting and receiving devices located on the elements of complex structures" ("Elektromagnitnaya sovmestimost' priyemno-peredayushchikh ustroystv, raspolozhennykh na elementakh konstruktivnykh slozhnoy formy"), Cand. Tech. Sciences dis., St. Petersburg, 2010, 36 p.
5. Knyazev A.D., Kechiev L.N., Petrov B.V. "Design of electronic and electronic equipment taking into account electromagnetic compatibility" ("Konstruirovaniye radioelektronnoy i elektronno-vychislitel'noy apparatury s uchetom elektromagnitnoy sovmestimosti"), Moscow, Radio i svyaz', 1989, 224 p.
6. Romashchenko M.A. "Methods for the optimal design of electronic structures with regard to electromagnetic compatibility and noise immunity" ("Metody optimal'nogo proyektirovaniya konstruktivnykh radioelektronnykh sredstv s uchetom elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti"), Dr. tech. sciences dis., Voronezh, 2014, 36 p.
7. Romashchenko M.A. "Methodology for the analysis of noise immunity of printed circuit boards in the design of RES taking into account EMC", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2014, no. 3, pp. 92-95.

Submitted 15.08.2019; revised 11.10.2019

Information about the authors

Vadim V. Glotov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

Tat'yana S. Glotova, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9122-8988>

АЛГОРИТМ УСТРОЙСТВА ФОРМИРОВАНИЯ ТАКТОВОГО СИГНАЛА SDRAM ПАМЯТИ

Д.Н. Чернов¹, А.С. Смирнов², Е.Д. Алперин¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается алгоритм формирования тактового сигнала SDRAM микросхем для повышения надёжности операций чтения и записи при влиянии внешней среды. Суть алгоритма состоит в последовательной связке запись-чтение. То есть константное значение сначала записывается в память, а после считывается из неё, если запись прошла успешно, значение задержки запоминается во внутреннем регистре, если нет, то величина задержки увеличивается и цикл запись-чтения повторяется снова. Так будет происходить до тех пор, пока не зафиксируется рабочий вариант либо не исчерпается лимит элементов задержки. После того, как будет найдено и сохранено первое рабочее значение задержки, алгоритм продолжит выполнять цикл запись-чтение, попутно наращивая значение задержки до тех пор, пока считанное значение будет не совпадать с записанным. Таким образом, получатся минимальное и максимальное значения задержки. После этого вычисляется среднее значение и устанавливается в качестве основного. Описание алгоритма выполнено средствами языка VHDL. В качестве платформы разработки используется ПЛИС от Xilinx семейства Virtex 5 модель XC5VLX110

Ключевые слова: тактовый сигнал, SDRAM, задержка, алгоритм, ПЛИС, Virtex 5

Введение

SDRAM – это синхронная, энергозависимая память, лежащая в основе работы большинства современных микропроцессорных систем. Такая популярность объясняется её ценовой доступностью, но при этом она имеет довольно сложную внутреннюю архитектуру. В физической основе SDRAM памяти лежит ёмкостной элемент, который играет роль аккумулятора. Так как со временем заряд с ёмкости может уходить в SDRAM, предусмотрена возможность регенерации банков памяти. Эта операция, а также операции чтение-запись выполняются по строгому определению тактового сигнала [1].

Для управления микросхемой SDRAM существует отдельная шина команд. Данные с этой шины захватываются микросхемой по фронту тактового сигнала. Это могут быть команды: записи, чтения, регенерации банков памяти, деактивации ряда, открытия или закрытия ряда для операции записи и чтения. На рис. 1 показан пример операции чтения данных из памяти.

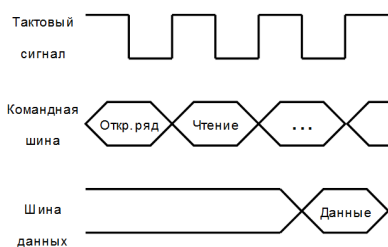


Рис. 1

Генерацией управляющих сигналов для микросхемы SDRAM занимается контроллер памяти. Это создаёт определённые трудности. Дело в том, что для генерации управляющих сигналов контроллер задействует много логики, что накладывает временные задержки на формирование командных сигналов. Таким образом, триггеры внутри микросхемы SDRAM должны защёлкиваться в момент, когда сигналы на командной шине будут устойчивыми. Значит, тактовый сигнал SDRAM должен иметь задержку равную времени установки сигналов контроллером памяти (рис. 2) [1].

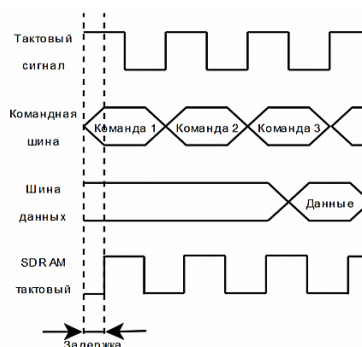


Рис. 2

Для внесения задержки в тактовый сигнал микросхемы SDRAM было разработано специальное устройство, состоящее из блока задержки и аппаратного драйвера для контроллера памяти.

Алгоритм работы устройства

Время задержки, о которой говорилось выше, не является константой. На её длительность может повлиять такой внешний фактор, как температура среды.

Опираясь на этот факт, был разработан алгоритм экспериментального подбора устойчивого значения времени задержки тактового сигнала. Его суть состоит в последовательной связке запись-чтение. То есть, константное значение сначала записывается в память, а после считывается из неё, если запись прошла успешно, значение задержки запоминается во внутреннем регистре, если нет, то величина задержки увеличивается, и цикл запись-чтение повторяется снова. Так будет происходить до тех пор, пока не будет найден рабочий вариант либо не будет исчерпан лимит элементов задержки.

После того, как будет найдено и сохранено первое рабочее значение задержки, алгоритм продолжит выполнять цикл запись-чтение, попутно наращивая значение задержки. Так будет происходить до тех пор, пока считанное значение будет не совпадать с записанным.

Таким образом, получится минимальное и максимальное значения задержки. После этого вычисляется среднее значение и устанавливается в качестве основного.

Структурная схема блока задержки

Структурная схема блока задержки представлена на рис. 3.

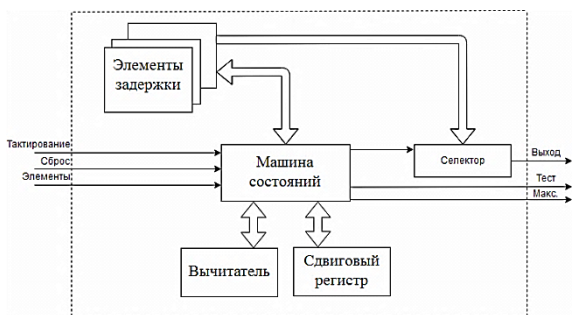


Рис. 3

Она включает в себя набор элементов задержки, машину состояний, арифметический вычитатель, сдвиговый регистр и селектор выходного сигнала.

Схема синхронная и срабатывает по положительному фронту тактового сигнала. После сброса все внутренние регистры устанавливаются в ноль. Входная шина «Элементы» пока-

зывает количество элементов задержки, которые необходимо включить в цепь.

Каждый положительный фронт тактового сигнала машина состояний передаёт количество заданных на входе элементов в вычитатель, где вычисляется разность между ними и значением внутреннего счётчика элементов. Если результат операции не нулевой, машина состояний формирует управляющие сигналы для блока элементов задержки и запускает внутренний счётчик, в противном случае происходит холостой цикл.

Блок элементов задержки состоит из десяти элементов, каждый из которых может задавать задержку в 4.6875 нс. Управляющими сигналами для этого блока служат: тактовый сигнал, сигнал включения и сигнал инкремента. Если сигнал включения активен, каждый положительный фронт тактового сигнала, в зависимости от значения инкремента, идёт увеличение/уменьшение задержки выходного сигнала относительно входного.

Переполнение счётчика машины состояний показывает, что элемент задержки достиг максимума. Поэтому в сдвиговом регистре происходит переход сигнала включения на другой элемент. При переполнении внутреннего счётчика элементов становится активным выходной сигнал «Макс.».

На выходе схемы установлен селектор, который по значению внутреннего счётчика элементов определяет, сигнал с какого элемента задержки отправится на выход.

Машина состояний

Этот блок является управляющим устройством схемы. Алгоритм его работы показан на рис. 4.

Из рисунка видно, что поведение модуля определяет внутренний регистр состояния. Он может принимать значения от 0 до 3. Если по положительному фронту тактового сигнала значение внутреннего регистра состояния является нулевым, блок произведёт сравнение количества элементов, заданных на входе, с количеством элементов, уже включённых в цепь (эта информация хранится во внутреннем счётчике элементов). В случае, когда на входе элементов задано больше, чем содержит внутренний счётчик элементов, сигнал инкремента становится активным. Если же на входе задано меньше элементов, сигнал инкремента станет не активным. Параллельно эти данные передаются в вычитатель, который считает количе-

ство элементов для добавления к цепи (или выбрасывания из неё). Значение внутреннего регистра состояния меняется на 1.

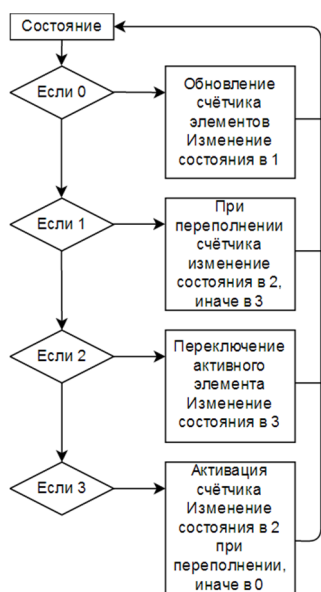


Рис. 4

Если значение внутреннего регистра состояния – 1, данные с выхода вычитателя передаются во внутренний счётчик машины состояний, а также обновляются данные внутреннего счётчика элементов. Если выбранный элемент достиг максимальной задержки, значение регистра состояния меняется на 2, в противном случае в регистр состояния заносится значение 3.

Если значение внутреннего регистра состояния – 2, сигнал активации элемента задержки переходит к следующему элементу в очереди. Делается это в сдвиговом регистре. Также осуществляется контроль по переполнению (в случае инкремента цепи) и отслеживание нулевого элемента (в случае декремента).

Когда значение внутреннего регистра состояния – 3, выполняется наращивание задержки в активном элементе. Это делается с помощью декремента внутреннего счётчика машины состояний. Каждые десять тактов происходит проверка условия переполнения активного элемента задержки. Если этот элемент достиг максимума, значение внутреннего регистра состояния изменяется на 2. В противном случае проверяется значение внутреннего счётчика машины состояний. Если оно равно нулю, задержка установлена и регистр состояния становится 0. Если оно не равно нулю, этап наращивания продолжается, а значение регистра состояния остаётся неизменным.

Элементы задержки

Схема базируется на ПЛИС Xilinx Virtex 5, поэтому в качестве основы блока элементов задержки используются примитивы Xilinx, IODELAY (рис. 5).



Рис. 5

Примитив IODELAY является синхронным устройством и состоит из цепи элементов задержки (64 элемента), мультиплексора и счётчика. Он имеет три режима работы: инкремент, декремент и удержание задержки выходного сигнала относительно входного. Управление осуществляется через входы «Инкремент» и «Включение» (рис. 5). Если сигнал «Включение» не активен, элемент удерживает установленное значение задержки. В противном случае, при активном уровне сигнала «Инкремент» значение задержки инкрементируется, при неактивном декрементируется. Внутренняя организация примитива IODELAY показана на рис. 6.

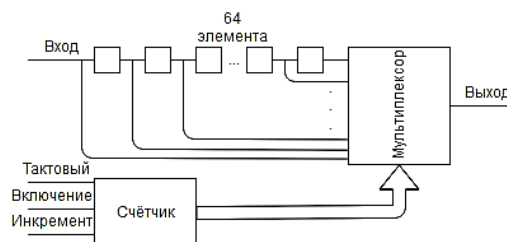


Рис. 6

Драйвер контроллера памяти

Как уже говорилось выше, правильный подбор тактовой частоты обеспечивает взаимодействие блока задержки с контроллером памяти. Это взаимодействие осуществляется аппаратным драйвером, встроенным в контроллер.

На момент запуска всей системы происходит процесс инициализации SDRAM памяти, как правило, это: команда деактивации ряда всех банков, команды регенерации банков (количество этих команд задаётся производителем микросхемы) и команда загрузки конфигурации микросхемы (настройка латентности и длины

пакета). Аппаратный драйвер перед запуском этой инициализации выполняет проверку выходного stroba блока задержки (test_sd на рис. 8), если этот сигнал находится в активном состоянии, инициализация запускается. Помимо управления запуском инициализации, драйвер расширяет её командами записи и чтения константы.

На рис. 7 представлена временная диаграмма, демонстрирующая работу устройства. Шина elements указывает блоку задержки какое количество элементов должно быть установлено. После изменений на этой шине блок задержки «проваливает» сигнал test_sd, таким образом заставляя драйвер ждать, пока необходимая задержка будет установлена.

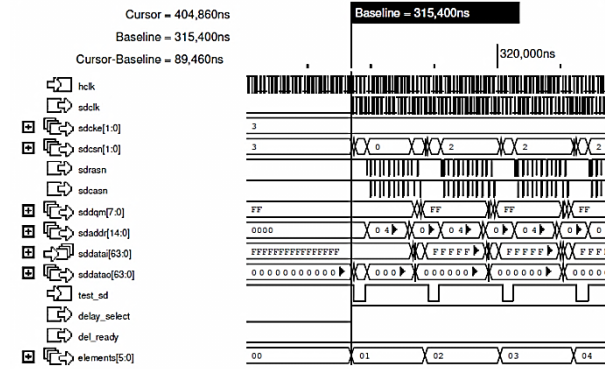


Рис. 7

На рис. 8 показан разбег фаз между тактовым сигналом контроллера и тактовым сигналом SDRAM памяти. Как видно из рис. 8, после того, как блок задержки завершил работу (test_sd активен), сигнал sdcik задержан на 0.78125 наносекунд.

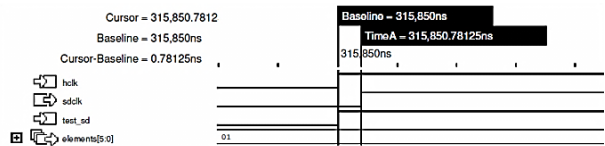


Рис. 8

После драйвер запускает цепочку инициализации и по результатам операций записи-чтения принимает решение, подобрана задержка или нет. Рис. 9 демонстрирует операцию записи константы 0xf0f0f0f0f0f0f0f0 в SDRAM память.

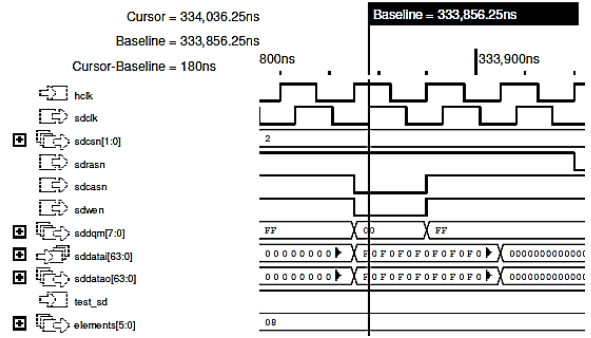


Рис. 9

На рис. 10 показан результат чтения. Из него видно, что на входной шине sddatai появляются ранее записанные данные. Это показывает верное нахождение крайнего значения задержки. Значение с шины elements заносится во внутренний регистр, а сигнал mwork становится активным. Это означает, что теперь задержка будет расти до тех пор, пока прочитанное значение будет не равно записанной ранее константе.

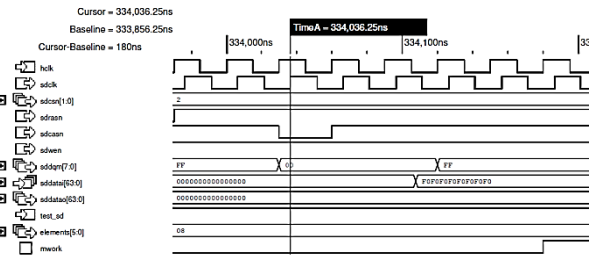


Рис. 10

На рис. 11 продемонстрирован результат неудачного чтения. При этом сигнал mwork становится не активным, а значение с шины elements используется в качестве второго параметра для блока, вычисляющего среднее значение. В качестве первого параметра для этого блока используется значение, ранее занесённое во внутренний регистр.

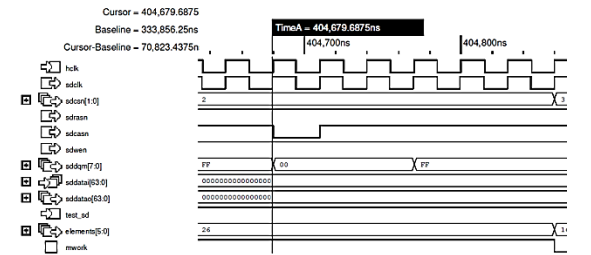


Рис. 11

В результате устанавливается среднее устойчивое значение задержки, и сигнал del_ready становится активным (рис. 12).

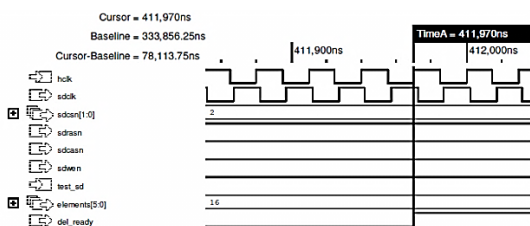


Рис. 12

Заключение

Таким образом, все последующие обращения контроллера к микросхеме SDRAM памяти будут выполняться с использованием установленного тактового сигнала.

Поступила 24.09.2019; принята к публикации 19.10.2019

Информация об авторах

Чернов Дмитрий Николаевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sewaipер@bk.ru

Смирнов Алексей Сергеевич – ведущий инженер, АО «Научно-исследовательский институт электронной техники», (394026, Россия, г. Воронеж, Старых Большевиков, 5), тел. +7(473)226–29–37

Алперин Евгений Данилович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243–76–65

ALGORITHM OF GENERATION CLOCK SIGNAL FOR SDRAM MEMORY

D.N. Chernov¹, A.S. Smirnov², E.D. Alperin¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²АО «НИИЕТ», Voronezh, Russia

Abstract: an algorithm for generating a clock signal of SDRAM chips is considered to increase the reliability of read and write operations under the influence of the external environment. The idea of the algorithm is a sequential write and read operations. First, the constant value is written to the memory, and then read from it. If the writing operation was successful, the delay value is stored in the internal register. Next we need to find a value that the algorithm cannot read. The algorithm will try to find this value until a working option is found, or the delay limit elements is over. When the first working delay value is found and stored, the algorithm will continue to perform a write-read cycle, simultaneously increasing the delay value until the read value coincides with the recorded value. Thus, the minimum and maximum delay values will be found, the average delay value is calculated and set as the main one. The description of the algorithm is performed by means of the VHDL language. The FPGA from Xilinx of the Virtex 5 family, model XC5VLX110, is used as a development platform

Key words: clock signal, SDRAM, delay, algorithm, FPGA, Virtex 5

References

1. “Fundamentals of SDRAM memory”, available at: www.oreilly.com
2. Moriyama T., Chiu R. “DDR SDRAM controller using Virtex-5 FPGA devices”, 2006, available at: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp851.pdf
3. “Virtex-5 FPGA data sheet: DC and switching characteristics”, available at: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds202.pdf
4. Polyakov A.K. “VHDL and Verilog languages in digital devices projecting” (“Yazyki VHDL i Verilog v proektirovanii tsifrovoy apparatury”), Moscow, SOLON-Press, 2003.
5. Pong P.Chu “Embedded SoPC design with Nios II processor and Verilog examples”, John Wiley & Sons Inc., 2012

Submitted 24.09.2019; revised 19.10.2019

Information about the authors

Dmitriy N. Chernov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sewaipер@bk.ru

Aleksey S. Smirnov, Senior Engineer, АО «НИИЕТ» (5 Starykh Bolshevikov str., Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (473) 2262937

Evgeniy D. Alperin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. +7(473) 2437665

Литература

1. URL: <http://www.iuma.ulpgc.es/~nunez/clases-microcontrollers/Embedded-Memory-Design-SDRAM-DDR2-3-Tek.pdf>, Fundamentals of SDRAM Memory [Электронный ресурс] (дата обращения: 10.06.2018).

2. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/application_notes/xapp851.pdf Moriyama, Rich Chiu, DDR SDRAM Controller Using Virtex-5 FPGA Devices [Электронный ресурс]. (дата обращения 10.06.2018).

3. URL: https://www.xilinx.com/support/documentation/data_sheets/ds202.pdf Virtex-5 FPGA Data Sheet: DC and Switching Characteristics [Электронный ресурс] (дата обращения 10.06.2018).

4. Поляков А.К. Языки VHDL и VERILOG в проектировании цифровой аппаратуры. М.: СОЛОН-Пресс, 2003.

5. Pong P. Chu. Embedded SoPC Design with Nios II Processor and Verilog Examples. John Wiley & Sons Inc., 2012.

ЛОКАЛЬНАЯ СИСТЕМА НАВИГАЦИИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НИЗКОЧАСТОТНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

И.М. Голев¹, А.В. Сергеев²

¹Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описана локальная система навигации с использованием низкочастотного магнитного поля, обладающая рядом преимуществ по сравнению с системами, использующими другие физические поля. Рассмотрены особенности магнитного, электромагнитного, акустического полей, определяющих характеристики навигационных систем. Показано, что использование магнитного поля позволяет создавать системы навигации, обладающие высокой помехозащищенностью, независимостью от климатических и погодных условий и типа подстилающей поверхности. Описана структурная схема навигационной системы, состоящая из наземного и бортового оборудования. В системе используется вращающееся магнитное низкочастотное поле, которое создается магнитным маяком – двумя катушками индуктивности, расположенными взаимно перпендикулярно. Для определения характеристик магнитного поля, создаваемого магнитным маяком в точке расположения подвижного объекта, используется трехкоординатный магнитометр, который измеряет три взаимно ортогональные компоненты вектора индукции переменного магнитного поля, амплитуды и фазы которых однозначно связаны с тремя линейными и тремя угловыми координатами объекта. Приводятся параметры макета модуля навигационной системы с частотой магнитного поля 419 Гц, магнитным моментом маяка $250 \text{ А}\cdot\text{м}^2$ и чувствительностью магнитометра не хуже 1 нТл. Дальность действия описанной навигационной системы не менее 30 метров. Погрешности линейных ΔR и угловых измерений $\Delta\psi$ нелинейно зависят от расстояния R , при $R=30$ м величина $\Delta R = 8,8$ м и $\Delta\psi = 25^\circ$, а для $R=5$ м величина $\Delta R = 4\cdot 10^{-3}$ м и $\Delta\psi = 0,13^\circ$. Для увеличения дальности модули могут быть расположены на поверхности (или под землей) территории, создавая навигационное поле необходимой конфигурации. Системы навигации с использованием вращающегося переменного магнитного поля могут решать задачи локальной навигации и посадки беспилотных летательных аппаратов как самолетного, так и вертолетного типов; навигации внутри помещений; навигации робототехнических устройств; работать в составе систем управления и контроля перемещений персонала, техники и грузов на объектах

Ключевые слова: локальная навигационная система, вращающееся переменное магнитное поле, магнитный момент, трехкоординатный датчик

Введение

Системы навигации являются неотъемлемой частью большинства подвижных объектов. Точность и полнота навигационной информации во многом определяют эффективность их функционирования [1, 2]. На практике применение нашли различные методы навигации, отличающиеся природой используемых физических величин (полей).

Различают следующие методы [3-5]:

- радиотехнические (в том числе спутниковые), применяющие для навигационных целей временные, амплитудные, частотные, фазовые и другие характеристики электромагнитных излучений;

- оптические (в том числе инфракрасные и лазерные), основанные на применении естественных и искусственных источников света (маяки, огни, небесные светила, лазерная техника);

- акустические, учитывающие особенности распространения и отражения акустических волн при относительном движении подвижного объекта в навигационном пространстве;

- астрономические, основанные на определении координат подвижного объекта путем пеленгования небесных светил;

- геомагнитные, использующие навигационные свойства нормального и аномального магнитного поля Земли;

- гравитационные методы, использующие навигационные свойства гравитационного поля Земли, а также инерциальные силы, возникающие от ускорений при движении подвижного объекта.

С точки зрения применения в системах навигации и ориентации важны следующие физические и технические аспекты использования физических полей (ФП):

- влияние естественной среды распространения на характеристики ФП;

- влияние искусственных преград на характер распространения ФП;

- скорость распространения физического поля в пространстве;
- величина искусственных или естественных шумов ФП;
- наличие технических устройств генерации и регистрации ФП;
- возможность создания их точных пространственных математических моделей.

Особенности навигационных систем (НС), с применением различных физических полей представлены в таблице.

В настоящее время уделяется повышенное внимание к созданию навигационных систем,

обладающих повышенной помехозащищенностью, устойчивостью к погодным и климатическим воздействиям, а также скрытностью. Указанные требования во многом определяются фундаментальными свойствами используемых для получения навигационной информации физических полей (таблица). Как видно, что применение магнитного поля позволяет создавать НС, на характеристики которой слабое влияние оказывают естественная среда (сложные метеоусловия), искусственные преграды, а также преднамеренные помехи, в том числе и имитационные.

Особенности навигационных систем в зависимости от вида используемого физического поля

Характеристики системы	Вид физического поля			
	акустическое	электромагнитное	электромагнитное оптического диапазона	магнитное
Влияние естественной среды распространения	очень сильное	сильное	сильное	слабое
Влияние искусственных преград	требуется наличие прямой видимости	сильное	требуется наличие прямой видимости	слабое
Помехозащищенность	низкая	низкая	низкая	высокая
Устройства для генерации поля	простые	технически сложные	простые	технически сложные
Размеры генераторов	малые	большие	очень малые	большие
Чувствительность детекторов	достаточно высокая	высокая	очень высокая	очень высокая
Размеры детекторов	малые	большие	очень малые	очень малые

В работе рассматривается локальная система навигации с использованием низкочастотного магнитного поля (до 10 кГц), обладающая рядом преимуществ по сравнению с системами, использующими другие физические поля.

Особенности магнитного поля для задач навигации

Рассмотрим более подробно особенности магнитного поля. Отметим, что на планете Земля существует геомагнитное поле, которое может быть использовано для построения глобальной системы навигации. Оно имеет сложную и многокомпонентную структуру [4, 6]. Модуль магнитного поля Земли (МПЗ), измеренный на поверхности земного шара, как известно, изменяется в пределах $25 \cdot 10^3$ нТл ÷ $65 \cdot 10^3$ нТл от экватора к полюсам. Одной из глобальных характеристик МПЗ, существенно

важных для навигации, является поле магнитных глобальных, региональных и локальных аномалий – отклонений реального поля от дипольного характера, величиной до 20 % от модуля общего поля в отдельных областях. Нижний предел величины измеряемого МПЗ определяется его геомагнитными шумами: порядка 1 нТл (в области частот до 0,1 Гц) и 0,01 нТл на более высоких частотах. Для систем навигации и ориентации большой интерес также представляют магнитные поля объектов антропогенного происхождения: трубопроводы, железные дороги, здания, водохранилища и т.п. Значения таких магнитных аномалий лежит в пределах $10^2 - 10^4$ нТл.

Однако в настоящее время отсутствуют достаточно точные карты аномального магнитного поля Земли, что не позволяет использовать измерения МПЗ для решения навигационных задач. Кроме того, как правило для картографирования используются летательные

аппараты, барражирующие на одной высоте (80÷200 м), а задача пересчета аномального магнитного поля на другие высоты в настоящее время не решена в полной мере.

Вместе с тем магнитное поле имеет ряд физических характеристик, делающих его перспективным для использования в системах навигации. Для постоянного магнитного поля магнитная проницаемость μ воздуха, воды (пресной и морской), биологических объектов, диэлектрических, диамагнитных и парамаг-

нитных конструкционных материалов практически равна единице. В подобных условиях ослабление, отражение или преломление линий магнитной индукции не происходит. Большинство грунтов обладает диамагнитными и парамагнитными свойствами. Относительно редко встречаются ферромагнитные минералы с большой магнитной проницаемостью, например, магнетит, маггемит и т.п. В большинстве случаев влиянием грунтов на параметры магнитного поля можно пренебречь.

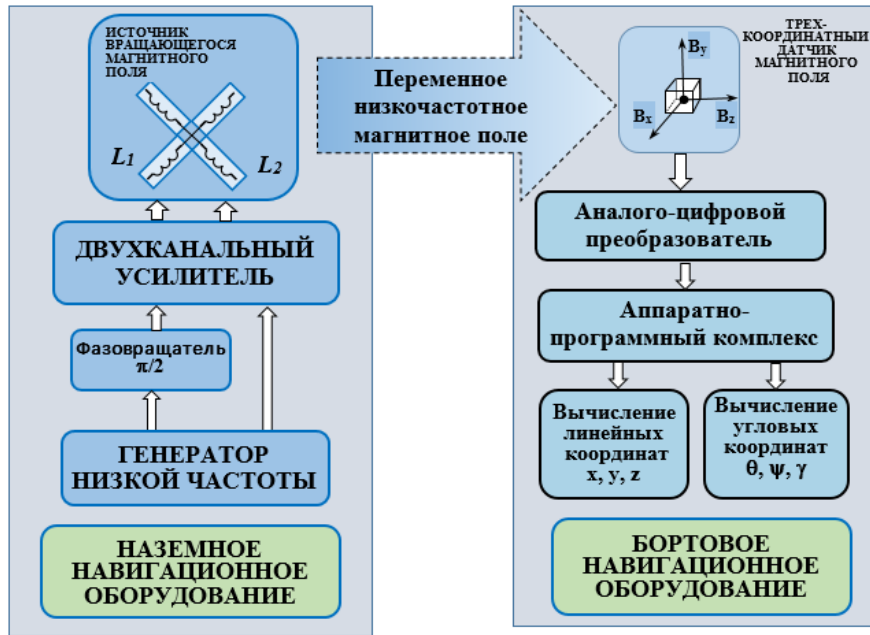


Рис. 1. Структурная схема локальной системы навигации с использованием низкочастотного магнитного поля

Для переменных магнитных полей пространство поля определяется электрической проводимостью среды σ и её магнитной проницаемостью μ_c . В этом случае имеет место скин-эффект – уменьшение амплитуды магнитной индукции переменного магнитного поля с частотой f по мере проникновения его в объем проводящей среды. Уменьшение амплитуды поля в $e = 2,718$ раз происходит на расстоянии δ , называемой скин-слоем

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \cdot \mu_0 \cdot \mu_c \cdot f \cdot \sigma}}. \quad (1)$$

Например, в случае дождя стандартной интенсивности 5 мм/мин. при удельной проводимости воды 10^4 См/м [7], частоте $f = 10^3$ Гц, $\mu_c \sim 1$ величина скин-слоя $\delta \sim 10^6$ м. В этом случае влиянием дождя, тумана или снега на параметры навигационной системы с использованием переменного магнитного поля можно пренебречь.

Структурная схема

На рис. 1 показана структурная схема локальной системы навигации с использованием низкочастотного магнитного поля, состоящей из наземного и бортового навигационного оборудования. В данной системе используется вращающееся магнитное низкочастотное поле, которое создается магнитным маяком – двумя катушками индуктивности L_1 и L_2 , расположенными взаимно перпендикулярно. Через катушки протекают токи, изменяющиеся по гармоническому закону со сдвигом фаз $\pi/2$ между катушками, ($I_1 = I_0 \cos \omega t$, $I_2 = I_0 \sin \omega t$). При этом система обладает магнитным моментом \vec{M} , который, не изменяясь по модулю, вращается в плоскости (xOz), образованной главными осями симметрии катушек, с постоянной угловой частотой ω .

В каждый момент времени система может быть описана моделью магнитного диполя, создающей в точке наблюдения поле радиус-вектором \vec{r} с индукцией:

$$\vec{B}_a(r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \left[\frac{3(\vec{M}_a \times \vec{r}) \cdot \vec{r}}{r^5} - \frac{\vec{M}_a}{r^3} \right], \quad (2)$$

где $\vec{B}_a(r)$ и \vec{M}_a – амплитудное значение магнитной индукции и магнитного момента соответственно; μ_0 – магнитная постоянная. Согласно (2) вектор индукции однозначно зависит только от расстояния от геометрического центра магнитной системы до точки определения координат и величины \vec{M}_a . Для определения характеристик магнитного поля, создаваемого магнитным маяком в точке расположения подвижного объекта, используется трехкоординатный датчик бортового оборудования навигационной системы (см. рис. 1). Он предназначен для измерения трех взаимно ортогональных компонент вектора индукции переменного магнитного поля.

Компоненты вектора магнитной индукции поля маяка в точке измерения в нормальной системе координат, связанной с маяком, определяются выражениями [8]:

$$\begin{aligned} B_x &= \frac{\mu_0 M}{4\pi} \left(\frac{3(x \cdot \cos \omega t + z \cdot \sin \omega t) \cdot x}{r^5} - \frac{\cos \omega t}{r^3} \right), \\ B_y &= \frac{\mu_0 M}{4\pi} \cdot \frac{3(x \cdot \cos \omega t + z \cdot \sin \omega t) \cdot y}{r^5}, \\ B_z &= \frac{\mu_0 M}{4\pi} \left(\frac{3(x \cdot \cos \omega t + z \cdot \sin \omega t) \cdot z}{r^5} - \frac{\sin \omega t}{r^3} \right), \end{aligned} \quad (3)$$

где r – радиус-вектор, (x, y, z) – линейные координаты подвижного объекта. Напряжения на выходе трехкоординатного датчика V_x, V_y, V_z связаны с компонентами вектора магнитной индукции через поворотную матрицу R следующим образом:

$$\begin{aligned} (V_x, V_y, V_z)^T &= R(B_x, B_y, B_z)^T, \\ R &= \begin{pmatrix} \cos \psi \cos \nu & (\sin \gamma \sin \psi - \cos \gamma \cos \psi \sin \nu) & (\cos \gamma \sin \psi + \sin \gamma \cos \psi \sin \nu) \\ \sin \nu & \cos \gamma \cos \nu & -\cos \nu \sin \gamma \\ -\sin \psi \cos \nu & (\sin \gamma \cos \psi + \cos \gamma \sin \nu \sin \psi) & (\cos \gamma \cos \psi - \sin \gamma \sin \nu \sin \psi) \end{pmatrix}, \end{aligned} \quad (4)$$

где ψ – угол рыскания, ν – угол тангажа, γ – угол крена.

Выражения (3-4) показывают, что напряжения, измеряемые на выходе трехкоординатного датчика однозначно определяются как линейными (x, y, z) , так и угловыми (ψ, ν, γ) координатами подвижного объекта. Используя процедуру, описанную в [10], с помощью аппаратно-программного комплекса вычисляются все шесть координат подвижного объекта. Для определения трех линейных и трех угловых координат, необходимо и достаточно измерения амплитуд и начальных фаз трех компонент вектора магнитной индукции (напряжений V_x, V_y, V_z), а также знание магнитного момента маяка и частоты магнитного поля.

Эксперимент

Расстояние, на котором можно получать навигационную информацию, определяется (в соответствии (3, 4)) величиной магнитного момента маяка, чувствительностью измерений компонент вектора магнитной индукции.

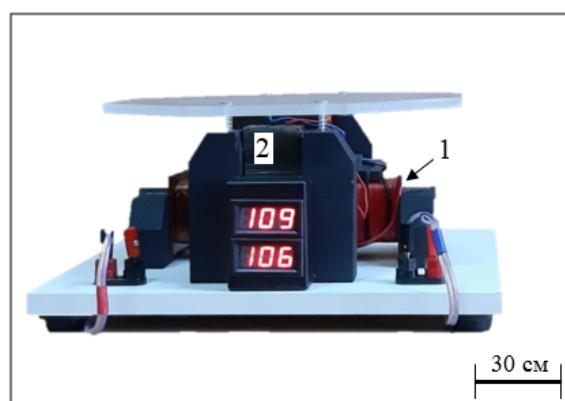


Рис. 2. Источник вращающегося низкочастотного магнитного поля (магнитный маяк): 1 и 2 – взаимно перпендикулярные катушки индуктивности L_1 и L_2

В экспериментах использовался магнитный маяк, в катушках индуктивности L_1 и L_2 которого используются магнитопроводы размером $40 \times 40 \times 220$ см, изготовленные из электротехнической стали Э21 (рис. 2). Катушки содержат по 700 витков провода ПЭВ-2 0,73 и имеют следующие параметры по частоте $f = 419$ Гц: индуктивность 110 мН ; сопротивление постоянному току $5,1 \text{ Ом}$; электрическая добротность $4,6$; максимально допустимый ток 5 А . Определенная из экспериментов амплитуда магнитного момента при протекании тока с амплитудой $5,0 \text{ А}$ равна $M_a = 250 \text{ А} \cdot \text{м}^2$.

В бортовом оборудовании использовались три феррозондовых датчика DRV425 (рис. 3).

Высокоточный датчик этого типа, построенный на основе феррозондового чувствительного элемента IFG с внутренней компенсирующей катушкой, предназначен для одноосевого детектирования и гальванически развязанных измерений переменного и постоянного магнитного поля в диапазоне ± 2 мТл при полосе пропускания до 32 кГц [9]. На выходе датчик формирует аналоговый сигнал, пропорциональный индукции магнитного поля. Основные параметры датчика в полной мере удовлетворяют требованиям, предъявляемым к магнитометрическим датчикам для систем навигации: максимальное смещение не превышает ± 8 мкТл; типовое значение дрейфа смещения составляет ± 5 нТл/°С; неравномерности усиления – 0,04%; дрейф усиления – $\pm 7 \times 10^{-4}$ %/°С; высокая линейность датчика – $\pm 0,1$ %.

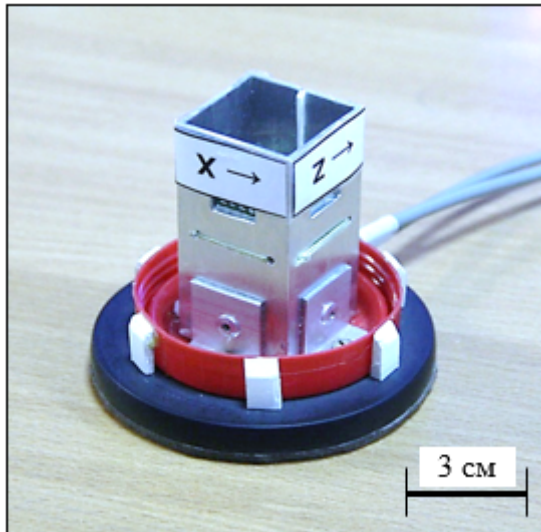


Рис. 3. Магнитометр на основе трех феррозондовых датчиков DRV425

С использованием данного типа датчика был изготовлен трехкоординатный векторный

магнитометр (см. рис. 3). Аналоговый сигнал с каждого датчика подавался на предварительный усилитель, выполненный на прецизионном операционном усилителе OPA 177GS с коэффициентом усиления равном 10, а затем поступал на вход быстродействующего модуля E20-10 фирмы L-Card. Модуль содержит АЦП с разрядностью 14 бит и частотой преобразования 10 МГц. Далее с использованием аппаратно-программного комплекса (ноутбук или микрокомпьютер Raspberry Pi3) проводилось вычисление координат подвижного объекта. Измерения проводились в помещении, где уровень промышленных шумов и помех на частоте 419 Гц в полосе частот 20 Гц не превышал 1 нТл. Отметим, что все три магнитометрических датчика имели разные амплитудно-фазовые характеристики: чувствительности датчиков отличались на 7-10%, сдвиги фазы на частоте 419 Гц – на $10 \pm 20^\circ$. Это требовало тщательной калибровки трехкоординатного датчика, которая заключалась в измерении выходных напряжений датчика при известных значениях линейных и угловых координат. Полученные характеристики датчиков учитывались при вычислительных процедурах.

Дальность действия навигационной системы в плоскости образованной главными осями симметрии катушек xOz была равна 30 метрам. Погрешности линейных ΔR и угловых измерений $\Delta \psi$ нелинейно зависят от расстояния R , например, при $R=30$ м величина $\Delta R = 8,8$ м и $\Delta \psi = 25^\circ$, а для $R=5$ м величина $\Delta R = 4 \cdot 10^{-3}$ м и $\Delta \psi = 0,13^\circ$ (см. рис. 4). Поскольку поле, создаваемое маяком, не является сферически симметричным, дальность действия системы зависит от угла, лежащего в вертикальной плоскости. С учетом этого плоскость вращения магнитного момента системы должна выбираться в соответствии с решаемой навигационной задачей.

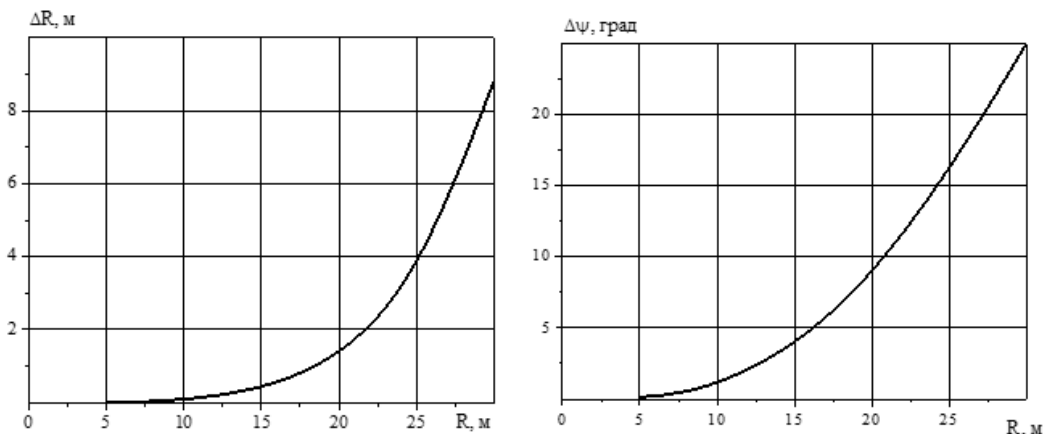


Рис. 4. Зависимости погрешностей линейных ΔR и угловых $\Delta \psi$ измерений от расстояния до магнитного маяка R

Заключение

Описанная в работе навигационная система (НС) обладает рядом преимуществ по сравнению с известными в силу использования низкочастотного магнитного поля (до 10 кГц) [3, 10]:

1. Высокой помехозащищенностью от электромагнитных помех природного и искусственного характера (в том числе средств радиоэлектронной борьбы).

2. Не зависимостью от климатических и погодных условий и типа подстилающей поверхности, в силу физических свойств магнитного поля. Как следствие, она позволяет решать навигационные задачи как на открытых пространствах, так и в помещениях [11].

3. Возможностью одновременно определять три линейных и три угловых координаты объекта.

Кроме того, бортовое оборудование может быть изготовлено по технологиям интегральных микросхем, что обуславливает его малые массогабаритные параметры и высокую технологичность.

Так как амплитуда индукции переменного магнитного поля (см. (3)) обратно пропорциональна кубу расстояния, то дальность работы навигационной системы невысока. В случае использования модуля наземного навигационного оборудования с источником магнитного поля, имеющего магнитный момент $10^4 \text{ А}\cdot\text{м}^2$, дальность увеличивается до 200 м. Для решения навигационных задач на больших расстояниях можно использовать несколько модулей, расположенных на поверхности (или под землей), создавая тем самым навигационное поле необходимой конфигурации. Например, для поля размером 1 км \times 1 км необходимо девять подробных модулей.

Навигационные системы, с использованием вращающегося переменного магнитного поля могут решать широкий круг навигационных задач [10-12], а именно: локальная навигация и посадка беспилотных летательных аппаратов как самолетного, так и вертолетного

типов; навигация внутри помещений; навигация робототехнических устройств; работа в составе систем управления и контроля перемещения персонала, техники и грузов на объектах.

Литература

1. Ориентация и навигация подвижных объектов: современные информационные технологии / под ред. Б.С. Алушина, К.К. Веремеенко, А.И. Черноморского. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 424 с.
2. Работы в интересах создания пассивных систем навигации на основе магнитного и гравитационного полей земли по материалам зарубежных источников / К.В. Епшин, Д.В. Зернюков, И.М. Комаров, Е.Л. Хицунтов // Инноватика и экспертиза. 2016. Вып. 2. С. 195-206.
3. Желамский М.В. Электромагнитное позиционирование подвижных объектов. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2013. 320 с.
4. Белоглазов И.Н., Джанджгава Г.И., Чигин Г.П. Основы навигации по геофизическим полям. М.: Наука, 1985. 328 с.
5. Яновский Б.М. Земной магнетизм. СПб.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1978. 592 с.
6. Голев И.М., Ницак Д.А., Никитина Е.А. Аспекты создания систем навигации с использованием геомагнитного поля Земли // Радиолокация, навигация, связь: XXIII междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, С. 1046-1053.
7. Долгинов А.И. Техника высоких напряжений в электроэнергетике. М.: Энергия, 1968. 464 с.
8. Song Shuang. An Electromagnetic Localization and Orientation Method Based on Rotating Magnetic Dipole / Shuang Song, ChaoHu, Baoru Li, Xiaoxiao Li, Max Q.-H. Meng // IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS. Vol. 49. № 3. 2013. Pp. 1274-1277.
9. Texas Instruments: DRV425 — высокоточный интегральный феррозондовый датчик магнитного поля DRV425 с аналоговым выходом [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ebvnews.ru/technical/texas-instruments/6986.html> (дата обращения: 10.07.2019).
10. Голев И.М., Никитина Е.А., Сергеев А.В. Использование градиентных измерений магнитного поля для задач навигации и обнаружения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 156-162.
11. Особенности работы современных систем позиционирования и навигации на закрытых территориях / Т.И. Касаткина, И.М. Голев, А.В. Душкин, Т.С. Буряк // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2019. № 1. С. 1-10.
12. Лукьянов В.В. Персональный навигационный комплекс // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. «Приборостроение». 2006. № 2. С. 87-99.

Поступила 09.09.2019; принята к публикации 16.10.2019

Информация об авторах

Голев Игорь Михайлович – д-р физ.-мат. наук, профессор, Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. проф. Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (394064, г. Воронеж, ул. Старых Большевиков, 54 «А»), e-mail: imgolev@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7487-2141>

Сергеев Александр Викторович – канд. физ.-мат. наук, инженер, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sergeev-av@bk.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4417-1480>

LOCAL NAVIGATION SYSTEM USING LOW-FREQUENCY MAGNETIC FIELD

I.M. Golev¹, A.V. Sergeev²¹Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy”, Voronezh, Russia²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article describes a local navigation system using a low-frequency magnetic field, which has a number of advantages over systems using other physical fields. The features of the magnetic, electromagnetic, acoustic fields that determine the characteristics of navigation systems are considered. It is shown that the use of a magnetic field allows one to create navigation systems with high noise immunity, independence from climatic and weather conditions and the type of underlying surface. The block diagram of the navigation system consisting of ground and onboard equipment is described. The system uses a rotating magnetic low-frequency field, which is created by a magnetic beacon — two mutually perpendicularly arranged inductors. To determine the characteristics of the magnetic field generated by the magnetic beacon at the point of location of the moving object, a three-coordinate magnetometer is used, which measures three mutually orthogonal components of the induction vector of the alternating magnetic field, whose amplitudes and phases are uniquely associated with the three linear and three angular coordinates of the object. The parameters of the layout of the navigation system module with a magnetic field frequency of 419 Hz, a magnetic beacon moment of 250 A·m² and a magnetometer sensitivity not worse than 1 nT are given. The range of the described navigation system is at least 30 meters. The errors of linear ΔR and angular measurements $\Delta\psi$ non-linearly depend on the distance R , with $R = 30$ m the value $\Delta R = 8.8$ m and $\Delta\psi = 25^\circ$, and for $R = 5$ m the value $\Delta R = 4 \cdot 10^{-3}$ m and $\Delta\psi = 0.13^\circ$. To increase the range, modules can be located on the surface (or underground) of the territory, creating a navigation field of the required configuration. Navigation systems, using a rotating alternating magnetic field, can solve the problems of local navigation and landing of unmanned aerial vehicles of both aircraft and helicopter types; indoor navigation; robotic navigation devices; work as part of management systems and control the movement of personnel, equipment and goods at the facilities

Key words: local navigation system, rotating alternating magnetic field, magnetic moment, three-coordinate sensor

References

1. Ed. Alushin B.S., Veremeenko K.K., Chernomorskuy A.I. “Orientation and navigation of mobile objects: modern information technologies” (“Oriyentatsiya i navigatsiya podvizhnykh ob”ektov: sovremennyye informatsionnyye tekhnologii”), Moscow FIZMATLIT, 2006, 424 p.
2. Epsheyn K.V., Zernyukov D.V., Komarov I.M., Khitsuntov E.L. “Works in the interests of creating passive navigation systems based on magnetic and gravitational fields of the earth based on foreign sources”, *Innovation and Expertise (Innovatika i ekspertiza)*, 2016, vol. 2, pp. 195-206.
3. Zhelamskiy M.V. “Electromagnetic positioning of moving objects” (“Elektromagnitnoye pozitsionirovaniye podvizhnykh ob”ektov”), Moscow, FIZMATLIT, 2013, 320 p.
4. Beloglazov I.N., Janjgava G.I., Chigin G.P. “Basics of navigation in geophysical fields” (“Osnovy navigatsii po geofizicheskim polyam”), Moscow, Nauka, 1985, 328 p.
5. Yanovskiy B.M. “Earth magnetism” (“Zemnoy magnetizm”), St. Petersburg, Leningrad University Publ., 1978, 592 p.
6. Golev I.M., Nitsak D.A., Nikitin E.A. “Aspects of creating navigation systems using the geomagnetic field of the Earth”, *XXIII International Scientific and Technical Conference “Radiolocation, Navigation, Communication” (Radiolokatsiya, navigatsiya, svyaz’: XXIII mezhdunar. nauch.-tekh. konf.)*, April 18-20, Voronezh, 2017, pp.1046-1053
7. Dolginov A.I. “High voltage equipment in electric power industry” (“Tekhnika vysokikh napryazheniy v elektroenergetike”), Moscow, Energiya, 1968, 464 p.
8. Song Shuang, ChaoHu, Baopu Li, Xiaoxiao Li, Max Q.-H. Meng “An electromagnetic surrounding magnetic dipole / Shuang Song, *IEEE Transactions on Magnetics*, 2013, vol. 49, no. 3, pp.1274-1277.
9. “Texas Instruments: DRV425 - DRV425 high-precision integral fluxgate magnetic field sensor with analog output”, available at: <http://www.ebvnews.ru/technical/texas-instruments/6986.html>
10. Golev I.M., Nikitina E.A., Sergeev A.V. “The use of gradient magnetic field measurements for navigation and detection tasks”, I.M. Golev, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 156-162.
11. Kasatkina T.I., Golev I.M., Dushkin A.V., Buryak T.S. “Features of the work of modern positioning and navigation systems in closed territories”, *Devices and Systems. Management, Monitoring, Diagnostics (Pribory i Sistemy. Upravleniye, Kontrol’, Diagnostika)*, 2019, no. 1, pp. 1-10.
12. Lukyanov V.V. “Personal navigation complex”, *Bulletin of N.E. Bauman MSTU (Vestnik MGTU im. N.E. Bauman)*, 2006, no. 2, pp. 87-99.

Submitted 09.09.2019; revised 16.10.2019

Information about the authors

Igor’ M. Golev, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Military Scientific Educational Center of Military-Air Forces “N.E. Zhukovsky and Ju.A. Gagarin Military-Air Academy” (54 Starykh Bol’shevikov, Voronezh 394064, Russia), e-mail: imgolev@gmail.com, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7487-2141>

Aleksandr V. Sergeev, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sergeev-av@bk.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-4417-1480>

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ ПОЛУОПРЕДЕЛЕННОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ ПОВЫШЕНИЯ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ OFDM СИСТЕМ СВЯЗИ

О.Н. Чирков, М.А. Ромащенко, С.А. Слинчук

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена задача помехоустойчивого обнаружения сигналов со спектральным эффективным частотным разделением каналов с мультиплексированием. Оптимальное обнаружение сигналов со спектральным эффективным частотным разделением каналов с мультиплексированием основано на методике наименьших квадратов и алгоритмах максимального правдоподобия. Задача обнаружения многопользовательских систем множественного доступа с кодовым разделением может быть классифицирована как целочисленная оптимизация линейного программирования. Стандартные методы оптимального обнаружения сигналов в статье преобразуются в выпуклую оптимизацию полуопределенного программирования. Предложена комбинированная методика максимально правдоподобного обнаружения SEFDM сигналов на основе полуопределенных методов программирования. Приведена упрощенная блок-схема приемника с оценкой полуопределенного программирования (ПОП) и максимально правдоподобного (МП) детектора. Выведены алгоритмы, позволяющие повысить помехоустойчивость при обнаружении сигналов со спектральным эффективным частотным разделением каналов с мультиплексированием. Проведено моделирование рассмотренных методик оптимального обнаружения сигналов с частотным разделением каналов с мультиплексированием в среде Matlab. Основной характеристикой исследования выбрана битовая ошибка приема от отношения сигнал/шум. Результаты моделирования показывают эффективность предложенных методик полуопределенного программирования в BER характеристики над существующими приемниками, основанных на снижении минимальной среднеквадратичной ошибки приема

Ключевые слова: релаксация, полуопределенное программирование, максимальное правдоподобие, помехоустойчивость, обнаружение сигнала

Введение

Системы связи высокоскоростного удаленного доступа с ортогональным частотным разделением каналов с мультиплексированием (SEFDM) показывают значительные спектральные преимущества по сравнению со схемами ортогонального частотного уплотнения каналов (OFDM), а значит, могут быть использованы в новых стандартах беспроводной связи 5G. Однако практическая реализация таких систем и задача помехоустойчивого обнаружения SEFDM сигналов являются актуальной проблемой разработчиков высокоскоростных беспроводных систем связи.

В работе рассматривается задача помехоустойчивого обнаружения сигналов со спектральным эффективным частотным разделением каналов с мультиплексированием, с использованием методики выпуклой оптимизации - полуопределенной релаксации (ПОР), основанной на алгоритмах полуопределенного программирования (ПОП).

Верду в [1] показал, что задача максимально правдоподобного (МП) обнаружения многопользовательских систем множественного доступа с кодовым разделением может быть классифицирована как целочисленная оптимизация линейного программирования. Переформулируем МП обнаружение SEFDM сигналов в полуопределенную релаксацию, воспользовавшись методикой Верду [1]. В [2] рассмотрены условия оптимальности для решения задач полуопределенного программирования. Они показали, что ПОП может достигать точной оценки максимального правдоподобия, когда уровень шума и свойства матрицы проекций поднесущих принятого SEFDM сигнала соответствуют конкретным условиям. Однако в условиях современных высокоскоростных многопользовательских стандартах передачи данных принятый сигнал сильно зашумлен [3], и разрыв релаксации, то есть разрыв между МП и оценкой ПОП, увеличивается. Для уменьшения этого явления в данной работе предложена задача оптимизации, основанная на комбинированном максимально правдоподобном алгоритме обнаружения с полуопределенным программированием МП-ПОП.

Методика максимально правдоподобного обнаружения с полуопределенным программированием

Оптимальное обнаружение сигналов со спектральным эффективным частотным разделением каналов с мультиплексированием основано на методике наименьших квадратов LS [4, 5]:

$$\min_{S \in Q^N} \|Y - MS\|^2, \quad (1)$$

где Y - $N \times 1$ вектор принятого сигнала, S - $N \times 1$ вектор передаваемых символов, которые принимают значения в дискретном алфавите Q^N , M - $N \times N$ матрица проекций поднесущих SEFDM и N – число поднесущих. Для перехода к решению целевой функции методикой полуопределенной релаксации представим элементы векторов и матрицы в формуле (1) в их реальных версиях развязки [6]:

$$\min_{S \in \{\pm 1\}^{2N}} \tilde{S}^T \tilde{M}^T \tilde{S} \tilde{M} - \tilde{Y}^T \tilde{S} \tilde{M} - \tilde{S}^T \tilde{M}^T \tilde{Y}, \quad (2)$$

где $(\cdot)^T$ обозначает транспонирование матрицы, а \tilde{Y} , \tilde{M} и \tilde{S} являются действительными версиями матриц Y , M и S соответственно.

$$\tilde{S}^T \tilde{M}^T \tilde{S} \tilde{M} - \tilde{Y}^T \tilde{S} \tilde{M} - \tilde{S}^T \tilde{M}^T \tilde{Y} = x^T L x, \quad (3)$$

где L и x - блочные матрицы, заданные:

$$L = \begin{bmatrix} \tilde{M}^T \tilde{M} & -\tilde{M}^T \tilde{Y} \\ -\tilde{Y}^T \tilde{M} & 0 \end{bmatrix}, x = \begin{bmatrix} \tilde{S} \\ \tilde{S}_{2N+1} \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Правую часть выражения (3) можно переписать в виде:

$$x^T L x = (xL^T)^T x = \langle (xL^T), x \rangle = \text{Tr}\{(xL^T), x^T\} = \text{Tr}\{xL^T x^T\}, \quad (5)$$

где $\langle \cdot \rangle$ обозначает внутреннее произведение матриц, а оператор $\text{Tr}\{\cdot\}$ обозначает след матрицы. Введем квадратную матрицу $X = x x^T$:

$$X = \begin{bmatrix} \tilde{S} \tilde{S}^T & \tilde{S} \\ \tilde{S}^T & 1 \end{bmatrix}. \quad (6)$$

Квадратная матрица X обладает следующими свойствами: ее диагональные элементы должны быть равны единице, ее собственные значения не могут быть отрицательными и, наконец, она имеет ранг 1. Следовательно, выражение (2) эквивалентно:

$$\min_{X \succeq 0} \text{Tr}\{LX\} \quad (7)$$

Оптимизация целевой функции, посредством алгоритмов полуопределенного программирования (2,7), выигрывает в эффективности у линейных методов обнаружения сигналов. Несмотря на это, ПОП оценка не является оптимальной техникой обнаружения, поскольку ее решение отклоняется от МП оценки с увеличением собственных помех системы. Чтобы уменьшить релаксационный разрыв между этими двумя решениями, была разработана новая методика, сочетающая ПОП оценку с максимально правдоподобной.

Аппроксимацию МП-ПОП можно разделить на 2 этапа. Генерируется ПОП оценка \tilde{S} первоначально переданных символов S . Далее используется принцип МП [7] в окрестности S группы \tilde{S} . Окрестность состоит из набора переданных символов, двоичное представление которых находится в пределах определенного параметра расстояния Хэмминга, ρ , из двоичного представления оценки \tilde{S} [8].

Окрестность S состоит из набора переданных векторов S , подчиняющихся соотношению:

$$d_H\{S_2, \tilde{S}_2\} \leq \rho, \quad (8)$$

где $d_H\{S_2, \tilde{S}_2\}$ представляет оператор расстояния Хэмминга, S_2 представляет собой двоичную версию S , а \tilde{S}_2 - двоичную версию оценки \tilde{S} , т.е.

$$S \in C \text{ при } d_H\{S_2, \tilde{S}_2\} \leq \rho \quad (9)$$

Блок-схема предлагаемого МП-ПОП приемника приведена на рис. 1.

Сложность предложенной методики зависит от количества вычислений ПОП оценки и МП компонентов алгоритма. Оценка полуопределенного программирования имеет полиномиальную сложность по числу поднесущих N . Вычислительная сложность алгоритма максимального правдоподобия зависит от количества выполненных сравнений с МП, т.е. от размера окрестности C .

Длина символов SEFDM определяется как $N \times \log_2 M$. Следовательно, размер окрестности C будет равен сумме всех возможных комбинаций из $N \times \log_2 M$ битов:

$$\begin{aligned} (C) &= \sum_{k=1}^{\rho} \binom{N \log_2 M}{k} + 1 = \\ &= \sum_{k=1}^{\rho} \frac{(N \log_2 M)!}{(N \log_2 M - k)! k!} + 1 \end{aligned} \quad (10)$$

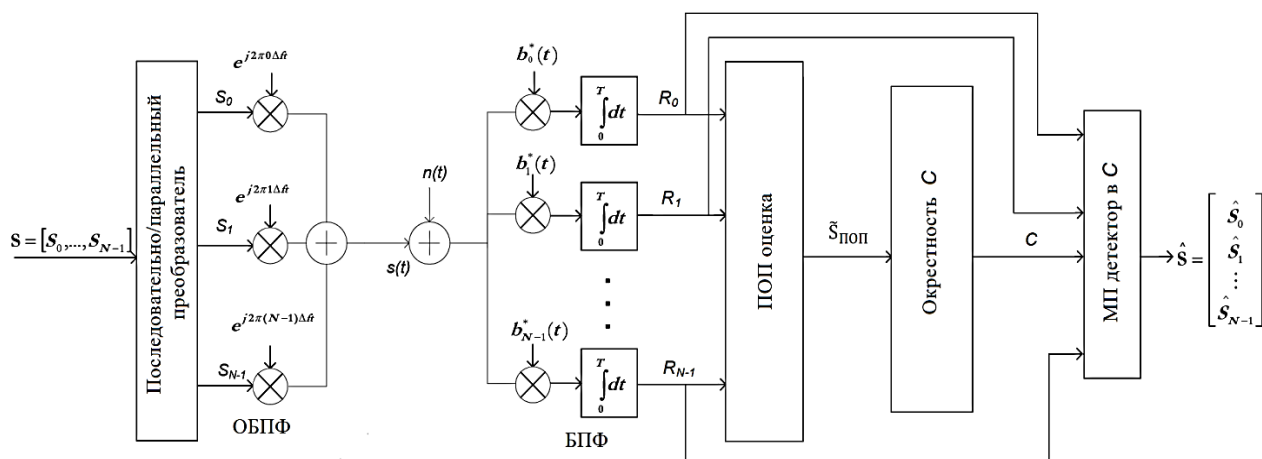


Рис. 1. Упрощенная блок-схема МП-ПОП приемника

Очевидно, что для ρ , равного единице, количество необходимых сравнений МП минимально и равно $N \times \log_2 M$. С увеличением параметра Хэмминга число сравнений по всей группе SEFDM символов увеличивается факториально.

Численное моделирование

Моделирование предложенной комбинированной методики максимально правдоподобного обнаружения с полуопределенным программированием МП-ПОП осуществлялось посредством кодирования в среде MATLAB. Был проведен ряд симуляций для различного количества несущих N SEFDM сигнала. Вид модуляции - 4-QAM [9], с нормированным частотным разделением $\alpha \in [0,5; 1]$. Диапазон отношения сигнал/шум E_b / N_0 от 0 до 8 дБ. Число итераций процесса рандомизации [2] - 10. Для сравнения эффективности предложенной методики использовались кривые производительности, соответствующие приемникам MMSE (минимальной среднеквадратичной ошибки).

На рис. 2 показана сравнительная сложность оценки полуопределенного программирования и предложенной методики комбинированной оценки МП-ПОП по сравнению с нормированным частотным разделением α . На графике значение $E_b / N_0 = 5$ дБ. Параметр расстояния Хэмминга ρ равен 1 или 2. По результатам моделирования можно отметить, что обнаружение SEFDM сигналов методикой МП-ПОП с $\rho = 1$ соизмеримо с обычной ПОП оценкой с точки зрения сложности. Однако при $\rho = 2$ время моделирования предложенного комбинированного алгоритма оказывается примерно в 100 раз больше. Следовательно, для дальнейшей практической реализации

предложенной схемы целесообразно использовать параметр Хэмминга ρ равный 1.

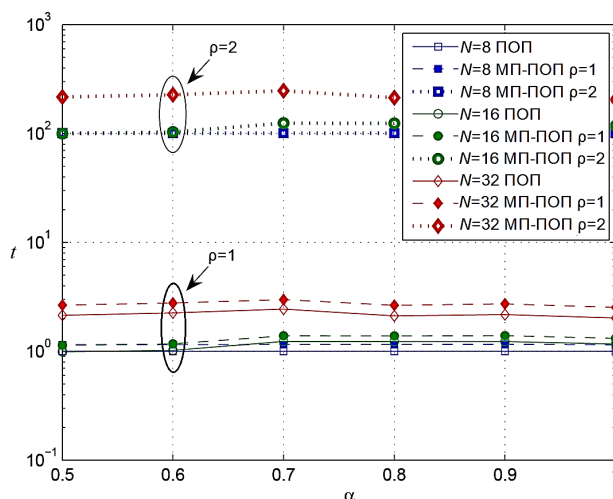


Рис. 2. Сравнение ПОП оценки и МП-ПОП методики для $N=8;16;32$ и $\rho=1;2$ от $\alpha \in [0,5; 1]$

На рис. 3 приведена характеристика битовой ошибки приема (BER) для методов обнаружения на основе ПОП и МП-ПОП. Измерения были проведены также для $N=8,16,32$ поднесущих SEFDM, для $E_b / N_0=5$ дБ.

Результаты моделирования показывают, что для малых размеров сигнала ($N = 8, 16$) и для $\alpha \geq 0,8$ обычный ПОП алгоритм близок к оптимальному. Однако при дальнейшем уменьшении α или увеличении размера SEFDM сигнала N разрыв релаксации увеличивается вследствие ухудшения состояния матрицы проекций поднесущих M , что, в свою очередь, ведет к значительному ухудшению качества обнаружения. Из графика очевидно, что разрыв релаксации с обнаружением по предложенной методике МП-ПОП намного меньше, чем в случае ПОП.

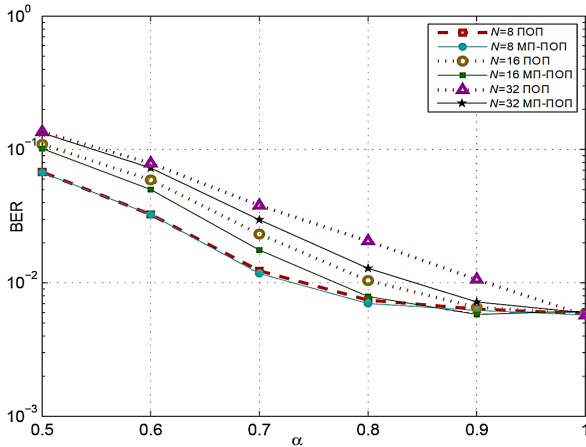


Рис. 3. BER характеристика от $\alpha \in [0,5, 1]$

На рис. 4 показаны зависимости BER от отношения сигнал/шум E_b / N_0 для ПОП и МП-ПОП оценок соответственно. Нормализованное частотное разделение поднесущих SEFDM $\alpha = 0,8$, поскольку из рис. 3 видно, что для этого значения разрыв релаксации относительно мал. Результаты моделирования показывают, что для $N = 8$ и 16 производительность оценок близка к идеальной (теоретической). С увеличением N видно, что разрыв релаксации приводит к отклонению от идеальных характеристик, однако симуляции на основе ПОП оценок значительно эффективнее, чем линейный MMSE-детектор. Также следует отметить, что для $\alpha = 0,8$ и $N = 32$ предложенный метод МП-ПОП показывает выигрыш E_b / N_0 в 1 дБ по сравнению с обнаружением посредством алгоритмов полуопределенного программирования.

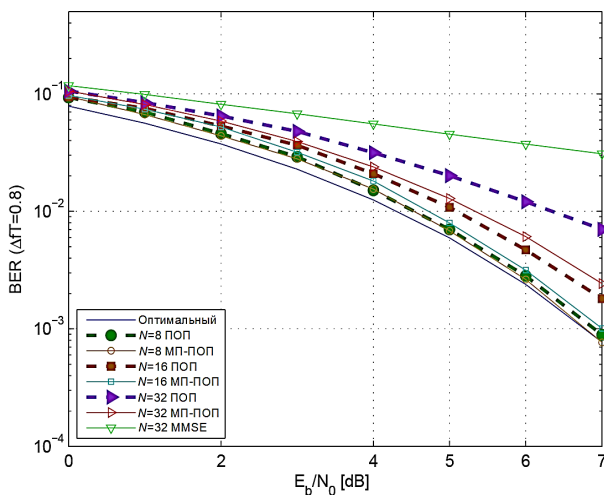


Рис. 4. BER характеристика от E_b / N_0

Заключение

В статье рассмотрены методики повышения помехоустойчивости многопользовательских высокоскоростных систем удаленного до-

ступа путем улучшения эффективности обнаружения сигналов со спектральным эффективным частотным разделением каналов с мультиплексированием. На основе полуопределенных методов релаксации предложена комбинированная методика максимально правдоподобного обнаружения SEFDM сигналов с полуопределенным программированием. Оценка основана на переформулировании задачи максимального правдоподобия в оптимизацию целевой функции методом выпуклого полуопределенного программирования. Результаты моделирования показали, что разрыв релаксации ПОП оценки от оптимального приема зависит от свойств матрицы проекций поднесущих модели системы SEFDM. По мере того, как число поднесущих SEFDM системы увеличивается или уменьшается их частотное разделение α , обнаружение сигнала ухудшаются. Для снижения релаксационного разрыва в работе предложена комбинированная схема МП-ПОП.

Результаты моделирования показывают эффективность предложенных методик полуопределенного программирования в BER характеристики над существующими приемниками, основанных на снижении минимальной среднеквадратичной ошибки приема. Для частотного разделения сигналов $\alpha = 0,8$ и числа поднесущих колебаний SEFDM системы $N = 32$ предложенный метод МП-ПОП показывает выигрыш битовой ошибки в 1 дБ по сравнению с обнаружением посредством алгоритмов полуопределенного программирования.

Литература

1. Verdu Sergio. Computational complexity of optimum multiuser detection // *Algorithmica*. 1989. Vol. 4. Pp.303–312.
2. Kisialiou M. and Luo Zhi-Quan. Performance analysis of quasi-maximumlikelihood detector based on semidefinite programming // In *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing. Proceedings (ICASSP '05)*. 2005. Vol. 3. Pp. 433–436.
3. Чирков О.Н., Ромащенко М.А., Паньчев С.Н. Оптимальные алгоритмы совместной оценки канала радиосвязи и смещения частоты при многолучевом распространении сигнала // *Радиотехника*. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 156-162.
4. Методы помехоустойчивого обнаружения сигналов в многоантенных системах MIMO с пространственным мультиплексированием / О.Н. Чирков, М.А. Ромащенко, И.С. Бобылкин, Р.Н. Щипелев, М.И. Соболев // *Надежность и качество: тр. междунар. симпозиума. Пенза: Пензенский государственный университет*, 2019. Т. 2. С. 85-87.
5. Чирков О.Н. Математическая модель взвешенной оценки канала радиосвязи для многоантенных OFDM-систем // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2019. Т. 15. № 4. С. 49-54.
6. Peng Hui Tan and L.K. Rasmussen. The application of semidefinite programming for detection in CDMA // *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*. 2001. № 19(8). Pp. 1442–1449.
7. Чирков О.Н., Ромащенко М.А., Чураков П.П. Усовершенствованный метод оценки канала с итерационным подавлением помех для многопользовательских си-

стем MIMO-OFDM // Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6(8). С. 150-155.

8. Stephen Boyd and Lieven Vandenberghe. Convex Optimization // Cambridge University Press, 2004.

9. Остроумов И.В., Ромащенко М.А., Андреева Д.С. Разработка моделей формирования фазоманипулированных сигналов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 3. С. 129-134.

Поступила 22.09.2019; принята к публикации 21.10.2019

Информация об авторах

Чирков Олег Николаевич - старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Ромащенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Слинчук Светлана Александровна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: sslinchuk@gmail.com, тел. 8-903-650-52-02

APPLICATION OF SEMI-DEFINED PROGRAMMING METHODS FOR THE SOLUTION OF THE PROBLEM OF IMPROVING INTERFERENCE STABILITY OF OFDM COMMUNICATION SYSTEMS

O.N. Chirkov, M.A. Romashchenko, S.A. Slinchuk

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in this paper, the problem of noise-tolerant detection of signals with spectral efficient frequency division multiplexing is considered. The optimal detection of signals with spectral effective frequency division multiplexing is based on the least-squares technique and maximum likelihood algorithms. The task of detecting multi-user code division multiple access systems can be classified as integer linear programming optimization. The standard methods for optimal signal detection in the article are transformed into convex optimization of semi-defined programming. A combined technique of the most probable detection of SEFDM signals based on semi-defined programming methods is proposed. A simplified block diagram of the receiver with POP estimation and MP detector is given. Algorithms are derived that make it possible to increase noise immunity when detecting signals with spectral effective frequency division multiplexing. The modeling of the considered methods for the optimal detection of signals with frequency division multiplexing with multiplexing in the Matlab environment is carried out. The main characteristic of the study was selected bit error of reception from the signal-to-noise ratio. The simulation results show the effectiveness of the proposed techniques for semi-definite programming in BER characteristics over existing receivers, based on the reduction of the minimum mean square error of reception

Key words: relaxation, semi-determined programming, maximum likelihood, noise immunity, signal detection

References

1. Verdu S. "Computational complexity of optimum multiuser detection", *Algorithmica*, 1989, vol. 4, pp. 303-312.
2. Kisialiou M., Luo Zhi-Quan "Performance analysis of quasi-maximum likelihood detector based on semi-final programming", *IEEE International Conference on Acoustics, Speech, and Signal Processing, March 2005, (ICASSP '05)*, vol. 3, pp 433-436.
3. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Panychev S.N. "Optimal algorithms for joint estimation of a radio communication channel and frequency offset during multipath signal propagation", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 156-162.
4. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Bobylkin I.S., Schipelev R.N., Sobolev M.I. "Methods of noise-tolerant signal detection in multi-antenna MIMO systems with spatial multiplexing", *Proceedings of the International Symposium: Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. mezhdunar. simpoziuma)*, Penza State University, 2019, vol. 2, pp. 85-87.
5. Chirkov O.N. "The mathematical model of a weighted estimate of the radio channel for multi-antenna OFDM systems", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 49-54.
6. Peng Hui Tan, Rasmussen L.K. "The application of semidefine programming for detection in CDMA", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, Aug 2001, no. 19 (8), pp. 1442-1449.
7. Chirkov O.N., Romashchenko M.A., Churakov P.P. "An improved method for channel estimation with iterative noise reduction for multi-user MIMO-OFDM systems", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 150-155.
8. Boyd S., Vandenberghe L. "Convex optimization", Cambridge University Press, 2004.
9. Romashchenko M.A., Ostroumov I.V., Andreeva D.S. "Development of models for generating phase-shifted signals", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 3, pp. 129-134.

Submitted 22.09.2019; revised 21.10.2019

Information about the authors

Oleg N. Chirkov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: chir_oleg@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2250-2100>

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Svetlana A. Slinchuk, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: sslinchuk@gmail.com

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ В ЗАКРЫТЫХ КОНСТРУКЦИЯХ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ МЕТОДОМ ДЛИННОЙ ЛИНИИ

В.В. Глотов, Т.С. Глотова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: на современном этапе проблема электромагнитной совместимости играет значимую роль в развитии радиоэлектронной аппаратуры. Большинство разработчиков стараются миниатюризировать электронные компоненты, из-за чего увеличиваются шансы сбоев в работе радиоэлектронных средств. Для экономии фонда рабочего времени и денежных средств вполне логично и целесообразно выявлять проблемные места печатной платы на ранних стадиях разработки. В статье представлено описание методики оценки электромагнитных характеристик печатных плат в закрытых конструкциях. Описана эффективность использования метода Transmission Line Matrix (TLM) – метод длинной линии при изучении внутриаппаратурной электромагнитной совместимости в закрытых конструкциях радиоэлектронных средств. Данный метод применяется для учета и анализа взаимодействий печатной платы и корпуса изделия на основе физических особенностей печатной платы. Описаны полученные результаты, снятые с помощью Н-зонда, сканера ближнего электромагнитного поля. Проведено сравнение результатов, полученных экспериментальным методом и методом моделирования моментов (МоМ), подтверждающих достоверность численной модели. Анализ обеспечения электромагнитной совместимости в различных радиоэлектронных устройствах показал, что при разработке любого электронного инструмента наибольшее внимание следует уделять проектированию печатных плат. Поэтому разработчику необходимо на ранних стадиях проектирования радиоэлектронных устройств определить проблемные области печатной платы

Ключевые слова: печатная плата, провод, корпус, TLM-метод, электромагнитная совместимость, ближнее поле

Введение

Быстрое развитие и использование передовых цифровых методов обработки информации и передачи в современных системах связи привели к бурному развитию радиоэлектронной технологии в нанометровый режим. Ряд сложных компонентов и устройств с высокой плотностью компоновки можно найти в современных системах связи, что создает очень сложную среду электромагнитного поля. Поэтому электромагнитная совместимость (ЭМС) [1] стала одной из основных проблем при разработке и проектировании этих систем, особенно некоторых их компонентов, таких как печатные платы (ПП) и интегральные схемы.

ПП становятся все более сложными и, как следствие, количественно определить их присутствие в ЭП становится все труднее. В диапазоне микроволновых частот ПП, имеющие размеры порядка нескольких длин волн, становятся эффективными излучателями и приемниками электромагнитной энергии. В дополнение к этому компоновка высокой плотности может вызвать значительный уровень электромагнитных помех (ЭМП) между соседними ПП, особенно когда они находятся в закрытой среде.

Эти эффекты в сочетании с понижением уровня напряжения устройства создают критически важные проблемы ЭМС для качества, целостности сигнала и излучения, восприимчивости в высокоскоростных системах нового поколения.

Дифференциальные численные методы такие, как метод конечной разности во временной области (FD-TD) [2] и метод матрицы линий передачи (TLM) [3], являются общими инструментами для вычислительного анализа многочисленных проблем в ЭМС на внутриаппаратурном уровне. Однако полноволновое трехмерное численное моделирование ЭМП вокруг ПП обычно требует значительной вычислительной мощности.

Модель была получена из экспериментального сканирования ближнего электромагнитного поля и включает в себя не только помехи, но и физические особенности ПП такие, как ее заземление и диэлектрическая проницаемость. Для некоторых геометрически небольших, но электрически важных элементов (так называемых мелких элементов) таких, как провода, прорези и вентиляционные отверстия, было разработано несколько усовершенствований для метода TLM [1]. Эти компактные модели были реализованы в виде дополнительной одномерной сети линий электропередачи, проходящей через трубу регулярных узлов, либо в

форме эквивалентной схемы с сосредоточенными элементами, позволяющей учитывать наличие мелких деталей. По сравнению с традиционным подходом эти модели приводят к значительному улучшению необходимых технических ресурсов. Аналогичная компактная модель может быть разработана для ПП, позволяющая эффективно внедрять в процедуру алгоритма TLM и точно представлять электромагнитные излучения и сопряжения ПП. Чтобы разработать такую модель, необходимо провести обширный двухполупериодный анализ, чтобы полностью охарактеризовать наличие ЭМП ПП в свободном пространстве или в закрытой среде.

Мы рассматриваем тестовую ПП, помещенную в прямоугольный корпус, как в типичную закрытую среду для печатных плат. Он состоит из L-образной микрополосковой дорожки на подложке FR4 [3]. Исследовано влияние излучений этой простой структуры ПП с проводным вводом и концевыми зондами на концах для распределения электромагнитного поля внутри корпуса. Для проведения этого исследования используется метод TLM, а результаты моделирования сравниваются с эталонными результатами, основанными на измерениях и методе моментов (MoM) моделирования.

Процедура моделирования

В методе TLM трехмерное распределение электромагнитного поля в структуре ПП и в корпусе моделируется путем заполнения пространства сетью линий передачи и возбуждения определенной компоненты поля в сетке источником напряжения, размещенным на зонде возбуждения. Электромагнитные свойства среды в подложке и корпусе моделируются с помощью сети взаимосвязанных узлов.

Типичной структурой узлов является симметричный конденсированный узел, который показан на рис. 1. Для работы с большим шагом по времени используется гибридный симметричный конденсированный узел [3]. Эффективный вычислительный алгоритм рассеивающих свойств, основанный на обеспечении непрерывности электрических и магнитных полей, при сохранении заряда и магнитного потока, реализован для ускорения процесса моделирования. Для точного моделирования этой проблемы применяются более мелкие сетки внутри подложки и ячейки с произвольным соотношением сторон, подходящие для моделирования

определенных геометрических элементов таких, как микрополосковая линия. Границы произвольного коэффициента отражения корпусов моделируются TLM-методом путем замыкания линий связи на краю проблемного пространства с соответствующей нагрузкой.

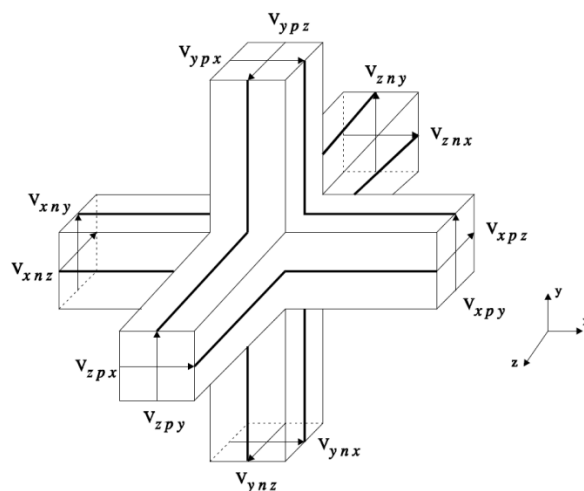


Рис. 1. Компактная проводная модель TLM

В проволочном узле TLM проволочные структуры рассматриваются как новые элементы, которые увеличивают емкость и индуктивность среды, в которой они размещены. Таким образом, соответствующая проводная сеть должна быть вставлена поверх существующей сети TLM для моделирования требуемого дефицита электромагнитных параметров среды. Чтобы достичь согласованности с остальной частью модели, TLM-методу необходимо формирование проводных сетей с использованием линий связи и шлейфов, как показано на рис. 2 с характеристическими импедансами, обозначенными как Z_{wy} и Z_{wsy} , соответственно. Сеть TLM должна быть разработана для имитации связи между электромагнитным полем и проводом.

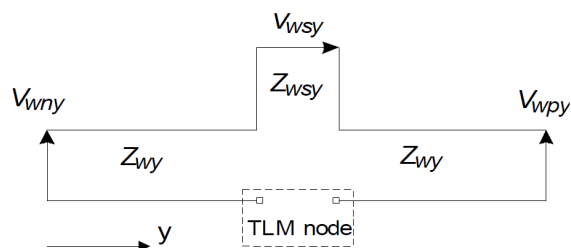


Рис. 2. Проводная сеть

Для моделирования проводных элементов сегменты проводной сети проходят через центр узла TLM. В этом случае связь между полем и

проводом совпадает с событием рассеяния в узле, что делает вычисление матрицы рассеяния для узлов, содержащих сегмент проводной сети, более сложным. В связи с этим в [2] предложен подход, который решает взаимодействие между произвольной сложной проводной сетью и произвольными сложными узлами TLM.

Одиночный столбец узлов TLM, через который проходит проводник, может использоваться для приблизительного формирования фиктивного цилиндра, который представляет емкость и индуктивность провода на единицу длины.

Следуя экспериментальному подходу, в котором в качестве зонда можно использовать внутренний проводник коаксиальной направляющей, можно провести числовую характеристику электромагнитного поля внутри полости путем введения проводных портов на границе раздела между проволочными зондами и стенками корпуса.

Результаты моделирования

Представленные здесь результаты иллюстрируют возможности метода TLM для определения эмиссии базовой структуры ПП в виде испытательной платы с микрополосковым нанесением на диэлектрическую подложку. Поэтому в целях проверки числовые результаты TLM на этой ПП сравниваются с эталонными результатами, основанными на методе моментов.

Основной тестовой платой является L-образная микрополосковая дорожка шириной 2 мм ($l_1 = 40$ мм, $l_2 = 20$ мм) на одной стороне платы $x \times y \times z = (80 \times 50 \times 1,5)$ мм³, изготовленная из подложки FR4 с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 4.5$. Геометрия ПП показана на рис. 3.

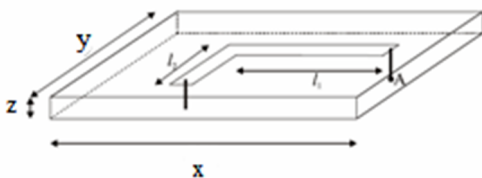


Рис. 3. Геометрия тестовой ПП

ПП для тестирования была установлена на нижней части корпуса в виде прямоугольной металлической коробки размером $a \times b \times c = (284 \times 204 \times 75)$ мм³. ПП питается от внешних радиочастотных сигналов через провод (радиусом 0,5 мм), расположенный на одном конце микрополосковой дорожки (точка А). Данная

структура позволяет точно моделировать корпус через коэффициенты отражения границ, в то время как провод подачи и концевые провода моделируются с помощью компактной проволочной модели с применением генератора и нагрузок в проводах.

Когда ПП находится внутри корпуса, особый интерес представляет исследование поведения вблизи резонансных частот корпуса. Поэтому проанализированы численные результаты резонансных частот при моделировании структуры замкнутой среды. На рис. 4 представлены резонансные частоты, полученные из вертикального электрического поля (E_z), собранного в точке 35 мм над ПП. В табл. 1 представлены значения резонансов, полученные с использованием моделирования TLM-метода и эталонных значений, найденными экспериментально путем наблюдения величины поля внутри корпуса.

Разница в частоте составляет менее 10 МГц и может быть вызвана тем, что корпус, используемый для измерений, имеет функции, не включенные в числовую модель такие, как зонд, используемый для контроля электромагнитного поля, и отверстие, выполненное на одной стенке корпуса [5].

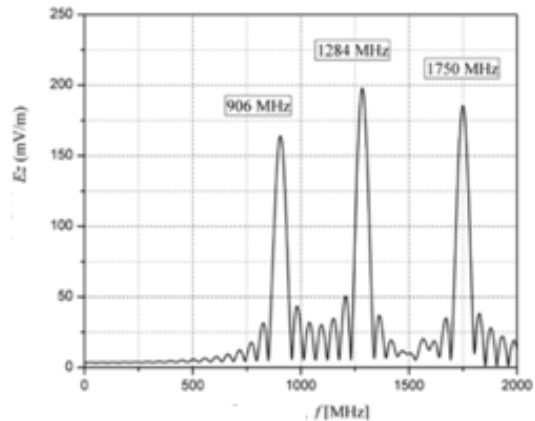


Рис. 4. Численные результаты TLM-метода с тестовой платой

Таблица 1
Сравнение измеренных и численных результатов

Частота (МГц)	Эталонные измерения	TLM-метод
Закрытая конструкция	900	906
	1290	1284
	1740	1750

Поэтому в табл. 2 сравниваются значения резонансов, когда, во-первых, зонды, использу-

емые для мониторинга электромагнитного поля, а затем отверстие, включаются в модель TLM вместе с корпусом. Отверстие с размерами $a_1 \times b_1 = (60 \times 10) \text{ мм}^2$ размещается на верхней стенке корпуса над ПП в соответствие с экспериментальной установкой.

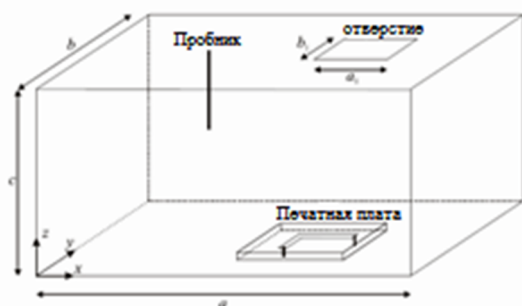


Рис. 5. Модель базовой ПП в корпусе с пробником и отверстием

Таблица 2

Сравнение численных результатов для закрытой ПП при изменении структуры

Структура	Резонансная частота (МГц)	Электрическое поле (mV/m)
ПП в закрытой конструкции	906	164
	1284	197
	1750	186
ПП в закрытой конструкции с пробником	897	295
	1280	421
	1738	368
ПП в закрытой конструкции с отверстием	905	163
	1284	196
	1749	185

Полученные численные результаты иллюстрируют сдвиг в резонансной частоте, когда включены дополнительные характеристики. Наличие зонда вызывает разницу в частоте около 10 МГц, а также приводит к изменению пиковой величины поля, поскольку он становится вторичным излучателем электромагнитного поля. С другой стороны, влияние отверстия минимально, потому что его размерность намного меньше, чем объем корпуса.

Однако наличие отверстия может увеличить уровень электромагнитного поля, излучаемого за пределы корпуса.

На рис. 6 показаны полные диаграммы E_z на плоскости 35 мм над дном корпуса, полученные с помощью моделирования TLM-метода на резонансных частотах, иллюстрирующие распределение электромагнитного поля

корпуса из-за физического присутствия ПП и контрольного зонда. Результаты, полученные при моделировании корпуса TLM-методом, очень хорошо согласуются с соответствующими результатами, основанными на моделировании МоМ [5]. Полученные схемы подтверждают, что моделирование диэлектрика и дорожки ПП, а также проводных зондов имеет большое значение для моделирования замкнутой среды.

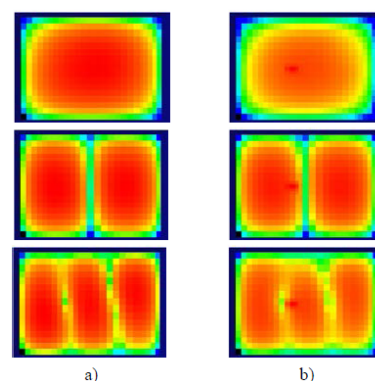


Рис. 6. Карты напряженности E_z на резонансных частотах, полученных TLM-методом при моделировании печатной платы в корпусе: а – без датчика; б – с контрольным датчиком

Заключение

Исходя из того, что одним из основных интересов в испытаниях на ЭМС является интенсивность и распределение излучаемых полей от испытуемого оборудования, здесь представлены результаты излучений от базовой структуры ПП. Метод, применяемый для определения излучений от ПП с использованием модели, основан на моделировании TLM-метода испытательной платы в закрытых средах для учета взаимодействия между физическим присутствием печатной платы и корпуса. В соответствии с представленными результатами, основанными на примерах базовых тестовых ПП в закрытых средах, установлено, что метод TLM очень удобен для моделирования ПП.

Литература

1. Ромашенко М.А. Методы оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2014. 36 с.
2. Макаров О.Ю., Муратов А.В., Ромашенко М.А. Методы обеспечения внутриаппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств: монография. Воронеж: ФГБОУ ВПО «Воронежский государственный технический университет», 2013. 234 с.

3. Ромашенко М. А. Основные подходы к решению задач внутрикомпонентной электромагнитной совмести-

мости // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 6. С. 67-70.

Поступила 16.08.2019; принята к публикации 10.10.2019

Информация об авторах

Глотов Вадим Валерьевич - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

Глотова Татьяна Сергеевна - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9122-8988>

MODELING OF PRINTED CIRCUIT BOARDS IN THE CLOSED DESIGN OF ELECTRONIC PRODUCTS BY THE METHOD OF LONG LINE

V.V. Glotov, T.S. Glotova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: at the present stage, the problem of electromagnetic compatibility plays a significant role in the development of electronic equipment. Most developers try to miniaturize electronic components, which increases the chances of malfunctioning electronic equipment. To save the fund of working time and money, it is quite logical and advisable to identify problem areas of the printed circuit board in the early stages of development. The article describes the methodology for assessing the electromagnetic characteristics of printed circuit boards in enclosed structures. The efficiency of using the Transmission Line Matrix (TLM) method is described - a long line method for studying intra-equipment electromagnetic compatibility in enclosed structures of electronic devices. This method is used to record and analyze the interactions of the printed circuit board and the product body, based on the physical features of the printed circuit board. The results obtained using the H-probe, a scanner of the near electromagnetic field are described. The results obtained by the experimental method and the moment modeling method (MoM), which confirm the reliability of the numerical model, are compared. The analysis of ensuring electromagnetic compatibility in various electronic devices showed that in the development of any electronic instrument, the greatest attention should be paid to the design of printed circuit boards. Therefore, the developer needs to identify problem areas of the printed circuit board in the early stages of the design of electronic devices

Key words: printed circuit board, wire, enclosure, TLM method, electromagnetic compatibility, near field

References

1. Romashchenko M.A. "Methods for the optimal design of electronic structures with regard to electromagnetic compatibility and noise immunity" ("Metody optimal'nogo proyektirovaniya konstruktsiy radioelektronnykh sredstv s uchetom elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti"), Dr. tech. sciences dis., Voronezh, 2014, 36 p.
2. Makarov O.Yu., Muratov A.V., Romashchenko M.A. "Methods for ensuring intra-equipment electromagnetic compatibility and noise immunity in electronic equipment designs" ("Metody obespecheniya vnutriapparturnoy elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti v konstruktsiyakh elektronnykh sredstv"), monograph, Voronezh State Technical University, 2013, 234 p.
3. Romashchenko M.A. "Basic approaches to solving the problems of intra-component electromagnetic compatibility", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 6, pp. 67-70.

Submitted 16.08.2019; revised 10.10.2019

Information about the authors

Vadim V. Glotov, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vadik-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5129-4369>

Tat'yana S. Glotova, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: tatyana-livny@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9122-8988>

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ ЗОНДОВАЯ СТАНЦИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ КРИСТАЛЛОВ ДИОДОВ И ТРАНЗИСТОРОВ

В.В. Кондусов¹, В.А. Кондусов²

¹ООО «Импри», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описано устройство, относящееся к измерительной технике и представляющее собой установку для испытания электрических параметров кристаллов диодов и транзисторов при их производстве. Как один из видов контроля зондовые измерения позволяют оценить основные параметры разрабатываемых полупроводниковых приборов перед их корпусированием в процессе разбраковки и сортировки по параметрам. Благодаря этому удаётся избежать дополнительных затрат и снизить себестоимость выпускаемой продукции. Для проведения указанных измерений необходима зондовая станция, которая позволит соединить исследуемый прибор с измерительным устройством и обеспечить целостность и достоверность полученных результатов. Описаны проблемы, возникающие при измерениях электрических параметров кристаллов диодов и транзисторов на предприятиях радиоэлектронной промышленности. Представлены недостатки современных решений для тестирования кристаллов радиоэлектронных приборов. Показаны пути решения данных проблем и недостатков на примере разработанной установки. Описанная установка является составной частью программно-аппаратного комплекса и обеспечивает проверку электрических параметров чипов, отделённых от общей полупроводниковой пластины (заготовки), а также позволяет определить, какие из изготовленных кристаллов исправны и могут быть использованы в дальнейшей работе по монтажу их в корпус. Описаны инновационные решения при проектировании игольчатого контакта и пневматической подачи, описан процесс разработки конструкции, алгоритм работы установки и назначение основных органов управления

Ключевые слова: зондовое тестирование, кристаллы диодов и транзисторов, прецизионный манипулятор, гидравлическое демпфирование, монокристаллический материал, рабочий цикл

Введение

Испытания электрических параметров кристаллов диодов и транзисторов при их производстве являются важнейшей частью технологического процесса. Результаты таких испытаний служат для определения их эксплуатационных возможностей, являются исходным материалом при расчете схем, а с другой стороны, позволяют косвенным образом судить о внутренних свойствах и особенностях приборов [1, 2].

Актуальность проблемы

Наиболее востребованной процедура предварительной отбраковки и измерения нормированных характеристик отдельных кристаллов перед корпусированием является на предприятиях военной и космической промышленности, т.к. процесс производства керамических и(или) содержащих драгметаллы приборов сопряжён с большими финансовыми и трудовыми затратами. Процесс предварительного тестирования и отбраковки позволяет избежать трат на изготовление заведомо неисправного или не подходящего по нормированным характеристикам изделия [5]. Также достаточно серьёзный интерес представляет воз-

можность использования данной установки для подбора кристаллов силовых (IGBT, MOSFET и т.д.) транзисторов или диодов (FRD и т.д.) по электрическим характеристикам с целью их точного согласования при параллельном соединении в силовых модулях. А так как силовые кристаллы, предназначенные для использования в силовых модулях, практически никогда не собираются в кристаллы индивидуально, требования к качеству отбраковки кристаллов серьёзно увеличиваются, т.к. при сборке силового модуля с одним бракованным кристаллом теряются не только дорогостоящий корпус, но и годные кристаллы.

Впервые задача по разработке, изготовлению и введению в технологический процесс зондовой станции испытания кристаллов была поставлена перед специалистами ООО «Импри» в 2015 году. Заказчиком на разработку и изготовление зондовой установки выступило АО «ВЗПП-С», г. Воронеж. Специалистами Заказчика была проведена работа по исследованию рынка зондовых станций и выявлена невозможность либо высокая сложность и цена введения в технологический процесс серийно выпускаемых установок.

До 2015 года работы по зондовому тестированию кристаллов перед сборкой на АО «ВЗПП-С» проводились на морально устаревшей зондовой станции выпуска 1980-х го-

дов. Имелись ощутимые проблемы с точностью установки зондов, с качеством контактирования и скоростью замены кристаллов при поточном измерении. Все манипуляции выполнялись вручную, что требовало, вдобавок к вышеописанным проблемам, физических усилий при работе на установке этого типа.

Исследование рынка

При исследовании рынка выяснилось, что современные многозондовые станции не удовлетворяют требованиям скорости совмещения зондов с контактными площадками, оперативной регулировки силы прижима зондов к контактному площадкам, автоматизированного подъема-опускания столика с контактными устройствами. В основном, зондовые установки, выпускаемые современной промышленностью, служат:

- для выборочных исследований параметров кристаллов, что сказывается на скорости выполнения измерений. Данные установки оказываются неприменимы в условиях серийного производства, для выполнения задачи отбраковки и измерений нормированных характеристик всех кристаллов серии [3];

- для полностью автоматизированного измерения кристаллов, располагающихся на пластине. Данные станции не подходят для выполнения вышеописанных требований тестирования и отбраковки, т.к. брак и изменение параметров кристаллов зачастую происходят при последующей порезке пластины. Также в станциях данного типа проблематично, а зачастую и просто невозможно выполнить требования по четырехточечным измерениям некоторых нормированных характеристик, измеряемых при использовании приборов в военной и космической отрасли [4].

Постановка задачи

Специалистами АО «ВЗПП-С» было представлено следующие техническое задание на разработку и изготовлению зондовой станции:

1. Разработать и изготовить зондовую станцию, предназначенную для обеспечения электрического контакта цепей измерителя с контактными площадками кристаллов для выявления бракованных по электрическим параметрам кристаллов и обеспечения сборки годными по электрическим параметрам кристаллами диодов и транзисторов.

2. Размеры кристаллов, подлежащие контролю на данной установке:

- габаритные размеры: от 1.3x1.3 мм до 11.0x11.0 мм;

- толщина кристаллов: 200-450 мкм;

- контактные площадки: от 300 мкм.

3. Требуемые характеристики установки:

- 3.1. Изделие в едином корпусе.

- 3.2. Обеспечить проверку электрических параметров кристаллов, находящихся по одному (выкладываются на столик контактного устройства).

- 3.3. Способ контактирования – пневматический подъем столика с контактными устройствами до рабочего положения с регулировкой усилия контактирования.

- 3.4. Способ совмещения зондов с контактными площадками – перемещение держателей зондов ручными манипуляторами (рукоятками) по координатам X, Y.

4. Предусмотреть возможность оперативной регулировки силы прижима зондов к контактными площадками.

5. Пневматический подъем-опускание столика с контактными устройствами на 10 мм с помощью кнопок управления.

6. Контактная площадка столика должна состоять из двух областей: токовой и потенциальной.

7. Демпфирование движения столика с контактными устройствами в начальном и конечном положениях.

8. Возможность изменения настроек регулирования скорости и усилия подъема-опускания столика с контактными устройствами в начальном и конечном положениях.

9. Механическая регулировка по оси Z с микрометрической подачей (10 мм) столика с контактными устройствами в начальном и конечном положениях.

10. Наличие на столике позиционирующих упоров положения кристалла. Возможно использование вакуумного фиксатора кристалла.

11. Механическая регулировка зондов по оси Z – не менее 1,5 мм, по осям X и Y – не менее 4 мм.

12. Один из зондов (на исток) должен быть сдвоенным из двух не контактирующих друг с другом зондов.

13. Установка зондовая должна быть совместима с измерителем 14ТКС 100-001.

14. Требуемые характеристики микроскопа установки: кратность увеличения – х(16-32); расстояние между объективом и изделием не менее 60 мм (возможно согласование характеристик и типа применяемого микроскопа).

15. Питание установки от однофазной сети переменного тока напряжением 220 В, частотой 50 Гц.

16. Питание от сети сжатого воздуха под давлением 0.5-1.5 МПа (5-15 кг с/см²).

17. Габариты установки не более 800x600x750 мм.

Методы решения задачи и описание разработанного оборудования

На основании технического задания была разработана, изготовлена и введена в эксплуатацию установка АЗУ-01 (начало эксплуатации – 2015 г.). Позднее, после оценки эффективности и надежности зондовой станции, заказчиком была заказана разработка и изготовление модифицированной версии. Новая разработка получила наименование АЗУ-01М, установка дополнена вакуумным прижимом кристалла с собственным источником вакуума и модулем гидравлического демпфирования столика в верхнем положении. Также выполнена полная переработка электрической составляющей, в ходе которой был достигнут высокий уровень помехозащищенности и очень низкий уровень собственного электромагнитного шума.

Установка АЗУ-01М была введена в эксплуатацию на АО «ВЗПП-С» в декабре 2018 года. Установка за время эксплуатации показала себя с наилучшей стороны: высочайший уровень комфорта работы, производительность, удобство подстройки и технического обслуживания.

На установку установлен гарантийный срок в течение 1 года с момента начала эксплуатации и срок службы до капитального технического обслуживания – 6 лет. После проведения капитального технического обслуживания установка может быть вновь введена в технологический процесс производства. Для обеспечения бесперебойной работы в течении всего срока эксплуатации, производителем установлено требование к техническому обслуживанию с периодичностью 6 месяцев. Техническое обслуживание, благодаря оригинальным техническим решениям, проводится с минимальным простоем оборудования и обычно занимает не более 1 часа.

Разработанная установка является составной частью программно-аппаратного комплекса и предназначена для испытания электрических параметров кристаллов диодов и транзисторов, находящихся по одному (выкладываются на столик контактного устройства), в частности, для обеспечения электрического контакта цепей измерителя с контактными площадками

кристаллов, выявления бракованных и обеспечения сборки годными по электрическим параметрам кристаллами диодов и транзисторов. Также, имеется возможность производить измерения параметров корпусных изделий.

В установке используется способ контактирования, заключающийся в поочередно повторяющихся для каждого кристалла операциях подъема предметного столика в положение контроля, контроля электрических параметров кристалла, опускание предметного столика в нижнее положение, замены кристалла. Конструктивно установка выполнена в настольном варианте. Общий вид установки представлен на рис. 1 и 2.

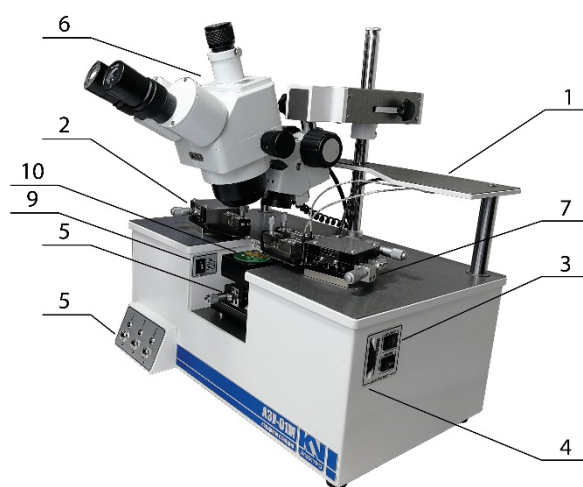


Рис. 1. Общий вид установки

На общем виде установки (рис. 1) показаны: рабочая полка (1), контактирующее устройство с однозондовым прецизионным манипулятором (2), выключатель осветителя микроскопа (3), ручка регулировки осветителя (4), пульт управления и задания режимов работы установки (5), микроскоп МСП-1 (6), контактирующее устройство с двухзондовым прецизионным манипулятором (7), предметный столик (8) с ручным микрометрическим перемещением по высоте, переключатель режима работы вакуумного насоса (9). На рабочем столике укреплена плата (10) с электрическими контактами и фиксаторами для проверяемых кристаллов.

На пульте управления (5) расположены кнопки «↓» «↑» «↑↓», используемые для управления перемещением рабочего столика установки, формирования сигнала автоматического измерения.

При нажатии на кнопку «↑» происходит перемещение рабочего столика в верхнее положение и фиксация в этом положении. При нажатии на кнопку «↓» происходит перемеще-

ние рабочего столика в нижнее положение с фиксацией в этом положении. При нажатии на кнопку « \updownarrow » происходит перемещение столика в верхнее положение и фиксация в этом положении на время заданной длительности контроля параметров кристалла с последующим перемещением в нижнее положение с фиксацией в этом положении. О текущем положении столика информируют соответствующие индикаторы, размещенные над кнопками управления.

При режиме работы вакуума «АВТ» (поз.б, рис. 2) он включается в течение времени, когда предметный столик находится в любом положении, отличном от нижнего положения. В режиме работы вакуума «ВКЛ» - вакуум включен постоянно, в режиме работы «ВЫКЛ» - вакуум выключен.

На рис. 3 представлена задняя часть установки.

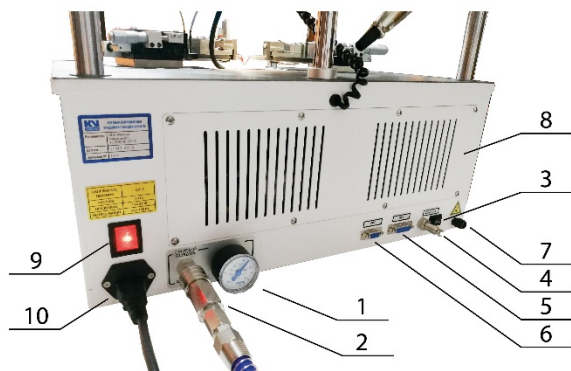


Рис. 2. Задняя сторона установки

На задней стороне установки (рис. 3) размещены: манометр сети сжатого воздуха (1), штуцер для подключения к сети сжатого воздуха (2), переключатель режима работы ножного контактора управления предметным столиком (3), разъем кабеля связи с ножным контактором (4), разъем для подключения кабеля связи с измерительным устройством (5), резервный информационный разъем (6), клемма заземления корпуса установки (7), съемная крышка корпуса (8), выключатель питания (9), разъем кабеля сетевого питания с отсеком для предохранителя (10).

В установке АЗУ-01М применены инновационные решения в амортизации игольчатого контакта, что позволяет контактными иглами (зондами) при прижиме перемещаться вертикально (рис. 3, 4). Данное решение практически полностью исключает сдвиг кристалла при прижиме и контактировании.

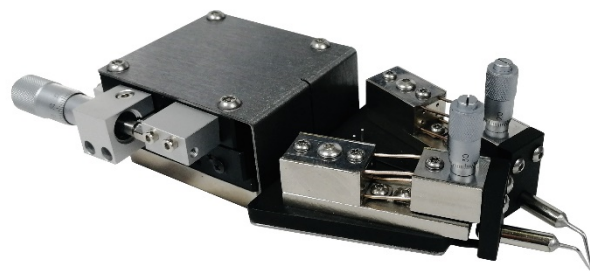


Рис. 3. Сдвоенный зонд

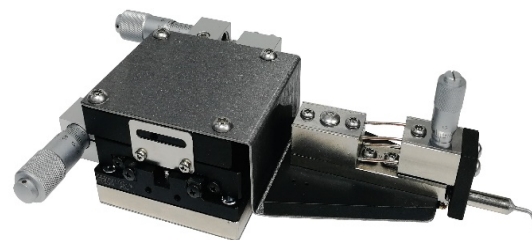


Рис. 4. Одинарный зонд

В контактирующих устройствах предусмотрены индивидуальные настройки каждого зонда на контактные площадки структур, выполняемые по трем координатам: параллельно оси контактирующего устройства в горизонтальной плоскости — вращением ручек микрометрической регулировки с максимальным диапазоном перемещения 12,0 мм; перпендикулярно оси контактирующего устройства в горизонтальной плоскости — вращением ручек микрометрической регулировки с максимальным диапазоном перемещения 12,0 мм; по высоте — вращением ручки микрометрической регулировки с максимальным диапазоном перемещения 3,0 мм.

Метод подпружинивания и удерживания зондовой иглы в вертикальной плоскости основан на использовании стержней из монокристаллического материала, обладающего высоким модулем упругости и низким коэффициентом остаточной деформации.

Для обеспечения регулирования положения зондовой иглы по координатам X, Y, Z использованы микрометрические головки с шагом резьбы 500 мкм, что позволяет добиться разрешения устройства <math>< 5 \text{ мкм}</math>.

Также разработана пневматическая подача столика с кристаллом. Реализовано гидравлическое демпфирование столика в верхнем положении, что позволяет добиться высокой плавности хода и скорости перемещения рабочего столика в верхнее положение с минимальным воздействием сил инерции на кристалл, что очень важно при потоковом измерении с большой скоростью.

Разработана программа управления, позволяющая автоматизировать процесс тестирования. Контроль и управление установкой мо-

жет быть произведен извне, используя разъем контроля и управления, расположенный на задней части прибора.

На рис. 5 представлен график рабочего цикла установки.

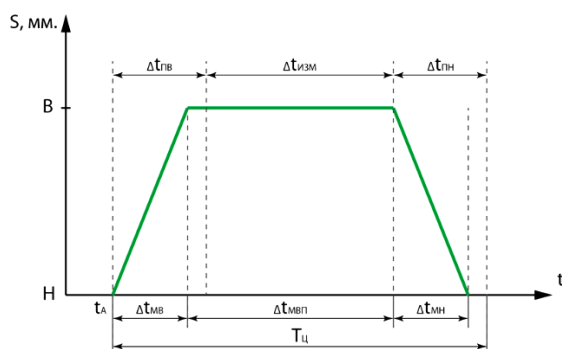


Рис. 5. График рабочего цикла установки

На рис. 5 показаны обозначения: S – перемещение рабочего столика по оси Z , мм; B , H – верхнее и нижнее положения столика соответственно; $\Delta t_{ПВ}$ – время программной задержки на отработку механического перемещения рабочего столика в верхнее положение; $\Delta t_{МВ}$ – время механического перемещения рабочего столика из нижнего положения (H) в верхнее (B); t_A – момент подачи сигнала от контроллера на перемещение столика из положения « H » в положение « B »; $\Delta t_{ИЗМ}$ – время программной задержки на нахождение столика в верхнем положении (для измерения электрических параметров прибора); $\Delta t_{МВП}$ – время фактического нахождение столика в верхнем положении; $\Delta t_{ПН}$ – время программной задержки на отработку механического перемещения рабочего столика в нижнее положение; $\Delta t_{МН}$ – время механического перемещения рабочего столика из верхнего положения (B) в нижнее (H).

При разработке корпуса и кинематических частей установки использована система твердотельного моделирования. Управляющая программа для микроконтроллера разрабатывалась с помощью интегрированной платформы разработки (IDP) для проектирования и отладки приложений на базе микроконтроллеров Atmel ARM® Cortex™-M и AVR® - Atmel Studio. Исходный код программы написан на языке программирования C++. Перед запуском в производство был проведен всесторонний компьютерный анализ и моделирование работоспособности и соответствия узлов. Моделирование осуществлено в отношении всех частей установки, как корпуса и кинематической части установки, так и программного обеспечения. Моделирование электрической схемы и работы микроконтроллера осуществлено в САПР автоматизированного проектирования электронных средств.

Заключение

В ходе выполнения работ по выполнению технического задания была разработана зондовая станция для потокового тестирования кристаллов полупроводниковых приборов, полностью отвечающая, а по некоторым характеристикам превосходящая требования технического задания. Использованы инновационные методы перемещения рабочих элементов. Достигнут высокий уровень надежности и помехозащищенности вкупе со сверхнизким уровнем собственных электромагнитных шумов. Получены положительные отзывы о работе в линии производства полупроводниковых приборов, осуществляемого на базе АО «ВЗПП-С» для нужд как гражданского, так и военного и космического секторов полупроводниковой и радиоэлектронной промышленности.

Использование разработанной установки позволяет решить проблемы скорости коммутации, удобства использования, производить тестирование как малыми, так и большими токами, а также устранить многие другие проблемы при тестировании кристаллов в современном радиоэлектронном производстве.

Предприятиями радиоэлектронной промышленности может быть востребована модификация данной установки в плане автоматизации выравнивания и фиксации кристалла, автоматизированной подачи кристалла в зону тестирования. Также, может быть интересна модификация для тестирования полупроводниковых пластин с автоматизированным перемещением пластины, с сохранением преимуществ и скорости одиночного тестирования, представленного в данной установке.

В России отсутствуют предприятия, работающие над разработкой и изготовлением установок данного типа, в основном, ассортимент зондовых установок представлен продукцией производства Белоруссии, Китая, США, а установки с такой скоростью тестирования одиночных кристаллов не представлены вообще, что делает установку уникальной.

Российские предприятия радио- и микроэлектронной промышленности имеют большую заинтересованность в качественной специализированной технике, в которой учтена индивидуальная специфика производства. При разработке и производстве установок данного типа возможен выпуск оборудования под индивидуальные требования заказчика. Из вышеописанного можно сделать вывод, что данное направление в разработке и изготовлении оборудования для радио- и микроэлектронной промышленности является очень перспективным.

Литература

1. Аронов В.Л., Федотов Я.А. Испытание и исследование полупроводниковых приборов: учеб. пособие для специальностей полупроводниковой техники вузов. М.: Высш. шк., 1975. 325 с.
2. Кондусов В.В., Кондусов В.А. Автоматизированный тестовый контроль параметров полупроводниковых приборов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 6. С. 104-106.

3. Ручная зондовая станция MPI TS50 // ООО «ТБС»: [сайт]. URL: http://www.tbs-semi.ru/equipment/zondovye_izmereniya/mpi_ts50/ (дата обращения: 07.07.2019).
4. Автоматическая зондовая станция UF200R // ООО «Совтест АТЕ»: [сайт]. URL: <https://sovtest-ate.com/equipment/avtomaticheskaya-zondovaya-stantsiya-uf200r/> (дата обращения: 07.07.2019).
5. Васильев И. Зондовые измерения параметров полупроводников: комплексные решения // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. 2017. № 2 (00162). С. 72-77.

Поступила 08.07.2019; принята к публикации 10.10.2019

Информация об авторах

Кондусов Виктор Васильевич – генеральный директор, главный инженер ООО «Импри» (394005, Россия, г. Воронеж, ул. 60 Армии, 35, оф. 25), e-mail: kondusov_vv@mail.ru, тел. +7-920-451-07-70
Кондусов Василий Ананьевич – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kva.vrn@mail.ru, тел. +7-920-409-59-95

AUTOMATED PROBE STATION FOR TESTING THE ELECTRIC PARAMETERS OF THE CRYSTALS AND DIODE OF TRANSISTORS

V.V. Kondusov¹, V.A. Kondusov²

¹LLC “Impri”, Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the described device relates to the measurement technique and presents a setup for testing the electric parameters of the crystals and diode manufacture. As one of the types of control, probe measurements allow us to estimate the main parameters of the developed semiconductor devices prior to their encapsulation in the process of developing and sorting parameters. Through this, it is possible to avoid additional costs and to reduce production costs. To conduct these measurements, a probe station is required, which will connect the studied device with the measuring device and ensure the integrity and validity of the obtained results. The article describes problems that occur when measuring the electric parameters of the crystals and diode on the enterprises of electronic industry. It presents shortcomings of modern solutions for testing crystals electronic devices. It shows the solutions to these problems and shortcomings on the example of the developed installation. The described installation is an integral part of the hardware-software complex and provides verification of electrical parameters of the chips separated from a common semiconductor wafer (workpiece), and also allows one to determine which of the crystals are made serviceable and can be used in further work on mounting them in the housing. The work gives innovative solutions in the design of needle contact and air supply, describes the process of design, algorithm of operation and purpose of the main controls

Key words: probe testing, crystals and diodes of transistors, precision positioner, hydraulic damping, monocrystalline material, duty cycle

References

1. Aronov V., Fedotov Ya.A. “Testing and researching semiconductor devices” [“Ispytanie i issledovanie poluprovodnikovyykh priborov”], Vysshaya shkola, 1975, 325 p.
2. Kondusov V.V., Kondusov V.A. “Automated test control of parameters of semiconductor devices” [“Avtomatizirovannyi testovyy kontrol' parametrov poluprovodnikovyykh priborov”], *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 6, pp. 104-106.
3. “Manual probe station MPI TS50” (“Ruchnaya zondovaya stantsiya MPI TS50”), available at: http://www.tbs-semi.ru/equipment/zondovye_izmereniya/mpi_ts50/
4. “Automatic probe station UF200R” (“Avtomaticheskaya zondovaya stantsiya UF200R”), available at: <https://sovtest-ate.com/equipment/avtomaticheskaya-zondovaya-stantsiya-uf200r/>
5. Vasil'ev I. “Probe measurements of the parameters of semiconductors: integrated solutions” [“Zondovye izmereniya parametrov poluprovodnikov: kompleksnye resheniya”], *Electronics: Science, Technology, Business (Elektronika: Nauka, Tekhnologiya, Biznes)*, 2017, no. 2 (00162), pp. 72-77.

Submitted 08.07.2019; revised 10.10.2019

Information about the authors

Viktor V. Kondusov, General Director, chief engineer of LLC “Impri” (35-25 60 Armii, Voronezh 394005, Russia), e-mail: kondusov_vv@mail.ru, tel. +7-920-451-07-70
Vasilii A. Kondusov, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kva.vrn@mail.ru, tel. +7-920-409-59-95

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.5.015

УДК 621.9.047

ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ОТВЕРСТИЙ В ФИЛЬТРАХ РАКЕТНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

А.Ю. Рязанцев, Е.В. Смоленцев, В.Г. Грицюк, А.А. Широкожухова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены методы получения отверстий в металлических фильтрах различных типоразмеров. Раскрыта специфика применения электроэрозионного и электронно-лучевого методов обработки при прошивке отверстий. Представлены пути обеспечения качества поверхностного слоя деталей в процессе изготовления фильтрующих элементов жидкостных ракетных двигателей. Проведенный анализ существующих комбинированных методов обработки металлических фильтров позволяет сделать вывод о том, что максимальная производительность достигается при использовании электронно-лучевой обработки для прошивки отверстий. Исходя из того, что фактическое микроструктурное состояние контактных поверхностей является основным условием формирования характеристик фильтрующих элементов, определены методы исследования. В соответствии с рассматриваемыми в работе методами обработки выполнены исследования параметров шероховатости изготовленных отверстий на образце-имитаторе и гидравлических характеристик фильтрующего элемента при постоянном расходе рабочей среды. При проведении испытаний в качестве испытательной среды использовалась техническая вода. Исходя из расчетных параметров пролива фильтра и полученных фактических результатов, сделан вывод о том, что для обеспечения оптимальных гидравлических характеристик фильтрующих элементов электроэрозионный способ обработки отверстий является более предпочтительным. Результаты работы способствуют повышению технологичности изготовления изделий новых поколений техники, что актуально для машиностроения

Ключевые слова: качество, фильтрующий элемент, поверхностный слой, двигатель, шероховатость, деталь

Введение

Требования к качеству изготавливаемых деталей авиационной и космической техники новых поколений постоянно растут. Формы составных элементов современной наукоемкой продукции усложняются, происходит увеличение удельной нагрузки на конструкцию изделий. Под действием наследственных явлений происходит изменение формы деталей, возникают погрешности, способные вызвать нарушение качества всего изделия. Для повышения качества деталей требуется создание механизма управления параметрами технологической системы, проектирование технологических процессов, позволяющих обеспечить получение и сохранение заданной геометрической формы и качественного поверхностного слоя окончательно изготовленного изделия [1].

Значительная часть авиационно-космической техники работает в условиях нестационарного воздействия знакопеременных нагрузок, повышенных и пониженных температур, газообразного и жидкого водорода. Изделия работают при критических многоцикловых

нагрузениях в условиях кавитации и пульсации высоких рабочих давлений, в агрессивных коррозионных средах, в том числе - водородо-содержащих. Установлено, что при больших нестационарных перепадах температур, учитывая наличие жидкого водорода и газообразной среды, поверхность детали, граничащая с рабочей средой, не должна иметь местных нарушений поверхностного слоя, так как в случае попадания водорода происходит интенсивное наводороживание и охрупчивание материала, а за счет известного эффекта Ребиндера возникают высокие растягивающие напряжения, резко снижающие работоспособность детали при высоких знакопеременных нагрузках. Учитывая экстремальные условия работы фильтрующих элементов в жидкостных ракетных двигателях, качественное изготовление фильтров оказывает непосредственное влияние на функционирование изделия [2]. Принимая во внимание химические свойства компонентов топлива, применяемых в жидкостных ракетных двигателях, широкое распространение получили металлические фильтры, в большинстве случаев представляющие собой изделия из металлических листовых материалов с большим количеством отверстий малого диаметра (рис. 1).



Рис. 1. Общий вид фильтров

Постановка задачи

Поиск перспективных методов изготовления изделий ракетно-космической техники является приоритетным направлением развития технологий в области машиностроения. Высокая точность, качество поверхности окончательно изготовленного изделия и другие технологические показатели являются первостепенными при внедрении наукоемкой технологии [3]. Фильтрующая способность при неизменности гидравлического сопротивления магистралей является основным параметром фильтрующего элемента. Качество поверхностного слоя изготовленных отверстий в фильтре является непосредственным фактором обеспечения гидравлического сопротивления магистралей. Фильтр должен быть прочным при воздействии усилия от перепада давления, а также стойким к ударным и вибрационным нагрузкам. В процессе изготовления деталей должна обеспечиваться чистота наружных поверхностей и внутренних полостей. В аэрокосмической отрасли проверка работоспособности фильтров выполняется проведением испытаний на прочность в нормальных условиях рабочей средой (водой), при заданном расходе и противодавлении за определенный промежуток времени. При этом обеспечивается требуемый перепад давления (разница давлений на входе и выходе изделия). Также подтверждение работоспособности фильтрующего элемента возможно проведением испытаний водой на заданном расходе, при этом должно быть обеспечено определенное давление на входе в изделие. В результате испытаний не должна быть нарушена целостность фильтрующего элемента. Контроль вышеуказанного требования осуществляется в большинстве случаев визуально с применением фотодокументирования. Решение задачи по повышению качества получаемого слоя на изготавливаемой детали и зависящих от него экс-

плуатационных показателей изделия базируется, прежде всего, на управлении состоянием остаточных напряжений, наклепа, шероховатости. Качественный поверхностный слой обеспечивает стабилизацию процесса работы готового изделия, повысит технологические показатели системы.

Наукоемкие технологии изготовления фильтрующих элементов

За последние годы при изготовлении фильтров наибольшее распространение получили электрохимические и электрофизические методы обработки материалов. Электроэрозионные, эрозионно-химические и электрохимические методы прошивки отверстий в листовых металлических заготовках позволяют изготавливать фильтры с малыми диаметрами отверстий и достаточно большой площадью обработки за короткий промежуток времени.

Высокоскоростные комбинированные способы обработки с использованием электронно-лучевых, электрохимических и эрозионно-химических методов являются оптимальными при получении отверстий различной геометрической формы в фильтрах, изготавливаемых для новых изделий авиационной и космической техники из специальных материалов, в частности, из нержавеющей стали [4].

Электронно-лучевой метод прошивки отверстий малого диаметра позволяет обеспечить требуемые факторы технологической системы. Обработка производится при помощи электронной пушки и основана на использовании кинетической энергии электронов, движущихся с большой скоростью, для направленного удаления материала нагревом, плавлением и испарением. Данный метод является высокоскоростным и обладает большой производительностью, которая зависит от мощности луча, размеров участка, на котором он фокусируется, физико-механических свойств материала и толщины изделия. Метод эрозионно-химической прошивки позволяет снизить время изготовления фильтров с толщиной стенки 1,5-2 мм в несколько раз и добиться минимальных значений уклона боковых поверхностей отверстий.

При электронно-лучевой обработке невозможно избежать выброса расплавленного материала, который оседает на боковых поверхностях отверстий и заготовки, что может сказаться на гидравлических и пневматических характеристиках фильтров, поэтому требуется при-

менение комбинированных методов с использованием электрохимической или механической обработки.

Для получения фильтрующих элементов наиболее перспективными видами обработки являются высокопроизводительные комбинированные методы: электронно-лучевые, эрозионно-химические и электрохимические, дающие возможность обеспечить необходимые конструкторские требования к детали, такие как масса и габариты. При этом метод обработки должен обеспечивать химический состав обрабатываемых материалов.

Проведенный анализ существующих комбинированных методов обработки металлических фильтров позволяет сделать вывод о том, что при использовании для прошивки отверстий электронно-лучевой обработки достигается максимальная производительность, при этом обеспечивается качественный поверхностный слой обрабатываемой заготовки [5]. Возможно использование комбинированной размерной обработки для изготовления изделий авиации, космонавтики и других отраслей промышленности, в том числе деталей и сборочных единиц сложной геометрической формы.

Методы исследований

Одним из основных условий формирования характеристик фильтрующих элементов, предъявляемых при гидравлических испытаниях, и соответствия пропускной способности фильтров заданным значениям является фактическое микроструктурное состояние контактных поверхностей, поверхностных слоев. В первую очередь необходимо исследование влияния шероховатости на характеристики фильтра, так как данный критерий является одним из основных параметров, характеризующих состояние поверхностного слоя, и непосредственно обеспечивает заданную пропускную способность (пролив) фильтра. Для проведения экспериментов необходимо изготовление опытного образца с заданными прочностными свойствами и проведение гидравлических испытаний для подтверждения характеристик изделия [6].

Учитывая типовые конструкции фильтрующих элементов в двигателестроении, в качестве образцов-имитаторов были изготовлены элементы фильтра в соответствии с рисунком 2 из материала 12Х18Н10Т, в качестве заготовки использовался круг диаметром 25 мм.

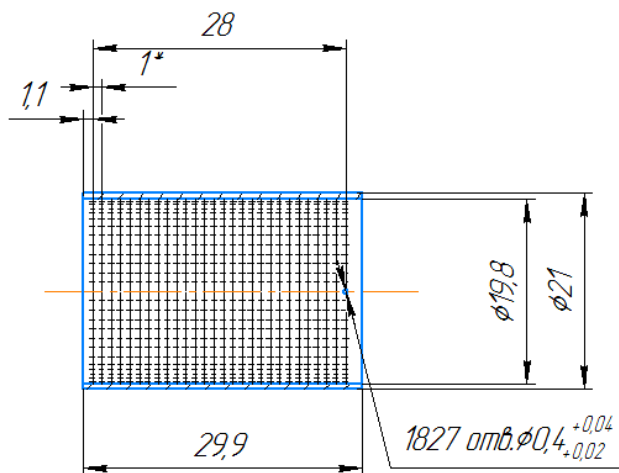


Рис. 2. Эскиз образца-имитатора

С целью обеспечения пропускной способности фильтра отверстия на образцах выполнялись с предельным отклонением $\pm 0,05$ мм между осями двух любых отверстий. Для оценки влияния способа изготовления отверстий на гидравлические характеристики фильтрующих элементов на двух образцах-имитаторах отверстия выполнялись электронно-лучевым и электроэрозионным способами соответственно (рис. 3).



Рис. 3. Сектор фильтрующего элемента изготовленного электроэрозионным способом

Механический и электрохимические способы для прошивки отверстий не применялись, так как их использование нецелесообразно для рассматриваемой типовой конструкции фильтров с маленькими диаметрами и большим количеством изготавливаемых отверстий [7].

Для замера шероховатости поверхностного слоя отверстий в фильтрах использовался мобильный прибор MahrSurf M300 (Германия) со специальными опорными щупами. Обработка результатов замера проводилась с помощью специального программного обеспечения с распечаткой протоколов (рис. 4).

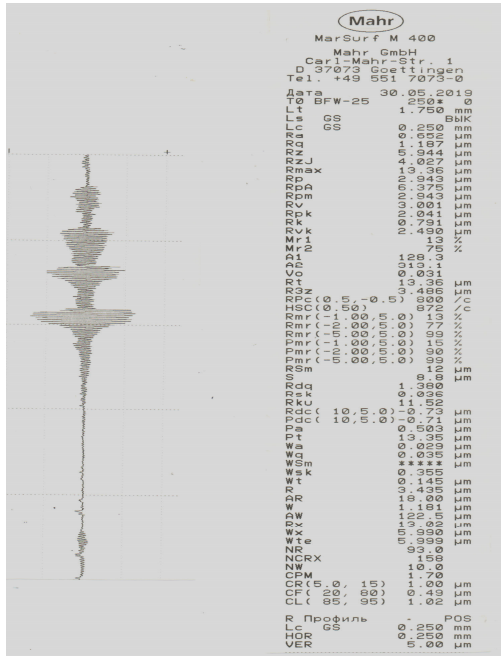


Рис. 4. Протокол замера шероховатости поверхности отверстий фильтрующего элемента, полученных электронно-лучевой обработкой

Замер шероховатости поверхностного слоя отверстий производился на базовой длине 1 мм контактным способом несколько раз, с целью подтверждения достоверности полученных значений. Результаты приведены в таблице.

Замеры фактической величины шероховатости поверхностного слоя отверстий

№ п/п	Величина шероховатости отверстий Ra, мкм	
	Электронно-лучевой способ	Электроэрозионный способ
1	0,652	0,6
2	0,652	0,61
3	0,651	0,6

После изготовления отверстий электронно-лучевой обработкой нагар вокруг отверстий удалялся химическим способом. Выполнялась наружная и внутренняя электрополировка поверхностей образца с целью обеспечения проливочных характеристик.

Проверочные испытания выполнялись на специальном проливочном стенде с использованием технологической оснастки в виде корпуса, внутрь которого помещался изготовленный фильтрующий элемент (образец-имитатор). В качестве рабочей среды использовалась вода. Согласно расчетным гидравлическим характеристикам при проливе фильтра с заданным по-

стоянным расходом 1,096 кг/с величина давления на входе в фильтр должна быть равна 0,6 кгс/см². Замер давления ($P_{вх}$) на входе в фильтрующий элемент производился 4 раза в течение 30 секунд. Фактические результаты гидравлических испытаний представлены на рис. 5.

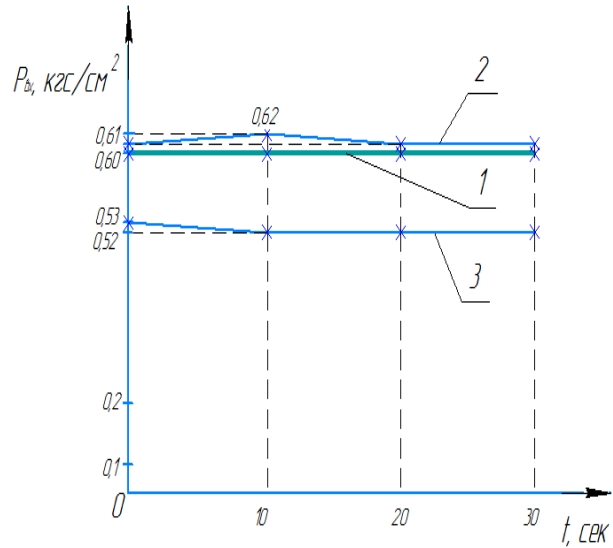


Рис. 5. Фактические параметры давления на входе в фильтр
1 – расчетное значение гидравлических характеристик фильтра,
2 – значения пролива фильтра, изготовленного с применением электроэрозионного способа,
3 – значение пролива фильтра, изготовленного с применением электронно-лучевого способа

Исходя из расчетных параметров пролива и полученных результатов, представленных на рис. 5, можно сделать заключение, что образец фильтрующего элемента с отверстиями, изготовленными электроэрозионным способом, обеспечил более качественные проливочные характеристики фильтра по отношению к образцу с отверстиями, изготовленными с применением электронно-лучевой обработки.

Выводы

Основной функцией фильтров в жидкостном ракетном двигателе является защита внутренних полостей от посторонних частиц и предметов. Пропускная способность фильтрующих элементов изделий обеспечивает работоспособность двигателя, следовательно, фильтр является критичным элементом конструкции [8].

Электроэрозионный и электронно-лучевой методы обработки являются оптимальными при изготовлении металлических фильтров с большим количеством отверстий, так как обладают

высокой производительностью и обеспечивают минимальную погрешность полученных отверстий. Выполненные исследования позволяют сделать вывод, что для обеспечения оптимальных гидравлических характеристик фильтрующих элементов электроэрозионный способ обработки отверстий является более предпочтительным по отношению к электронно-лучевому. Результаты работы способствуют повышению технологичности изготовления изделий новых поколений техники, что актуально для машиностроения.

Литература

1. Кириллов О.Н., Рязанцев А.Ю. Расширение области использования комбинированных процессов обработки непрофилированным электродом-щеткой // Вестник Рыбинского авиационного технического университета имени А.П. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 15-20.
2. Совершенствование технологической подготовки машиностроительного производства / А.Ю. Рязанцев, А.А.

Болдырев, А.И. Болдырев, В.Г. Грицюк // Современные технологии производства в машиностроении: сб. науч. тр. Воронеж: ООО «Издательско-полиграфический центр «Научная книга», 2019. Ч. 12. С. 56-62.

3. Справочник металлста. В 5 т. / под ред. С.А. Чернавского, В.Ф. Решикова. М.: Машиностроение, 1976. Т. 1. 768 с.

4. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. В 2-х т. / под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высш. шк., 1983. Т. 2. 208 с.

5. Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools // Solid State Phenomena. 2018. Vol. 284. Pp. 281-288.

6. Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts surfaces // MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018), 2018. Vol. 224.

7. Smolentsev V.P., Safonov S.V., Zolotarev V.V. Processing of channels in heat engine filters // Procedia Engineering. 2016. Vol. 150. Pp. 1124-1130.

8. Taylor E.J., Inman M. Electrochemical Surface Finishing // The Electrochemical Society Interface, Fall. 2014. Vol. 23. Issue 3. Pp. 57-61.

Поступила 11.06.2019; принята к публикации 08.10.2019

Информация об авторах

Рязанцев Александр Юрьевич - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: ryazantsev86@rambler.ru, тел. 89042126560

Смоленцев Евгений Владиславович - д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, тел. 89107464075

Грицюк Василий Григорьевич - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, тел. 89036517268

Широкожухова Анна Александровна – аспирант кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: anamyagkih@yandex.ru, тел. 89204555959

QUALITY ASSURANCE OF THE PART SURFACE LAYER WHEN DRILLING HOLES IN THE ROCKET ENGINES FILTERS

A.Yu. Ryazantsev, E.V. Smolentsev, V.G. Gritsyuk, A.A. Shirokozhukhova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article consider the methods for producing holes in metal filters of various sizes. It discloses the specifics of the application of electro erosive and electron-beam processing methods for piercing holes. It presents the ways to ensure the quality of the surface layer of parts in the manufacturing process of filter elements of liquid rocket engines. The analysis of existing combined methods of processing metal filters allows us to conclude that maximum productivity is achieved when using electron beam processing for flashing holes. Based on the fact that the actual microstructural state of the contact surfaces is the main condition for the formation of the characteristics of the filter elements, research methods are determined. In accordance with the processing methods considered in the work, studies were performed of the roughness parameters of the holes made on the sample simulator and the hydraulic characteristics of the filter element at a constant flow rate of the working medium. During testing, process water was used as a test medium. Based on the calculated parameters of the filter strait and the actual results obtained, it was concluded that, to ensure optimal hydraulic characteristics of the filter elements, the electro erosive method of processing holes is more preferable. The results of the work contribute to improving the manufacturability of products of new generations of technology, which is important for engineering

Key words: quality, filter element, surface layer, engine, roughness, part

References

1. Kirillov O.N., Ryazantsev A.Yu. "Expansion of the use of combined processes of treatment with non-profiled electrode-brush", *Bulletin of Rybinsk Aviation Technical University Named after A.P. Solovyov (Vestnik Rybinskogo Aviatzionnogo Tekhnicheskogo Universiteta Imeni A.P. Solov'eva)*, 2017, no. 2 (41), pp. 15-20.
2. Ryazantsev A.Yu., Boldyrev A.A., Boldyrev A.I., Gritsyuk V.G. "Improvement of technological preparation of machine-building production", *Collection of Scientific Works "Modern production technologies in mechanical engineering" (Sovremennye tekhnologii proizvodstva v mashinostroenii: sb. nauch. tr.)*, 2019, vol. 12, pp. 56-62.
3. Chernavskiy S.A., Radicova V.F. ed. "Metalist's guide. In 5 vols" ("Spravochnik metallista. V 5 t.") Moscow, Mashinostroenie, 1976, vol. 1, 768 p.
4. Smolentsev V.P. ed. "Electrophysical and electrochemical methods of materials processing. In 2 vols" ("Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov. V 2-kh t."), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, vol. 2, 208 p.
5. Fomin A.A., Gusev V.G., Sattarova Z.G. "Geometrical errors of surfaces milled with convex and concave profile tools", *Solid State Phenomena*, 2018, vol. 284, pp. 281-288.
6. Ryazantsev A.Yu., Yukhnevich S.S. "Use of combined methods of treatment to obtain artificial roughness on the parts surfaces", *MATEC Web of Conferences: International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment (ICMTMTE 2018)*, 2018, vol. 224, 01058
7. Smolentsev V.P., Safonov S.V., Zolotarev V.V. "Processing of channels in heat engine filters", *Procedia Engineering*, 2016, vol. 150, pp. 1124-1130.
8. Taylor E.J., Inman M. "Electrochemical surface finishing", *The Electrochemical Society Interface, Fall*, 2014, vol. 23, issue 3, pp. 57-61.

Submitted 11.06.2019; revised 08.10.2019

Information about the authors

Aleksandr Yu. Ryazantsev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: ryazantsev86@rambler.ru, tel. 89042126560

Evgeniy V. Smolentsev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, tel. 89107464075

Vasiliy G. Gritsyuk, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com, tel. 89036517268

Anna A. Shirokzhukhova, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: anamyagkih@yandex.ru, tel. 89204555959

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОМБИНИРОВАННОГО ЭЛЕКТРОДА-ИНСТРУМЕНТА ДЛЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ В УСЛОВИЯХ ЕДИНИЧНОГО И ОПЫТНОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.П. Суворов, А.В. Кузовкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в данной статье рассматривается проблема проектирования, изготовления и эксплуатации комбинированного электрода-инструмента (ЭИ) в условиях единичного и опытного производства, которая заключается в высоких технологических и экономических затратах на изготовление такого ЭИ сопоставимых, а иногда и превышающих стоимость изготовления детали с применением традиционных процессов резания. Объектами, рассматриваемыми в работе, являются комбинированные электроды-инструменты, проектируемые и изготавливаемые на основе современных цифровых технологий и методов 3D-печати и применяемые для обработки сложнопрофильных поверхностей в условиях единичного и экспериментального производств. Показано, что сочетание параметрического проектирования на основе цифровых моделей и изготовления методами аддитивных технологий основы комбинированного инструмента с последующим приданием ему токопроводящих свойств позволяет существенно расширить область электрохимической обработки за счет возможности финишной размерной обработки сложнопрофильных поверхностей с высокой степенью кривизны. Экспериментальные исследования показали, что апробированный в условиях единичного и экспериментального производств комбинированный инструмент в дальнейшем может быть изготовлен для нужд серийного производства. Материалы статьи представляют практическую ценность для предприятий машиностроительного комплекса в связи с упрощением процесса изготовления электрода-инструмента для электрических методов обработки и его удешевлением

Ключевые слова: электрод-инструмент, электрохимическая обработка, аддитивные технологии

Введение

Современные изделия машиностроительного комплекса характеризуются наличием деталей, часть из которых в силу различных причин (конструктивные особенности, прочностные и массогабаритные характеристики, показатели эргономики и эстетики) имеют сложную форму рабочих поверхностей [2, 3].

Получение поверхностей с высокой степенью кривизны традиционными методами формообразования часто вызывает определенные технологические трудности (сложная траектория движения инструмента, необходимость создания специального инструмента и т.п.) или неоправданно высокие материально-экономические затраты (приобретение специализированного оборудования с ЧПУ; разработка конструкции, технологии и изготовление специального режущего, формирующего или иного инструмента и т.д.).

Подобные проблемы возникают не только в связи со сложностью геометрии обрабатываемых поверхностей, но и, как правило, с высокими конструктивными требованиями по точности и качеству поверхностного слоя детали.

Одним из способов решения данной проблемы является применение электрических

бесконтактных методов обработки (электрохимическая (ЭХО) и электроэрозионная (ЭЭО) обработки) фасонным электродом-инструментом (ЭИ). В этом случае сложная геометрия готовой детали обеспечивается за счет применения подобной рабочей поверхности ЭИ, которой, в свою очередь, придается простейшие поступательное или вращательное движения. Таким образом, снимается вопрос об использовании дорогостоящих исполнительных приводов, обрабатывающих сложную геометрию при традиционной механообработке [1, 2].

Однако, в этом случае, возникает проблема создания собственно рабочей поверхности ЭИ, которая должна иметь сложную геометрию профиля, повторяющую профиль обрабатываемой детали с учетом изменения ее размеров на величину межэлектродного зазора (МЭЗ). Часто технологические и экономические затраты на изготовление такого ЭИ сопоставимы, а иногда и превышают стоимость изготовления детали с применением традиционных процессов резания. В связи с изложенным, возникает проблемное противоречие, которое можно сформулировать следующим образом: существуют и достаточно хорошо изученные методы электрообработки, есть оборудование и апробированные технологические режимы процессов бесконтактного формообразования, однако технологическая сложность изготовле-

ния фасонного ЭИ и их высокая стоимость существенно ограничивают область технологического применения этих процессов в производстве, особенно на этапе опытно-конструкторской проработки пилотных образцов техники.

Решение данной проблемы авторам представляется возможным на основе комплексного подхода:

- необходимо разработать методологию проектирования ЭИ за счет применения современных систем автоматизированного проектирования (САПР), когда рабочая поверхность инструмента формируется как поверхность, подобная профилю обрабатываемой детали с учетом величины МЭЗ, рабочего поступательного/поступательно-вращательного движения ЭИ, толщины токопроводящего покрытия исходя из электрических параметров процесса обработки и т.д. [4];

- предложить, апробировать и дать технологические рекомендации по процессу изготовления ЭИ из нетокопроводящих материалов методами быстрого прототипирования с последующим нанесением токопроводящего слоя, толщина которого гарантировано обеспечивает протекание электрических процессов в МЭЗ и приемлемую стойкость ЭИ [5].

Подобный подход позволяет применить комбинированные ЭИ для электрических методов обработки, характеризующихся широким разнообразием формы рабочей поверхности, адаптированной к геометрии обрабатываемой детали, не ограниченной степенью кривизны, низкой себестоимостью и практической возможностью создания индивидуального инструмента для единичного и опытного производства [6].

Механизм проектирования комбинированного ЭИ на основе построения цифрового прототипа

Все известные схемы изготовления и применения ЭИ для электрических методов обработки базируются на том факте, что ЭИ должен быть выполнен целиком из токопроводящего материала [1, 2]. Это приводит к тому, что при проектировании такого инструмента конструкторы и технологи ограничены в выборе методов обработки такого материала исключительно методами лезвийной или иной механической обработки. Авторами же предлагается использовать комбинированный процесс изготовления инструмента, когда на первоначальном этапе

методами 3D-печати создается нетокопроводящая основа комбинированного ЭИ, при этом не ограниченная рамками механообработки по степени кривизны и сложности формы, а в дальнейшем производится придание токопроводящих свойств рабочей поверхности ЭИ за счет металлизации с толщиной покрытия, достаточной для протекания процессов в МЭЗ и обеспечивающей стойкость инструмента на уровне стойкости ЭИ, выполненных из токопроводящих материалов. Подобный подход возможен при разработке системы параметрического проектирования на основе существующей САПР Autodesk Inventor, которая представляет собой встроенный модуль [7]. Данный модуль позволяет по цифровой модели обрабатываемой детали построить цифровую модель будущего комбинированного ЭИ, размеры которого учитывают не только величину МЭЗ, но и толщину токопроводящего покрытия, рассчитанную исходя из режимов электрообработки с применением данного ЭИ.

Первый этап построения цифровой модели может быть проиллюстрирован рис. 1, который представляет собой уточнение методик проектирования инструмента для электрических методов, описанных в литературе [1, 2]. Авторы рассматривают уточненную методику на примере создания цифровой модели для случая электрохимической обработки.

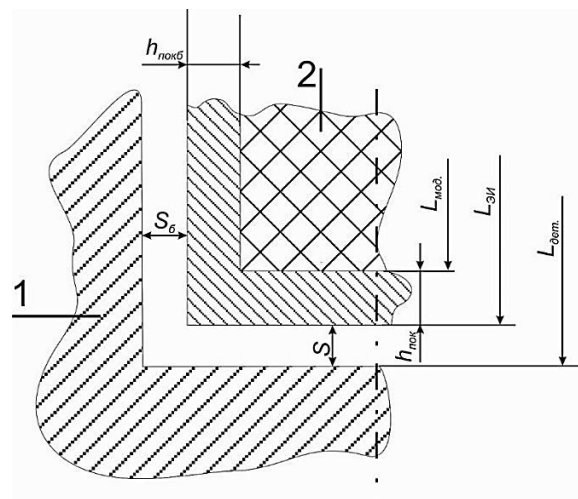


Рис. 1. Схема для проектирования комбинированного ЭИ

На рис. 1 представлено: 1 – обрабатываемая деталь; 2 – комбинированный инструмент; $L_{дет}$ – характерный размер детали; $L_{ЭИ}$ – характерный размер комбинированного ЭИ; $L_{мод}$ – характерный размер модели после 3D-печати, но перед нанесением токопроводящего покрытия; $h_{пок}$ – толщина токопроводящего покрытия

на торцевой части; $h_{\text{покб}}$ – толщина токопроводящего покрытия на боковой поверхности ЭИ; S – устоявшийся торцевой межэлектродный промежуток; S_6 – боковой межэлектродный промежуток (МЭП) при ЭХО полости. В связи с этим характерный размер модели комбинированного ЭИ, который необходим для осуществления 3D-печати, может быть определен по выражению:

$$L_{\text{мод}} = L_{\text{дет}} - S - h_{\text{пок}}, \quad (1)$$

В выражении 1 величина $L_{\text{дет}}$ является заданным параметром, $h_{\text{пок}}$ – толщина токопроводящего покрытия будет определена исходя из электрических параметров обработки. Величина устоявшегося торцевого зазора определяется в соответствии с [1]:

$$S = \frac{\eta \cdot \epsilon \cdot \chi \cdot U}{\rho \cdot v_u}, \quad (2)$$

где η – выход по току, который зависит от обрабатываемого материала, плотности тока, скорости электролита и т.д. (конкретные данные приведены в [1, 2]);

ϵ – электрохимический эквивалент обрабатываемого материала;

χ – удельная проводимость, электролита;

U – рабочее напряжение на электродах;

ρ – плотность материала детали;

v_u – скорость подачи ЭИ для поддержания $S = \text{const}$.

Толщина токопроводящего покрытия $h_{\text{пок}}$ определяется исходя из подводимой электрической мощности, которая в соответствии с рекомендациями [7, 9] определяется в зависимости от электрических и технологических параметров ЭХО.

Современные источники питания электрохимического оборудования обеспечивают плотность технологического тока в диапазоне от 0,4 до 1 А/мм². Этого достаточно для реализации практически всех технологических схем. Величина постоянного технологического тока I_m в соответствии с рекомендациями [7], определяется по выражению:

$$I_m = F_0 \frac{\chi(U - \Delta U)}{S}, \quad (3)$$

где F_0 – площадь обрабатываемой поверхности, мм;

ΔU – потеря напряжения в МЭП, по данным [78] она составляет ~5В. Учитывая, что для большинства материалов и схем обработки $U = 10-18$ В, выражение (3) принимает вид:

$$I_m = F_0 \frac{\chi^{0,7} U}{S}. \quad (4)$$

Также известно [7], что величина технологического тока связана с предельной плотностью тока $J_{\text{пр}}$, которая может быть передана

через проводник с определенной площадью поперечного сечения:

$$I_m = S_{\text{покр}} \cdot J_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где $J_{\text{пр}}$ – предельная плотность тока (А/мм²), которая может быть передана через покрытие и зависящая от материала покрытия;

$S_{\text{покр}}$ – площадь поперечного сечения (мм²), которая определяется из схем на рис. 1 и 2.

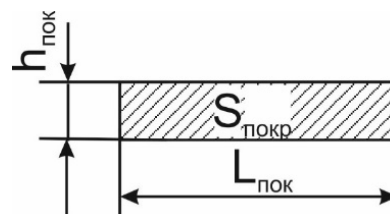


Рис. 2. Схема, иллюстрирующая связь толщины покрытия с линейным размером $L_{\text{пок}}$

Исходя из схемы (рис. 2) выражение (5) может быть представлено в виде:

$$I_m = h_{\text{пок}} \cdot L_{\text{пок}} \cdot J_{\text{пр}} \quad (6)$$

Выражая линейную величину $L_{\text{пок}}$, согласно расчетной схеме 1 в геометрических величинах обрабатываемой детали ($L_{\text{дет.торц}}$) и бокового зазора $S_{\text{бок}}$:

$$L_{\text{пок}} = L_{\text{дет.торц}} - S_{\text{бок}}$$

Тогда, исходя из тождественности левых частей выражений (3) и (6) можно записать:

$$F_0 \frac{\chi(U - \Delta U)}{S} = h_{\text{пок}} (L_{\text{дет.торц}} - S_{\text{бок}}) J_{\text{пр}} \quad (7)$$

Проведя преобразование выражения (7), получим выражение для определения толщины токопроводящего покрытия:

$$h_{\text{пок}} = F_0 \frac{\chi(U - \Delta U)}{S \cdot J_{\text{пр}} (L_{\text{дет.торц}} - S_{\text{бок}})} \quad (8)$$

Выражение (8) позволяет определять толщины токопроводящего покрытия в зависимости от электрических и технологических параметров ЭХО, геометрию обрабатываемой поверхности и применяемого материала для токопроводящего покрытия.

Обобщая приведенные выражения, можно сделать вывод о том, что геометрический размер ЭИ для аддитивной печати является функцией геометрического размера детали, скорректированного на величины устоявшегося зазора и толщины покрытия, причем последние являются константами, определяемыми режимами обработки:

$$L_{\text{мод}} = f(L_{\text{дет}}, S, h_{\text{пок}}), \quad (9)$$

где $S = \text{const}$, определяемая по [7];

$h_{\text{пок}}$ – определяется по выражению 8.

Учитывая вышесказанное, выражение для определения геометрических размеров нетоко-

проводящей основы для 3D-печати выражение (1) примет вид:

$$L_{\text{мод}} = L_{\text{дет.і}} - S_i - F_o \frac{\chi(U-\Delta U)}{S \cdot J_{\text{пр}}(L_{\text{дет.і}}-S_i)}. \quad (10)$$

Предложенные зависимости позволяют реализовать параметризацию основания комбинированного ЭИ, изготавливаемого на основе аддитивных технологий (рис. 3).

Использование современных САПР позволяет реализовать твердотельную параметрическую модель, что обеспечивает:

- возможность при проектировании различных форм ЭИ всегда оставаться в пределах рациональной геометрии;
- сокращает сроки проектирования, так как в основе цифрового прототипа ЭИ лежит поверхность обратноквадрантная обрабатываемой поверхности;
- технология PoGic осуществляет перераспределение параметров ЭИ с корректировкой толщины токопроводящего покрытия в зависимости от геометрии и величины МЭЗ [10].

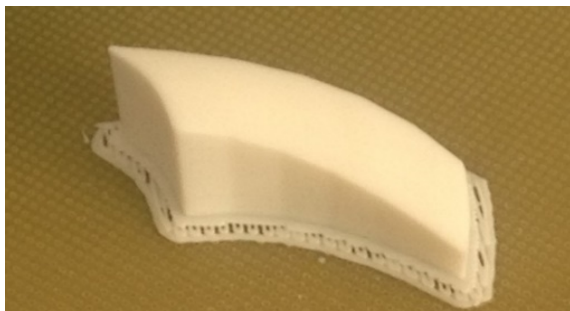


Рис. 3. Изготовление токонепроводящего основания ЭИ

Дальнейшее покрытие изготовленного на основе аддитивных технологий основания ЭИ токопроводящим покрытием (рис. 4) позволит реализовать сложнопрофильный ЭИ для единичного и экспериментального производства, отличающийся многообразием сложных форм и дешевизной в изготовлении.



Рис. 4. Металлизация токонепроводящего основания

Заключение

Подводя итог, можно отметить, что современные информационные технологии (САПР и аддитивные технологии) являются весьма перспективными для изготовления комбинированных инструментов сложной формы, высокого качества и в кратчайшие сроки для единичного использования в ЭХО.

Литература

1. Волосатов В.А. Справочник по электрохимическим и электрофизическим методам обработки. М.: Машиностроение, 1988. 718 с.
2. Смоленцев В.П. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов. М.: Высш. шк., 1983. Т. 1. 247 с.
3. Суворов А.П. Современные способы изготовления фасонных инструментов для электрических методов обработки // Вестник Воронежского института высоких технологий. 2018. № 3 (26). С. 25-27.
4. Суворов А.П. Разработка технологии изготовления комбинированного электрод-инструмента методом быстрого прототипирования // Научная опора Воронежской области: сб. тр. победителей конкурса науч.-исслед. работ студентов и аспирантов ВГТУ по приоритетным направлениям развития науки и технологий. Воронеж: Воронежский государственный технический университет, 2017. С. 143-144.
5. Суворов А.П., Кретинин А.В., Кузовкин А.В. Методика изготовления сложнопрофильного электрода-инструмента по технологии быстрого прототипирования // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 2. С. 11-14.
6. Суворов А.П., Кузовкин А.В. Использование аддитивных технологий в производстве фасонных поверхностей // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2017. № 2 (41). С. 9-15.
7. Suvorov A.P. Design combined electrode-tool for electric methods of processing by means of its parameterization of CAD // Инфографика и информационный дизайн: визуализация данных в науке: материалы Междунар. науч.-практ. конф. Омск, 2017. С. 148-152.
8. Смоленцев В.П., Кузовкин А.В., Поташников М.Г. Проектирование технологической оснастки для электрических методов обработки. Воронеж: ВГТУ, 2006. 149 с.
9. Суворов А.П., Кузовкин А.В. Подсистема "Параметризации электрода-инструмента для электроэрозионной обработки" // Свидетельство о регистрации в государственном информационном фонде ФГАНУ "Центр информационных технологий и систем органов исполнительной власти" № 50201650510 от 15.12.2016.

Информация об авторах

Суворов Александр Петрович - старший преподаватель, кафедра графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7 (905) 049-86-43, e-mail: alex_diz@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-3572>

Кузовкин Алексей Викторович - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой графики, конструирования и информационных технологий в промышленном дизайне, Воронежский государственный технический университет (394026, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7 (960) 131-41-63, e-mail: akuzovkin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9536-3928>

STUDY OF THE MANUFACTURING PROCESS OF A COMBINED ELECTRODE-TOOL FOR ELECTROCHEMICAL TREATMENT IN CONDITIONS OF SINGLE AND EXPERIMENTAL PRODUCTION

A.P. Suvorov, A.V. Kuzovkin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article considers the problem of design, construction and operation of the combined electrode-tool (ET) in single and pilot production, which lies in high technological and economic costs of production of such ET, comparable and sometimes exceeding, the cost of manufacturing the part using traditional cutting processes. The objects considered in this study are combination electrodes-tools, designed and manufactured on the basis of modern digital technologies and 3D printing and used for processing of geometrically-complex surfaces in single and pilot production. It is shown that the combination of parametric design based on digital models and fabrication methods, additive technology framework of the combined tool and subsequently giving it conductive properties significantly expand the scope of electrochemical treatment due to the possibility of finish machining geometrically-complex surfaces with a high degree of curvature. Experimental studies have shown that tested in single and pilot production combination tool may further be made for the needs of mass production. The materials of the article are of practical value to engineering companies in connection with the simplification of the manufacturing process of the electrode-tool for electrical machining methods

Key words: electrode-tool, electrochemical processing, additive technologies

References

1. Volosatov V.A. "Reference book on electrochemical and electrophysical processing methods" ("Spravochnik po elektrokhimicheskim i elektrofizicheskim metodam obrabotki"), Moscow, Mashinostoenie, 1988, 718 p.
2. Smolentsev V.P. "Electrophysical and electrochemical methods for processing materials" ("Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov"), Moscow, Vysshaya shkola, 1983, vol. 1, 247 p.
3. Suvorov A.P. "Modern methods of manufacturing shaped tools for electrical processing methods", *Bulletin of the Voronezh Institute of High Technologies (Vestnik Voronezhskogo Instituta Vysokikh Tekhnologiy)*, 2018, no. 3 (26), pp. 25-27.
4. Suvorov A.P. "Development of technology for the manufacture of a combined electrode tool using rapid prototyping", *Scientific support of the Voronezh region Collection of works by the winners of the research competition of undergraduate and graduate students at VSTU in priority areas of science and technology (Nauchnaya opora Voronezhskoy oblasti: sb. tr. pobediteley konkursa nauch.-issled. rabot studentov i aspirantov VGTU po prioritetyam napravleniyam razvitiya nauki i tekhnologiy)*, 2017, pp. 143-144.
5. Suvorov A.P., Kretinin A.V., Kuzovkin A.V. "Method of manufacturing a complex-profile electrode tool using the technology of rapid prototyping", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 2, pp. 11-14.
6. Suvorov A.P., Kuzovkin A.V. "The use of additive technologies in the production of shaped surfaces", *Bulletin of the Rybinsk State Aviation Technological Academy P.A. Solov'ev (Vestnik Rybinskoy Gosudarstvennoy Aviatsionnoy Tekhnologicheskoy Akademii Im. P.A. Solov'yeva)*, 2017, no. 2 (41), pp. 9-15.
7. Suvorov A.P. "Design combined electrode-tool for electric methods of processing by means of its parameterization of CAD", *Infographics and Information Design: Data Visualization in Science: Materials Intern. scientific-practical conf. (Infografika i informatsionnyy dizayn: vizualizatsiya dannykh v nauke: materialy Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Omsk, 2017, pp. 148-152.
8. Smolentsev V.P., Kuzovkin A.V., Potashnikov M.G. "Designing of technological equipment for electric processing methods" ("Proektirovanie tekhnologicheskoy osnastki dlya elektricheskikh metodov obrabotki"), Voronezh, VSTU, 2006, 149 p.
9. Suvorov A.P., Kuzovkin A.V. "Subsystem "Parameterization of the electrode-tool for EDM processing"" ("Podsystema "Parametrizatsii elektroda-instrumenta dlya elektroerozionnoy obrabotki""), Certificate of registration in the state information fund "Center for Information Technologies and Systems of Executive Authorities" No. 50201650510 of December 15, 2016.

Submitted 25.07.2019; revised 09.10.2019

Information about the authors

Aleksandr P. Suvorov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (905) 049-86-43, e-mail: alex_diz@inbox.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1482-3572>

Aleksey V. Kuzovkin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (960) 131-41-63, e-mail: akuzovkin@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9536-3928>

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ НАСЛЕДСТВЕННОСТИ НА ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ПАРАМЕТРОВ КАЧЕСТВА ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ АЛМАЗНЫМ ВЫГЛАЖИВАНИЕМ

М.Н. Нагоркин

Брянский государственный технический университет, г. Брянск, Россия

Аннотация: представлена методика количественной оценки влияния технологической наследственности на формирование параметров качества поверхностей деталей машин. Исследовались технологические системы чистового торцевого фрезерования композитом 10 с последующим алмазным выглаживанием плоских поверхностей деталей из чугуна. Представлен пример качественной оценки результатов экспериментов, позволяющий выявить управляющие факторы технологических систем, вносящих наибольший вклад в формирование микроструктуры поверхностного слоя. Оценивается влияние кинематических схем обработки торцевым фрезерованием и алмазным выглаживанием на формирование поверхностной микроструктуры обрабатываемой детали. Анализ корреляционных связей между параметрами качества поверхностей, полученных при предварительной обработке деталей, и соответствующими параметрами качества для их технологического обеспечения. Для количественной оценки влияния технологической наследственности на формирование параметров качества в процессе обработки предлагается применить метод имитационного моделирования. На примере формирования параметра шероховатости Ra поверхности детали торцевым фрезерованием композитом 10 с последующим алмазным выглаживанием оценивается влияние технологической наследственности, позволяющей дифференцированно решать вопросы выбора факторов обработки по величинам k_{qv} с целью эффективного управления регламентируемыми параметрами качества. Представлена графическая интерпретация влияния технологической наследственности на формирование параметров микропрофиля

Ключевые слова: алмазное выглаживание, технологическая наследственность, корреляция, параметры шероховатости

Введение

Окончательное формирование параметров качества поверхностей деталей машин осуществляется, в основном, на чистовых и финишных операциях технологического процесса обработки. Значительное влияние на этот процесс оказывает механизм технологического наследования [1, 2].

Степень влияния технологического наследования определяется факторами как предварительной, так и окончательной обработки. В статье представлена методика оценки коэффициентов влияния на параметры качества поверхностей деталей условий обработки в технологических системах на чистовых и финишных операциях, которые количественно отражают технологическую наследственность.

Постановка задачи

В качестве объекта исследования рассматривались технологическая система чистового торцевого фрезерования с последующим алмазным выглаживанием (АВ) плоских поверх-

ностей деталей из чугуна СЧ20.

Чистовая обработка торцевым фрезерованием проводилась с использованием стандартных резцовых вставок, оснащённых композитом 10 при углах в плане $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 30^\circ$.

АВ осуществлялось инструментом упругого действия с периферийно расположенным индентором из поликристаллического алмаза марки АСПК (карбонадо) (радиус вершины 3 мм). Сила алмазного выглаживания варьировалась в пределах $Q_{AB} = 50 \dots 150$ Н.

Для исследования влияния технологической наследственности на формирование параметров качества поверхностей применяется математический аппарат имитационного моделирования процессов с построением физико-статистических моделей формирования параметров качества [3].

Метод исследования

В модели процесса АВ, предложенной проф. Л. А. Хворостухиным (рис. 1) [4], предполагается, что при определённых условиях обработки величина пластического деформирования поверхностного слоя ΔH больше максимальной высоты шероховатости R_{max} поверх-

ности, полученной на предшествующем этапе обработки.

Это предположение получило экспериментальное подтверждение путём профилографирования участков поверхности образцов после предварительной обработки фрезерованием композитом 10 (участки А) и последующего алмазного выглаживания (участок В, рис. 2).

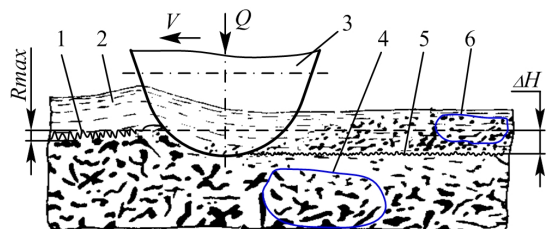


Рис. 1. Формирование поверхности детали из чугуна алмазным выглаживанием: 1 – необработанная поверхность; 2 – СОТС; 3 – алмазный индентор; 4 – включения графита в металлической основе чугуна; 5 – поверхность после АВ; 6 – частицы графита, вытесненные в СОТС из зоны деформирования

Анализ результатов экспериментов показал, что после АВ деталей из чугуна смазочно-охлаждающее технологическое средство (СОТС) приобретает тёмный цвет, который указывает на наличие графита в смазке, что свидетельствует о структурных изменениях поверхностного слоя при обработке АВ в результате вытеснения графита на поверхность.



Рис. 2. Остаточная деформация поверхности детали из чугуна после торцевого фрезерования композитом 10 (участок А) и выглаживания (участок В)

В работах по исследованиям механизма пластической деформации поверхностей деталей из чугуна (нетермообработанного с перлитной металлической основой) при обработке методами поверхностного пластического деформирования (ППД) также указывается на явление частичного вытеснения и удаления графита в СОТС. При этом увеличивается сплошность поверхностного слоя.

На плоских поверхностях, обработанных методом алмазного выглаживания, можно выделить следующие характерные участки (рис.

3): α – поверхность после предварительной обработки торцевым фрезерованием композитом 10; β – поверхность после АВ без следов пере­сечения (вход и выход соответствующего пере­хода); γ – основной участок выглаженной по­верхности.

Наиболее характерным и важным для анализа процесса формирования параметров качества обрабатываемой поверхности является участок поверхности γ . Участки поверхности β (рис. 3) являются дополнением к номинальной обрабатываемой поверхности и находятся на элементах технологической оснастки (фальшобразцах). На деталях типа «направляющие скольжения» такие участки находятся в местах неподвижных сопряжений корпусных деталей («передняя бабка – станина» и т. д.).

Тёмный фон на микрофотографиях участков плоских поверхностей (рис. 3) указывает на наличие включений графита в материале поверхности детали, а светлый – на его отсутствие (малое количество).

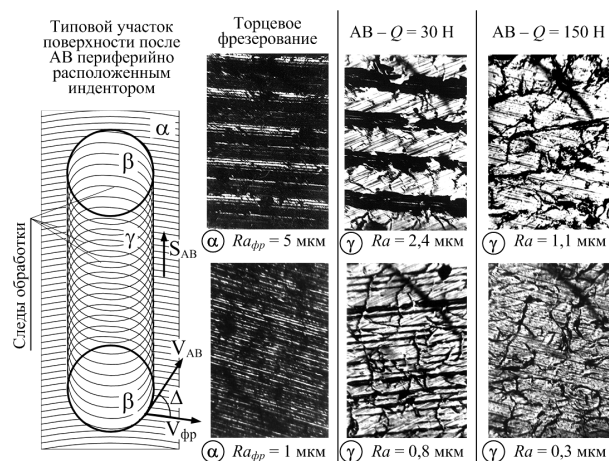


Рис. 3. Микрофотографии участков поверхностей деталей из чугуна, обработанных торцевым фрезерованием композитом 10 и АВ

Анализ микрофотографий показывает, что наибольшее влияние на обеспечение сплошности поверхностного слоя оказывают параметры шероховатости поверхности $Ra_{фр} = 1 - 10$ мкм, полученные на этапе фрезерования, и сила АВ Q , изменяемая в пределах 30 – 150 Н (радиус индентора $r = 2$ мм). Также на сплошность обрабатываемой поверхности влияет угол Δ между векторами скорости индентора выглаживающего инструмента и скорости вершины зуба торцевой фрезы. При значениях шероховатости поверхности после фрезерования менее $Ra = 2$ мкм вектор скорости выглаживания на изменение сплошности влияния практически не оказывает.

Таким образом, высокая сплошность поверхности обеспечивается за счет формирования низких значений параметров шероховатости на этапе фрезерования или за счет увеличения угла Δ между векторами скоростей индентора выглаживателя и фрезерования (рис. 3). Второй вариант, связанный с оптимизацией выбора диаметра торцевой фрезы и диаметра расположения индентора в алмазном выглаживателе, является более эффективным с экономической точки зрения.

В основу исследований процессов формирования параметров качества и эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин положены методы физико-статистического моделирования [3], в которых определение полиномиальных (1) или мультипликативных (2) моделей процессов формирования параметров качества деталей:

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_i X_i + \dots + \beta_k X_k, \quad (1)$$

$$Y_i = b_0 \cdot X_1^{b_1} \cdot X_2^{b_2} \cdot \dots \cdot X_k^{b_k}, \quad (2)$$

где Y_i – i -й параметр качества поверхности после обработки; X_k – k -й фактор условий обработки детали; b_0, b_1, \dots, b_k – значения коэффициентов регрессии, которые распределены по нормальному закону с математическим ожиданием $M\{b_k\}$ и средним квадратическим отклонением $S(b_k)$.

После обработки результатов экспериментов получены зависимости, характеризующие процесс обеспечения параметров шероховатости ($Ra, Rz, Rmax, Rp, Sm, \rho, b, v, \Delta$) поверхности алмазным выглаживанием после торцевого фрезерования плоских поверхностей деталей из чугуна. Диапазоны варьирования управляющих факторов: $S_{zfp} = 0,05 - 0,25$ мм/зуб; $V_{fp} = 311 - 622$ м/мин; $Q_{AB} = 50 - 150$ Н; $S_{AB} = 0,025 - 0,16$ мм/об; $V_{AB} = 35 - 90$ м/мин [3, 5].

Анализ интервалов изменения параметров шероховатости поверхностей деталей в ходе проведения экспериментов показывает достаточно широкий диапазон их варьирования при алмазном выглаживании после предварительного торцевого фрезерования. Это особенно характерно для параметров $Ra, Rp, Rz, Rmax, Sm$ и ΔH .

Исследование влияния параметров качества поверхностей деталей, обеспечиваемых на этапах обработки, предшествующих финишной обработке, на значения параметров качества после ППД позволяет оценить степень влияния технологической наследственности. Для этого проводился анализ корреляционных связей между параметрами качества поверхностей получаемых на различных этапах обработки. Это

необходимо для обоснованного выбора минимального числа параметров качества, с целью их контроля в процессе обработки детали.

Между всеми стандартизированными параметрами шероховатости выявлена практически 100%-я корреляция. Корреляционные связи с коэффициентом парной корреляции $r \approx 1$ позволяют выявить линейные связи.

Формирование требуемых значений параметров шероховатости методами ППД зависит от состояния поверхности после предварительной обработки и от факторов финишной обработки (AB). Поэтому средняя степень вершин графов корреляционных связей при высоких значениях r снижается [3].

Коэффициент парной корреляции $r = 0,2$ считается статистически значимым. На рис. 4 представлено, как с ростом величины коэффициента r изменяются характеристики графов корреляционных связей между параметрами шероховатости.

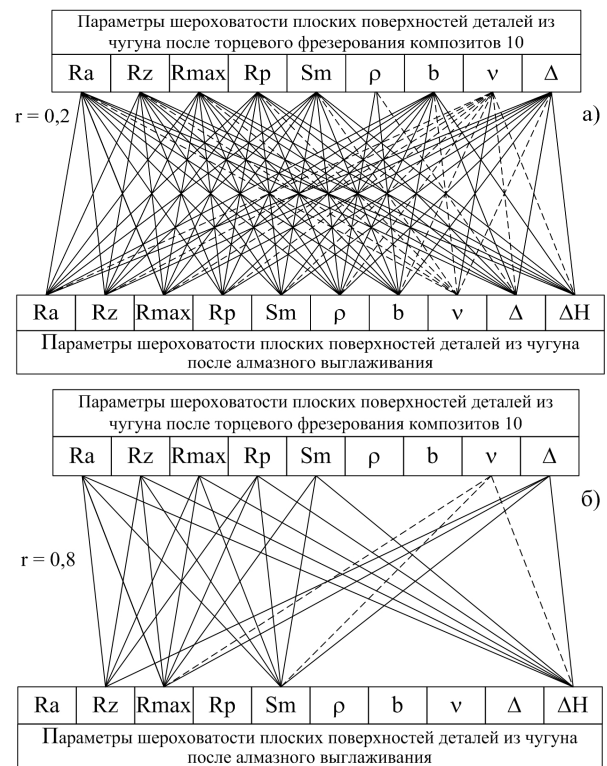


Рис. 4. Корреляционные связи параметров шероховатости поверхностей деталей, обработанных торцевым фрезерованием, и параметров шероховатости поверхностей, обработанных последующим АВ

На рис. 4а представлен граф ($r = 0,2$), в котором практически все параметры связаны статистически значимыми корреляционными связями. При $r = 0,8$ количество как положительных, так и отрицательных корреляционных связей уменьшается (рис. 4б).

Средняя степень вершины графа отражает картину влияния i -го исходного параметра качества поверхности на параметры, формируемые в процессе АВ. Для соответствующих коэффициентов парной корреляции средняя степень вершины уменьшается от 8 – 11 (при $r = 0,2$) до 0 (при $r = 0,9$). Такое снижение объясняется нелинейностью происходящих в процессе АВ пластических деформаций металла поверхности заготовки. Поэтому такие связи целесообразно отражать нелинейными зависимостями [3].

В ходе обработки поверхности детали происходит процесс эволюции параметров её качества от исходных до технологических (рис. 5) [3, 6].

Технологические процессы обычно включают q технологических систем (ТС). Входными параметрами, например для $ТС_\varepsilon$, можно считать параметры качества поверхности $Y_{i(\varepsilon-1)}$, полученные на предшествующем этапе обработки, управляющими параметрами являются условия обработки $X_{\varepsilon 1}, X_{\varepsilon 2}, \dots, X_{\varepsilon \xi}$, выходными – полученные параметры $Y_{i\varepsilon}$ качества поверхности.

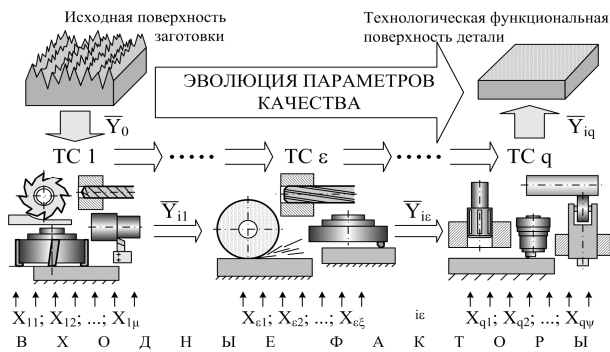


Рис. 5. Схема эволюции параметров качества поверхностей деталей машин в процессе обработки в q технологических системах

Для количественной оценки влияния технологической наследственности на формирование параметров качества в процессе обработки целесообразно применить метод имитационного моделирования. При этом логично использовать мультипликативные модели (2), так как расчёты по ним не дают отрицательных значений параметров, то есть не нарушается физическая картина их формирования [3].

Для параметра качества $Y_{i\varepsilon}$, формируемого на этапе формирования поверхности в системе $ТС_\varepsilon$, имитационная модель имеет вид:

$$Y_i = Y_{i0} \cdot \prod_{j=1}^{\mu} X_{1j}^{b_{1j}} \cdot \dots \cdot \prod_{m=1}^{\xi} X_{\varepsilon m}^{b_{\varepsilon m}} \cdot \dots \cdot \prod_{\zeta=1}^{\psi} X_{q\zeta}^{b_{q\zeta}} \quad (3)$$

Здесь Y_{i0} – среднее экспериментальное значение i -го параметра качества, которое

определяется по результатам активного эксперимента; $X_{\varepsilon m}$ – параметр, равный значению m -го фактора обработки в $ТС_\varepsilon$; $b_{\varepsilon m}$ – показатель, характеризующий степень влияния соответствующего фактора обработки $X_{\varepsilon m}$ на формирование i -го параметра качества.

Для указанной модели должно соблюдаться условие:

$$\mu + \xi + \psi = k, \quad (4)$$

где k – число факторов технологического процесса.

В общем случае:

$$Y_i = Y_{i0} + Y_{i1} + \dots + Y_{i\varepsilon} + \dots + Y_{iq}, \quad (5)$$

$$Y_{i1} = \left(\sum_{j=1}^{\mu} b_{1j} X_{1j} \right)_i; \dots; Y_{i\varepsilon} = \left(\sum_{m=1}^{\xi} b_{\varepsilon m} X_{\varepsilon m} \right)_i; \dots;$$

$$Y_{iq} = \left(\sum_{\zeta=1}^{\psi} b_{q\zeta} X_{q\zeta} \right)_i. \quad (6)$$

Y_{i1}, \dots, Y_{iq} – это вклад подсистем технологического процесса $ТС_1, \dots, ТС_q$ в формирование окончательного значения параметров качества Y_i .

Предполагается, что величина Y_{i1}, \dots, Y_{iq} должна иметь размерность Y_i .

Зависимость (3) можно представить как:

$$Y_i = Y_{i0} K_1 \cdot \dots \cdot K_\varepsilon \cdot \dots \cdot K_q. \quad (7)$$

Здесь K_1, \dots, K_q – коэффициенты влияния соответствующих ТС:

$$K_1 = \prod_{j=1}^{\mu} X_{1j}^{b_{1j}}; \dots; K_\varepsilon = \prod_{m=1}^{\xi} X_{\varepsilon m}^{b_{\varepsilon m}}; \dots;$$

$$K_q = \prod_{\zeta=1}^{\psi} X_{q\zeta}^{b_{q\zeta}}. \quad (8)$$

Значения коэффициентов K_q позволяют оценить степень влияния технологических подсистем на формирование исследуемых параметров качества, то есть учесть фактор технологической наследственности.

Коэффициент влияния K_q определяется по зависимости:

$$K_q = k_{q1} k_{q2} \cdot \dots \cdot k_{q\psi}. \quad (9)$$

Здесь ψ – число управляющих факторов технологической подсистемы $ТС_q$.

Например, модель формирования параметра шероховатости Ra поверхности детали из чугуна торцевым фрезерованием композитом 10 с последующим АВ представлена в виде

$$Ra = S_{z\phi p}^{0,07} \cdot V_{\phi p}^{-0,194} \cdot (S_{z\phi p} \cdot V_{\phi p})^{0,775} \times Q_{AB}^{-0,774} \cdot S_z^{0,268} \cdot V_{AB}^{0,169} \cdot (Q_{AB} \cdot V_{AB})^{0,1}.$$

В таком случае рассматривается влияние торцевого фрезерования (K_1) и АВ (K_2) на фор-

мирование параметров качества.

$$K_1 = S_{z\phi p}^{0,07} \cdot V_{\phi p}^{-0,194} \cdot (S_{z\phi p} \cdot V_{\phi p})^{0,775};$$

$$K_2 = Q_{AB}^{-0,774} \cdot S_z^{0,268} \cdot V_{AB}^{0,169} \cdot (Q_{AB} \cdot V_{AB})^{0,1}.$$

Выражение (9) целесообразно прологарифмировать, что упростит анализ влияния технологической наследственности на формирование параметров качества.

Указанный способ оценки влияния технологической наследственности дает возможность дифференцированного выбора факторов обработки по величинам k_{qv} и эффективно управлять процессом обработки деталей с целью обеспечения регламентируемых параметров качества. Факторы с более высоким значением k_{qv} являются предпочтительными.

На рис. 6 представлено изменение влияния технологической наследственности на формируемые параметры шероховатости Ra и Rp в разных точках области факторного пространства.

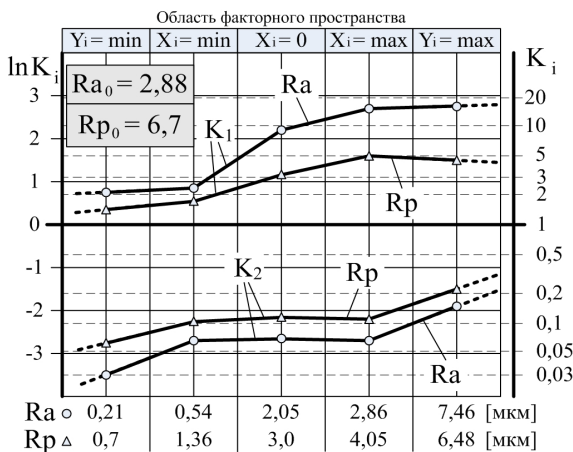


Рис. 6. Влияние технологической наследственности на формирование параметров шероховатости

Так, коэффициент K_1 , учитывающий влияние режимов торцевого фрезерования, изменяется в пределах 2,36 – 16,24 (для Ra) и 1,52 – 5,05 (для Rp), а коэффициент K_2 , характеризующий влияние режимов АВ, колеблется в пределах 0,03 – 0,16 (для Ra) и 0,07 – 0,21 (для Rp). Таким образом, режимы алмазного выглаживания позволяют обеспечить изменение параметра Ra более, чем в 30 раз относительно среднего экспериментального значения $Ra_0 = 2,88$ мкм, а факторы обработки фрезерованием способствуют повышению параметра Ra от 1,52 до 5,05 раза. Аналогичный анализ можно провести как для других параметров качества, так и для различных методов обработки.

Так, например, значение остаточной деформации поверхности ΔH_{min} можно уменьшить в 20 раз относительно среднего экспериментального значения ΔH_0 , при этом факторы, учитывающие режимы выглаживания, позволяют увеличить её значения от 2 до 4,6 раза.

На основе проведенных исследований сформирована база данных значений коэффициентов влияния технологической наследственности на формирование параметров качества поверхности в ТС «торцевое фрезерование композитом 10 – АВ» для различных областей факторного пространства.

Заключение

На основе имитационного моделирования процессов формирования параметров качества поверхностей деталей на различных стадиях обработки предложена методика количественной оценки влияния технологической наследственности. Коэффициенты влияния, учитывающие условия обработки на предварительных и окончательных этапах, позволяют оценить, какие факторы обработки вносят больший вклад в формирование параметров качества, что позволит повысить управляемость процессов формирования параметров качества.

Литература

1. Сулов А.Г., Васильев А.С., Сухарев С.О. Влияние технологического наследования на качество поверхностного слоя деталей машин // Известия вузов. Серия «Машиностроение». 1999. № 1. С. 69 - 76.
2. Смелянский В.М., Блюменштейн В.Ю. Концепция инженерии поверхностного слоя в категориях пластичности и технологического наследования // Справочник. Инженерный журнал. 2000. № 4. С. 17 - 24.
3. Нагоркин М.Н. Параметрическая надёжность технологических систем чистовой и отделочно-упрочняющей обработки поверхностей деталей машин инструментами из сверхтвёрдых синтетических материалов: монография. М.: Издательский дом «Спектр», 2017. 304 с.
4. Хворостухин Л.А., Шишкин С.В., Ковалёв А.П. Повышение несущей способности деталей машин поверхностным упрочнением. М.: Машиностроение, 1988. 144 с.
5. Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Kovalyova E.V. Modeling of process of forming quality parameters for surfaces of parts by diamond burnishing taking into account technological heredity // IOP Conf. Series: Materials science and engineering; 327 (2018) 042071. Pp. 1-6.
6. Регламентация параметров шероховатости функциональных поверхностей деталей машин в технологической документации / М.Н. Нагоркин, В.П. Федоров, И.Л. Пыриков, М.П. Топорков // Вестник Брянского государственного технического университета. 2019. № 3 (76). С. 4 -12.

Информация об авторах

Нагоркин Максим Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Безопасность жизнедеятельности и химия», Брянский государственный технический университет (241035, г. Брянск, бул. 50 лет Октября, 7), тел. +7(960)552-61-25, e-mail: nagorkin_mn@mail.ru

**ASSESSMENT OF THE INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL HEREDITY
ON THE PROCESS OF FORMING THE PARAMETERS OF THE SURFACE QUALITY
OF PARTS BY DIAMOND BURNISHING**

M.N. Nagorkin

Bryansk State Technical University, Bryansk, Russia

Abstract: the article presents a technique for quantifying the influence of technological heredity on the formation of surface quality parameters of machine parts. Technological systems for finishing face milling with composite 10 were investigated, followed by diamond burnishing of the flat surfaces of cast iron parts. An example of a qualitative assessment of the results of experiments is presented, which makes it possible to identify the controlling factors of technological systems that make the greatest contribution to the formation of the microstructure of the surface layer. The effect of kinematic processing schemes for face milling and diamond burnishing on the formation of the surface microstructure of the workpiece is evaluated. Analysis of the correlation relationships between the quality parameters of the surfaces obtained during the preliminary processing of the parts and the corresponding parameters obtained after the final processing allowed us to establish the minimum necessary number of quality parameters for their technological support. For a quantitative assessment of the impact of technological heredity on the formation of quality parameters in the process of processing it is proposed to apply the method of simulation modelling. Using the example of the formation of the roughness parameter Ra of the surface of a part by face milling with composite 10 and subsequent diamond burnishing, the influence of technological heredity is estimated, which makes it possible to differentiate the choice of processing factors according to values k_{qu} in order to effectively control the regulated quality parameters. A graphical interpretation of the influence of technological heredity on the formation of microprofile parameters is presented

Key words: diamond burnishing; technological heredity; correlation, roughness parameters

References

1. Suslov A.G., Vasil'ev A.S., Suharev S.O. "The impact of technological inheritance on the quality of the surface layer of machine parts", *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building (Izvestiya vuzov. Seriya «Mashinostroenie»*), 1999, no. 1, pp. 69-76.
2. Smelyanskiy V.M., Blumenstein V.Yu. "The concept of surface layer engineering in the categories of plasticity and technological inheritance", *Handbook. Engineering journal (Spravochnik. Inzhenernyy zhurnal)*, 2009, no. 10, pp. 8-15.
3. Nagorkin M.N. "Parametric reliability of technological systems in machinery finishing and finish-strengthening with super-hard synthetic tools" ("Parametricheskaya nadozhnost' tekhnologicheskikh sistem chistovoy i otdelочно-uprochnyayushchey obrabotki poverkhnostey detaley mashin instrumentami iz sverkhvordykh sinteticheskikh materialov"), Monograph, Moscow, Publishing house Spektr, 2017, 304 p.
4. Khvorostukhin L.A., Shishkin S.V., Kovalev A.P. "Increase of machinery bearing capacity by surface hardening" ("Povyshenie nesushchey sposobnosti detaley mashin poverkhnostnym uprochneniyem."), Moscow, Mechanical Engineering, 1988, 144 p.
5. Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Kovalyova E.V. "Modeling of process of forming quality parameters for surfaces of parts by diamond burnishing taking into account technological heredity", *IOP Conf. Series: Materials science and engineering*, 2018, vol. 327, 042071.
6. Nagorkin M.N., Fyodorov V.P., Pyrikov I.L., Toporkov M.P. "Regulations of roughness parameters for machinery functional surfaces in technological documentation", *Bulletin of Bryansk state technical university (Vestnik Bryanskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta)*, 2019, no 3, pp. 4-12.

Submitted 01.07.2019; revised 07.10.2019

Information about the author

Maksim N. Nagorkin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Bryansk State Technical University (7 Boul. 50-Letiya Oktyabrya, Bryansk 241035, Russia), e-mail: nagorkin_mn@mail.ru, tel. +7(960)552-61-25

ИНФОРМАЦИОННАЯ ПОДДЕРЖКА НАЗНАЧЕНИЯ СТРАТЕГИИ ЭФФЕКТИВНОЙ ЭКСПЛУАТАЦИИ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА

А.В. Анцев

Тульский государственный университет, г. Тула, Россия

Аннотация: рассматривается задача назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента непосредственно в процессе обработки партии деталей на конкретном металлорежущем станке с учетом вариабельности процесса резания. Стратегия эксплуатации лезвийного инструмента – это совокупность принципов и правил, обеспечивающих заданное управление процессом эксплуатации лезвийного инструмента путем поддержания рациональных режимов работы лезвийного инструмента и назначения работ по его восстановлению в соответствии с техническим состоянием. Показана необходимость учета вариабельности процесса резания при оценке периода стойкости и обеспечении эффективной эксплуатации лезвийного инструмента. Для автоматизации процесса назначения стратегии эксплуатации лезвийного инструмента в режиме самообучения предложен программно-методический комплекс назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента. Предложенный программно-методический комплекс позволяет в режиме самообучения назначать экономически эффективный режим профилактики лезвийного инструмента, назначать рациональные режимы резания, производить сравнительную оценку качества лезвийного инструмента разных производителей, формировать комплект лезвийного инструмента технологической системы операции и рассчитывать нормы расхода лезвийного инструмента с учетом вариабельности процесса резания. Рассмотрена общая методика применения программно-методического комплекса назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента. Использование предложенного программно-методического комплекса позволит повысить эффективность промышленных технологий производства продукции машиностроения, в том числе и на предприятиях оборонно-промышленного комплекса

Ключевые слова: стратегия эксплуатации, оптимизация, скорость резания, период замены, удельные затраты, информационная поддержка, программно-методический комплекс

Введение

В условиях интеграции России в мировую экономическую систему, обеспечивающих достаточно свободный доступ на ее рынки иностранных конкурентов, стратегически важной задачей является повышение уровня конкурентоспособности продукции машиностроения.

Одним из способов повышения конкурентоспособности продукции машиностроения является снижение ее себестоимости [1]. Для снижения себестоимости отечественной продукции необходимо повышение эффективности всех процессов, выполняемых при ее производстве. Одним из важнейших технологических процессов при производстве продукции машиностроения является обработка резанием. По экспертным оценкам, 15 % стоимости деталей узлов и машин, производимых в мире, приходится на операцию обработки резанием с использованием лезвийного инструмента [2]. Несмотря на постоянное появление новых технологий обработки в машиностроении, традиционная обработка металлов резанием является, и в ближайшие десятилетия будет оставаться,

основным способом изготовления деталей узлов и машин.

Лезвийный инструмент в технологической системе операции [3] является наиболее слабым элементом, от которого зависит производительность и надежность обработки [4, 5]. При этом эффективность процессов обработки резанием лезвийным инструментом в значительной мере определяется принятой на предприятии стратегией его эксплуатации. Стратегия эксплуатации лезвийного инструмента – это совокупность принципов и правил, обеспечивающих заданное управление процессом эксплуатации лезвийного инструмента путем поддержания рациональных режимов работы лезвийного инструмента и назначения работ по его восстановлению в соответствии с техническим состоянием [6, 7]. Поэтому задачу повышения производительности и надежности обработки резанием необходимо решать как задачу обоснованного назначения стратегии эксплуатации лезвийного инструмента.

Назначение рациональных режимов резания

При назначении рациональных режимов резания подачу и глубину резания назначают максимально возможными исходя из техниче-

ских и технологических ограничений. Таким образом, для оптимизации остается лишь скорость резания.

Скорость резания не влияет на постоянные затраты при металлообработке (на оборудование, оплату труда, содержание зданий и сооружений), но при увеличении скорости резания увеличивается количество деталей, производимых за час и, следовательно, уменьшается стоимость станко-часа. Однако при увеличении скорости резания снижается стойкость инструмента, поэтому затраты на инструмент, входящие наряду с затратами на обрабатываемые заготовки в переменные затраты при металлообработке, увеличиваются. Если сложить все затраты, то получается кривая суммарных производственных затрат. С ростом скорости резания повышается производительность обработки, пока не будет достигнут уровень, когда будет затрачиваться непропорционально много времени на смену инструмента и производительность начнет снижаться. Самая нижняя точка на кривой производственных затрат соответствует экономической скорости резания. Самая верхняя точка на кривой количества деталей в час соответствует скорости резания, обеспечивающей максимальную производительность. Скорость резания между этими двумя точками представляет собой зону высокой эффективности, в которой и следует работать (рис. 1) [8].

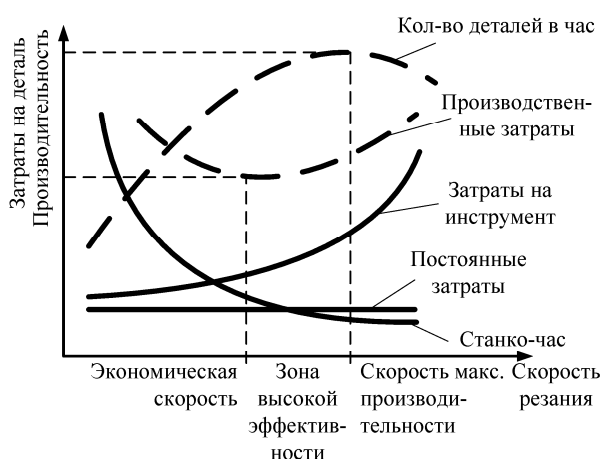


Рис. 1. Определение зоны рациональных режимов резания

Сложность решения задачи обоснованного назначения стратегии эксплуатации лезвийного инструмента обусловлена вариабельностью периода стойкости лезвийного инструмента [9-11], связанной с вариабельностью параметров лезвийного инструмента [12-15] и характеристик обрабатываемого материала [16], неопределенностью условий эксплуатации лезвийного

инструмента [17-19] и спецификой конкретного машиностроительного производства.

Игнорирование вариабельности процесса резания оказывает негативное влияние на эффективность обработки резанием вследствие:

- увеличения основного времени, необходимого на изготовление деталей узлов и машин из-за назначения нерациональных режимов резания;

- снижения эффективности использования ресурса лезвийного инструмента. Период стойкости лезвийного инструмента в пределах одной партии имеет широкий разброс (15–35 %) [12]. Если время работы лезвийного инструмента определяется наихудшим экземпляром в партии, то ресурс наиболее стойких экземпляров лезвийного инструмента при фиксированной наработке будет использован не полностью;

- снижения коэффициента использования металлорежущего оборудования и нарушения ритмичности производственного процесса изготовления продукции из-за увеличения вспомогательного времени, требуемого на обслуживание и замену лезвийного инструмента;

- повышения уровня риска при производственной реализации технологических проектных решений, существенно влияющих на качество изделий;

- повышения себестоимости продукции из-за включения в нее затрат на брак, связанный с отказом лезвийного инструмента во время обработки.

Таким образом, учет вариабельности процесса резания при оценке периода стойкости и обеспечении эффективной эксплуатации лезвийного инструмента путем назначения экономически целесообразной периодичности его восстановления и рациональных режимов резания необходим для повышения эффективности машиностроительных производств и является актуальной научной проблемой.

Программно-методический комплекс

Для автоматизации процесса назначения стратегии эксплуатации лезвийного инструмента в режиме самообучения предложен программно-методический комплекс (ПМК) назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента (рис. 2), позволяющий в режиме самообучения:

- назначать экономически эффективный режим профилактики лезвийного инструмента;

- назначать рациональные режимы резания;
- производить сравнительную оценку качества лезвийного инструмента разных производителей;

- формировать комплект лезвийного инструмента технологической системы операции;
- рассчитывать нормы расхода лезвийного инструмента с учетом вариабельности процесса резания.

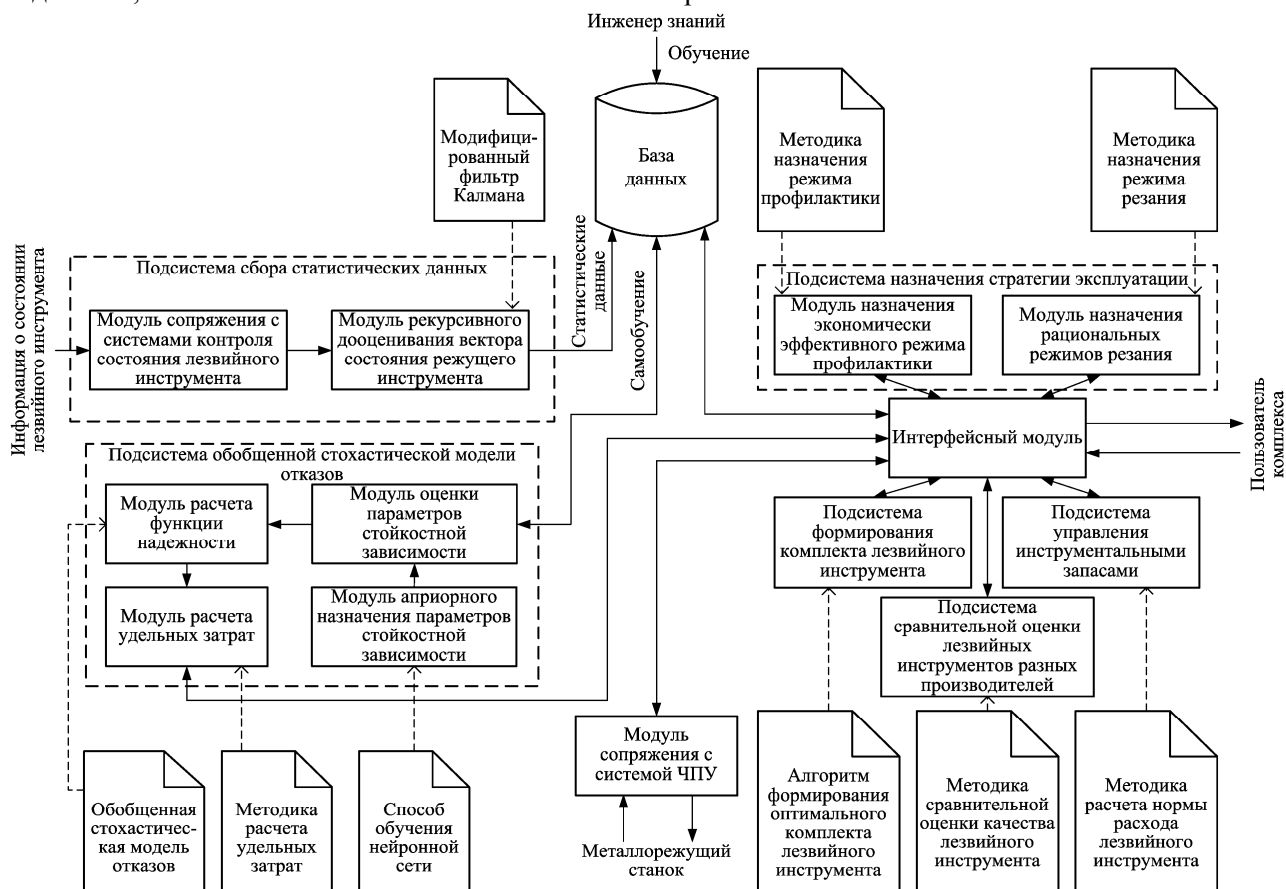


Рис. 2. Структура программно-методического комплекса назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента

В основе разработанного ПМК лежит обобщенная стохастическая модель отказов одно- и многолезвийного инструмента [11], учитывающая и постепенный, и внезапный отказ инструмента, а также вариабельность процесса резания. На основе данной модели отказов сформирована стойкостная зависимость и представлены методики оценки зависимости ее параметров от режима резания на основе собираемых в процессе обработки на металлорежущих станках статистических данных, которые хранятся в специальной базе данных. Априорное назначение параметров стойкостной зависимости проводится с помощью имеющихся опытных данных по результатам предыдущей эксплуатации металлорежущих станков с использованием искусственной нейронной сети (ИНС) в виде многослойного перцептрона. Для увеличения скорости обучения ИНС используется модифицированный алгоритм обучения [20].

Применение программно-методического комплекса

Общая методика применения программно-методического комплекса назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента будет состоять из следующих простых шагов:

- выбор критериев отказа лезвийных инструментов;
- сбор статистических данных об отказах лезвийных инструментов на различных режимах резания;
- оценка параметров стойкостной зависимости на основе обобщенной стохастической модели отказов лезвийных инструментов;
- определение режимов резания, соответствующих зоне высокой эффективности обработки и режима восстановления лезвийного инструмента;

– сравнение однотипных инструментов разных поставщиков между собой и выбор оптимальных вариантов;

– формирование комплектов лезвийных инструментов для технологических систем операции;

– расчет норм расхода лезвийного инструмента.

Рассмотрим данные шаги подробнее.

Первым шагом применения ПМК является выбор критерия отказа лезвийного инструмента для конкретной операции. Например, в случае черновой обработки критерием отказа может быть разрушение инструмента, в случае чистовой обработки – износ по задней поверхности, шероховатость обработанной поверхности, точность размеров изготавливаемой детали. Для высокоскоростного точения критерием отказа может быть износ по передней поверхности.

Следующим шагом является сбор статистических данных об отказах лезвийных инструментов на различных режимах резания, например, при постановки продукции на производство. Для сокращения количества необходимых экспериментов можно воспользоваться дробным факторным экспериментом по методу Тагути [21, 22]. План эксперимента в виде ортогональной матрицы **L6** представлен в таблице.

Ортогональная матрица **L6** сбалансирована – каждый уровень каждого параметра встречается одинаковое количество раз.

Для учета вариации из-за разброса качества лезвийных инструментов одной партии каждый эксперимент необходимо повторить 3 раза. Для оценки вариации из-за разброса параметров заготовки при обработке одним лезвийным инструментом необходимо контролировать износ каждого инструмента два раза после обработки разных деталей.

Ортогональная матрица стойкостного эксперимента

Номер эксперимента	Уровень параметра		
	Скорость резания	Подача	Глубина резания
1	1	1	1
2	2	2	2
3	3	1	2
4	1	2	1
5	2	1	2
6	3	2	1

На основе собранных статистических данных происходит оценка параметров стойкостной зависимости. С использованием полученной стойкостной зависимости происходит определение режимов резания, соответствующих зоне высокой эффективности обработки и режима восстановления лезвийного инструмента. При этом определение режимов резания можно проводить также в режиме статистической адаптации [23].

С использованием полученной стойкостной зависимости разработаны модули назначения экономически эффективного режима профилактики лезвийного инструмента и назначения рациональных режимов резания. Также в состав ПМК входят подсистемы сравнительной оценки лезвийного инструмента разных производителей, формирования комплекта лезвийного инструмента и подсистема для расчета норм расхода лезвийного инструмента.

В качестве критерия оптимальности прием удельные затраты, то есть затраты на обработку детали, и затраты, связанные с заменой лезвийного инструмента и возможным браком при работе отказавшим лезвийным инструментом, приходящиеся на одну обработанную деталь [24].

Таким образом критерий оптимальности – это переменная часть себестоимости обработки или штучного времени технологического перехода, зависящая от режима резания и режима замены лезвийного инструмента. Если исходить только из удельных затрат времени, то оптимальный режим резания дает наибольшую производительность, а если исходить из затрат в рублях, то получается минимум себестоимости.

Поиск оптимальных значений режима резания и периода замены лезвийного инструмента выполняется путем перебора значений скорости резания и периода замены с малым шагом в связи с многоэкстремальностью функции удельных затрат [10].

С помощью ПМК можно рассчитать удельные затраты для однотипных инструментов разных поставщиков и выбрать оптимальный лезвийный инструмент исходя из минимума удельных затрат на рассматриваемых технологических операциях.

В магазине станка с ЧПУ в соответствии с технологическими процессами изготавливаемых на нем деталей размещается определенный комплект лезвийного инструмента. Для многих предприятий характерна ситуация, когда на одном станке обрабатываются партии нескольких

разных деталей, при этом каждый месяц данные детали заново запускаются в производство.

Формирование оптимального комплекта лезвийного инструмента для станков с ЧПУ осуществляется с помощью генетического алгоритма [25], приведенного на рис. 3. Разные комплекты лезвийного инструмента сравниваются между собой по критерию минимума удельных затрат.

Начальной точкой алгоритма является формирование исходных вариантов комплектов лезвийных инструментов путем их генерации случайным образом из массива доступных лезвийных инструментов.

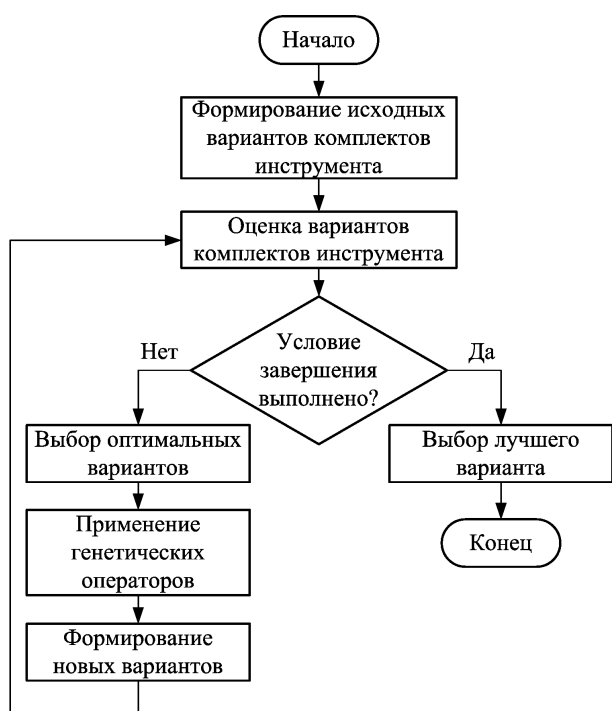


Рис. 3. Блок-схема алгоритма формирования оптимального комплекта лезвийного инструмента

Оценка вариантов комплектов лезвийного инструмента происходит по всем инструментам варианта комплекта для всех деталей, которые предполагается изготавливать на данном металлорежущем станке с учетом плана их производства. В качестве критерия оптимальности используется критерий минимума удельных затрат с применением стойкостной зависимости на основе обобщенной стохастической модели отказов.

В качестве условия завершения алгоритма используется либо достижение заданного уровня удельных затрат, либо достижение заданного количества итераций алгоритма. Если условие завершения не достигнуто, то происходил выбор оптимальных вариантов комплектов лез-

вийного инструмента с минимальными удельными затратами. Лучшие варианты комплектов лезвийного инструмента выбираются для генерации новых вариантов комплектов много раз, в то время как варианты с высокими удельными затратами исключаются из дальнейшего рассмотрения.

Применение генетических операторов позволяет получить новые варианты комплектов лезвийных инструментов для анализа. После выбора родительских вариантов комплектов лезвийных инструментов части комплектов обмениваются между собой. Части комплектов для обмена выбираются полностью случайно. Этот процесс применяется для 50% лучших вариантов комплектов лезвийных инструментов.

Полученные таким образом новые варианты комплектов лезвийных инструментов могут претерпевать внезапное случайное изменение. Этот процесс важен, потому что он добавляет варианты комплектов, которые могут отсутствовать в родительских, и таким образом обеспечивается поиск глобального оптимума решения. Это происходит в 1 % случаев, иначе генетический алгоритм становится просто алгоритмом случайного поиска.

После выполнения условия завершения генетического алгоритма из оставшихся на момент завершения алгоритма вариантов выбирается вариант комплекта лезвийного инструмента с минимальными удельными затратами. Этот вариант и будет результатом работы системы комплектования лезвийного инструмента технологической системы операции.

Для сформированного комплекта лезвийного инструмента производится планирование потребности в лезвийном инструменте. Планирование потребности в лезвийном инструменте включает в себя определение их расхода при выполнении производственной программы и объемов запасов, необходимых для обеспечения нормального снабжения производственных подразделений предприятия и рабочих мест [26]. Для повышения точности оценки при определении норм инструментальных запасов необходимо учитывать вариабельность процессов резания.

В случае серийного или массового производства расчет норм расхода лезвийного инструмента по каждой изготавливаемой детали:

$$H = \frac{1000 \cdot t_{рез}}{\bar{T} \cdot K_{и.с.}}, \quad (1)$$

где H – норма расхода лезвийного инструмента на 1000 деталей, шт.; $t_{рез}$ – время

резания данного инструмента при обработке детали, мин.; \bar{T} – математическое ожидание периода стойкости лезвийного инструмента, мин.; $K_{и.с.}$ – коэффициент использования стойкости лезвийного инструмента.

В свою очередь для учета вариабельности процесса резания математическое ожидание периода стойкости лезвийного инструмента определяется с использованием стойкостной зависимости на основе обобщенной модели отказов.

В случае штучного, единичного и мелкосерийного производства нормы расхода рассчитываются с использованием приведенной наработки лезвийного инструмента при обработке i -го перехода [27]

$$\tau_i = \frac{t_{рез i}}{\bar{T}_i}. \quad (2)$$

В этом случае работа, выполняемая инструментом, представлена K элементарными переходами – под элементарным переходом понимается часть технологической операции, при которой режимы резания (скорость, подача, глубина обработки) остаются постоянными [28]. Каждый переход характеризуется временем резания $t_{рез i}$ и периодом стойкости \bar{T}_i , который имеет лезвийный инструмент, если работает только на этом i -м переходе. Для оценки надежности лезвийного инструмента, эксплуатируемого при переменных режимах резания, применяется понятие нормированной функции надежности

$$\hat{P}(\tau) = 1 - \hat{F}(\tau), \quad (3)$$

где

$$\hat{F}(\tau) = \hat{F}\left(\sum_{i=1}^K \frac{t_{рез i}}{\bar{T}_i}\right), \quad (4)$$

нормированная функция распределения, описывающая случайную величину, с математическим ожиданием равным единице и дисперсией равной коэффициенту вариации периода стойкости. Такая функция характеризует лезвийный инструмент в целом и не зависит от конкретных режимов резания.

Расчет нормы расхода лезвийного инструмента в этом случае производится по следующей формуле:

$$H = \sum_{i=1}^K N_i \cdot \frac{\tau}{K_{и.с.}}, \quad (5)$$

где H – норма расхода лезвийного инструмента на планируемый период, шт.; K – количество элементарных переходов в плани-

руемый период, шт.; N_i – план производства детали, при обработке которой выполняется i -й переход, шт.; $t_{рез i}$ – время резания на i -м переходе, мин.; \bar{T}_i – математическое ожидание периода стойкости лезвийного инструмента при обработке i -го перехода, мин.

Полученные таким образом нормы расхода лезвийного инструмента учитывают вариабельность процесса резания и могут использоваться для последующего управления инструментальными запасами с использованием стандартных методов логистики.

Заключение

Современное состояние систем управления технологическими процессами с применением искусственного интеллекта, обладающих способностью к обучению и адаптации, робастностью и способностью к развитию путем включения новых компонентов в состав системы управления, позволит применять предложенный ПМК назначения стратегии эффективной эксплуатации лезвийного инструмента непосредственно на металлорежущих станках с ЧПУ.

Использование предложенного ПМК позволит повысить эффективность промышленных технологий производства продукции машиностроения, в том числе и на предприятиях оборонно-промышленного комплекса путем:

- снижения основного технологического времени, требуемого на выполнение технологических операций на металлорежущем оборудовании;
- снижения вспомогательного времени, требуемого на обслуживание и замену лезвийного инструмента;
- снижения затрат на инструментальное обеспечение за счет его более рационального использования;
- снижения уровня брака, связанного с отказом лезвийного инструмента во время обработки.

Литература

1. Кузнецова И.Д., Фомина Н.В. Конкурентные преимущества предприятий торговли в рыночной среде // Современные наукоемкие технологии. Региональное приложение. 2017. № 4 (52). С. 79-86.
2. Астахов В.П. Принцип наименьшей энергии пластической деформации при разрушении как основа понимания и оптимизации обработки металлов резанием // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. 8-1. С. 141-153.

3. ГОСТ 27.004-85. Системы технологические. Термины и определения. М.: Издательство стандартов, 1986. 13 с.
4. Бондарь Н.Ю., Максимчук И.В. Система контроля работоспособности фрез на станках с ЧПУ // Современные научные исследования и инновации. 2014. № 6. Ч. 1. URL: <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/34050> (дата обращения: 29.03.2019).
5. Старков В.К. Обработка резанием. Управление стабильностью и качеством в автоматизированном производстве. М.: Машиностроение, 1989. 296 с.
6. Маркин И.Н. Стратегии эксплуатации и организации системы технического обслуживания и ремонта сложных технических систем // Наука и техника транспорта. 2016. № 3. С. 53-55.
7. Ивахненко Е.А., Зотов И.В., Червяков Л.М. Обоснование выбора показателей качества изделий машиностроения при принятых стратегиях реализации этапов их жизненного цикла // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 10 (71). С. 4-11.
8. Sandvik Coromant. Руководство по металлообработке. Стокгольм: AB Sandvik Coromant, 2006. 564 с.
9. Анцев А.В., Пасько Н.И. Особенности оптимизации режимов резания с учетом фактора случайности // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 9. С. 15-20.
10. Анцев А.В. Управление надежностью режущего инструмента с учетом фактора случайности процесса резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: Изд-во Орловского государственного университета им. И.С. Тургенева. 2018. № 4-2 (330). С. 90-102.
11. Обобщенная стохастическая модель отказов режущего инструмента и ее применение / Н.И. Пасько, А.В. Анцев, Н.В. Анцева, С.В. Сальников. Тула: Изд-во ТулГУ. 2016. 174 с.
12. Мартинов Г.М., Григорьев А.С. Диагностирование режущих инструментов и прогнозирование их остаточной стойкости на станках с ЧПУ в процессе обработки // СТИН. 2012. № 12. С. 23-27.
13. Кушнер В.С., Жавнеров А.Н., Удодова А.В. Повышение режущих свойств инструмента при обработке резанием жаропрочных сплавов // Омский научный вестник. 2011. № 2 (100). С. 20-23.
14. Верещака А.А. Функциональные покрытия для режущих инструментов // Вестник Брянского государственного технического университета. 2015. № 4 (48). С. 25-37.
15. Анализ точности профиля эвольвентных червячных фрез с твердосплавными СМП / О.И. Борискин, Н.Г. Стаханов, А.В. Якушенков, С.Я. Хлудов, И.В. Горынина // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 3. С. 143-146.
16. Макаренко К.В., Толстяков А.Н. Исследование стойкости многогранных неперетачиваемых пластин при токарной обработке термически упрочненной стали 40X2H2MA // Вестник Брянского государственного технического университета. 2018. № 6 (67). С. 11-15.
17. Уткин Е.Ф. Оценка влияния деформационных процессов в контактируемых зонах обрабатываемого и инструментального материалов на износ режущего инструмента // Известия Волгоградского государственного технического университета. 2007. 3 (29). Т. 1. С. 132-134.
18. Конструкторское и технологическое обеспечение точности обработки на станках с гибридной компоновкой / А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, А.В. Олейник, А.Ю. Алтухов, П.В. Чаплыгин // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2014. № 4. С. 15-22.
19. Анисеева О.В., Ивахненко А.Г., Куц В.В. Прогнозирование параметрической надежности прецизионного технологического оборудования // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2013. № 2 (298). С. 159-164.
20. Пат. 2566979 Российская Федерация, МПК G06N3/08. Способ обучения искусственной нейронной сети / Сальников В.С., Хоанг В.Ч., Анцев А.В.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет». № 2014150877; заявл. 15.12.2014; опубл. 27.10.2015, Бюл. № 30. 2 с.
21. Брагин Ю.В. Инженерные методы повышения качества и снижения затрат по Генити Тагути. Вып. 1. Функция потерь / В.В. Брагин. Ярославль: Центр качества, 2005. 68 с.
22. Кузьмин А.М. Методы Тагути // Методы менеджмента качества. 2007. № 5. С. 23.
23. Анцев А.В., Пасько Н.И. Оптимизация скорости резания и периода замены режущего инструмента в режиме статистической адаптации // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2019. Т. 15. № 4. С. 102 - 110.
24. Пасько Н.И., Анцев А.В. Оптимизация планово-предупредительной замены режущего инструмента по данным об износе и наработке // Известия ТулГУ. Технические науки. Тула: Изд-во ТулГУ. 2015. № 5-2. С. 257-265.
25. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы / пер. с польск. И.Д. Рудинского. М.: Горячая линия Телеком, 2006. 452 с.
26. Гаджинский А.М. Логистика: учебник для высших и средних специальных учебных заведений. 2-е изд. М.: Информационно-внедренческий центр "Маркетинг", 1999. 228 с.
27. Савушкин В.Н. Ситуационное управление ресурсом режущего инструмента: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.01; 05.02.23 / Савушкин Виктор Николаевич. Тула, 2002. 135 с.
28. Иноземцев А.Н., Пасько Н.И., Анцев А.В. Автоматизированное управление режимами резания на основе применения самообучающихся систем // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2012. № 2-6(292). С. 33-40.

Поступила 08.06.2019; принята к публикации 17.10.2019

Информация об авторах

Анцев Александр Витальевич – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Технология машиностроения», Тульский государственный университет (300012, Россия, г. Тула, пр. Ленина, 92), e-mail: a.antsev@yandex.ru

INFORMATION SUPPORT OF ASSIGNING THE CUTTING TOOL EFFICIENT OPERATING STRATEGY

A.V. Antsev

Tula State University, Tula, Russia

Abstract: the article considers the task of assigning a strategy for efficient operation of a cutting tool directly in the process of machining a batch of parts on a specific cutting machine, taking into account the variability of the cutting process. The operating strategy of the cutting tool is a set of principles and rules that ensure the specified control of the process of cutting tool operation by maintaining rational operation modes of the cutting tool and assigning work to restore it in accordance with the technical condition. The necessity of taking into account the variability of the cutting process in assessing the tool life and ensuring effective operation of the cutting tool is shown. To automate the process of assigning the cutting tool operating strategy in the self-learning mode, a program-methodical complex of the assignment of the strategy for efficient cutting tool operation is proposed. The proposed program-methodical complex allows to assign a cost-effective mode of prevention of the cutting tool, to assign rational cutting modes, to make a comparative assessment of the quality of the cutting tool of different manufacturers, to form a set of the cutting tool of the operation system and to calculate the rates of the cutting tool consumption taking into account the process variability cutting. The general method of application of the program-methodical complex of the purpose of the strategy of effective operation of the cutting tool is considered. Using the proposed program-methodical complex will improve the efficiency of industrial technologies for the production of engineering products, including at the enterprises of the military-industrial complex

Key words: operating strategy, optimization, cutting speed, replacement period, unit costs, information support, software and methodical complex

References

1. Kuznetsova I.D., Fomina N.V. "Competitive advantages of trade enterprises in the market environment", *Modern High Technologies. Regional Application (Sovremennye naukoymekie tekhnologii. Regional'noe prilozhenie)*, 2017, no.4 (52), pp. 79-86.
2. Astakhov V.P. "The principle of the least energy of plastic deformation during fracture as a basis for understanding and optimizing metal cutting", *Bulletin of Tula State University. Technical Science (Izvestiya Tul'skogo Gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*, 2016, no. 8-1, pp. 141-153.
3. GOST 27.004-85. "Technological systems. Terms and Definitions" ("Sistemy tekhnologicheskije. Terminy i opredeleniya"), Moscow, Publishing house of standards, 1986, 13 p.
4. Bondar N.Yu., Maksimchuk I.V. "The system for monitoring the operation of mills on CNC machines", *Modern Scientific Research and Innovation (Sovremennye nauchnye issledovaniya i innovatsii)*, 2014, no. 6, available at: <http://web.snauka.ru/issues/2014/06/34050>.
5. Starkov B.K. "Cutting. Management of stability and quality in automated production" ("Obrabotka rezaniem. Upravlenie stabil'nost'yu i kachestvom v avtomatizirovannom proizvodstve"), Moscow, Mashinostroenie, 1989, 296 p.
6. Markin I.N. "Strategies for the operation and organization of the system of maintenance and repair of complex technical systems", *Science and Technology of Transport (Nauka i tekhnika transporta)*, 2016, no 3, pp. 53-55.
7. Ivakhnenko E.A., Zotov I.V., Chervyakov L.M. "Justification of the choice of indicators of quality engineering products for the adopted strategies for the implementation of the stages of their life cycle", *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 10 (71), pp. 4-11.
8. Sandvik Coromant "Metalworking guide", Stockholm, AB Sandvik Coromant, 2006, 564 p.
9. Antsev A.V., Pasko N.I. "Peculiarities of cutting mode optimization taking into account random factor", *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 9, pp 15-20.
10. Antsev A.V. "Reliability management of the cutting tool considering randomness factor of cutting process", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2018, no. 4-2 (330), pp. 90-102.
11. Pasko N.I., Antsev A.V., Antseva N.V., Salnikov S.V. "Generalized stochastic model of cutting tool failures and its application" ("Obobshchennaya stokhasticheskaya model' otkazov rezhushchego instrumenta i ee primeneniye"), Tula, Publishing House of TSU, 2016, 174 p.
12. Martinov G.M., Grigoriev A.S. "Diagnosing cutting tools and predicting their residual durability on CNC machines during processing", *STIN*, 2012, no.12, pp. 23-27.
13. Kushner V.S., Zhavnerov A.N., Udodova A.V. "Improving the cutting properties of the tool when machining high-temperature alloys", *Omsk Scientific Bulletin (Omskiy nauchnyy vestnik)*, 2011, no. 2 (100), pp. 20-23.
14. Vereshchaka A.A. "Functional coatings for cutting tools", *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, no. 4 (48), pp. 25-37.
15. Boriskin OI, Stakhanov N.G., Yakushenkov A.V., Khludov S.Ya., Gorynina I.V. "Analysis of the accuracy profile of involute worm milling cutters with carbide SMP", *Bulletin of Tula State University. Technical Science (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*, 2016, no. 3, pp. 143-146.
16. Makarenko K.V., Tolstyakov A.N. "Investigation of the durability of multi-faceted non-reversible plates during the turning of heat-hardened steel 40X2H2MA" *Bulletin of Bryansk State Technical University (Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 6 (67), pp. 11-15.

17. Utkin E.F. “Assessment of the influence of deformation processes in the contact zones of the processed and tool materials on the wear of the cutting tool”, *News of Volgograd State Technical University (Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2007, no. 3 (29), vol. 1, pp. 132-134.
18. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Oleinik A.V., Altukhov A.Yu., Chaplygin P.V. “Design and technological support of machining accuracy on machines with a hybrid layout”, *Bulletin of South-West State University. Series: Technique and Technology (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii)*, 2014, no. 4, pp. 15-22.
19. Anikeeva O.V., Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. “Prediction of parametric reliability of precision process equipment”, *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2013, no. 2 (298), pp. 159-164.
20. Salnikov V.S., Hoang V.Ch., Antsev A.V. . “Training method of artificial neural network” (“Sposob obucheniya iskusstvennoy neyronnoy seti”), patent 2566979 Rus. Federation: IPC G06N3 / 08.; byul. 30, 2 p.
21. Bragin Yu.V. “Engineering methods for improving quality and reducing costs according Geniti Taguchi. Issue 1. The loss function” (“Inzhenernye metody povysheniya kachestva i snizheniya zatrat po Geniti Taguti”), Yaroslavl’, Quality Center, 2005, 68 p.
22. Kuzmin A.M. “Taguchi methods”, *Methods of Quality Management (Metody menedzhmenta kachestva)*, 2007, no. 5, pp. 23.
23. Antsev A.V., Pasko N.I. “Optimization of the cutting speed and the cutting tool Replacement period in the statistical adaptation mode”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2019, vol. 15, no. 4, pp. 102-110.
24. Pasko N.I., Antsev A.V. “Optimization of cutting tool’s scheduled replacement based on wear and operation time data”, *Bulletin of Tula State University. Technical Science (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*. 2015, no. 5-2, pp. 257-265.
25. Rutkovskaya D., Pilinsky M., Rutkovsky L. “Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems” (“Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy), Trans. from polish I.D. Rudinsky, Moscow, Goryachaya Liniya Telecom, 2006, 452 p.
26. Gadzhinsky A.M. “Logistics: Textbook for higher and secondary special educational institutions” (“Logistika: Uchebnik dlya vysshikh i srednikh spetsial'nykh uchebnykh zavedeniy”), Moscow, Marketing Information Center «Marketing», 1999, 228 p.
27. Savushkin V.N. “Situational management of the resource of the cutting tool” (“Situatsionnoe upravlenie resursom rezhushchego instrumenta”): Cand. tech. Sciences Diss., TSU, Tula, 2002, 135 p.
28. Inozemtsev A.N., Pasko N.I., Antsev A.V. “Automated control of cutting conditions based on the use of self-learning systems”, *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2012, no. 2-6 (292), pp. 33-40.

Submitted 08.06.2019; revised 17.10.2019

Information about the author

Aleksandr V. Antsev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Tula State University (92 Lenina Ave., Tula 300012, Russia), e-mail: a.antsev@yandex.ru

АНАЛИЗ МОРФОЛОГИИ СТРУЖКИ, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ВЫСОКОПРОИЗВОДИТЕЛЬНОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ

М.В. Вилкина

Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова,
г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: данное исследование направлено на изучение морфологии стружки, полученной методом высокопроизводительного фрезерования (ВПФ) на станке с ЧПУ со средними кинематическими и силовыми характеристиками путем фрезерования высококачественной легированной стали для четырех уровней производительности с повышением режимов резания и средней толщины стружки. Полученные образцы стружки были сгруппированы по уровню обработки, после чего на электронном микроскопе были получены микроснимки образцов каждой группы и проведен их морфологический анализ с целью установления оптимальных условий ВПФ. На основе результатов современных исследований в данной области удалось установить оптимальную границу повышения динамики обработки, в пределах которой можно ожидать снижения износа инструмента, связанного с термическими эффектами и адгезией. Глубина обработки превышала 2 диаметра фрезы, при этом были найдены оптимальные условия резания, при которых опасные для инструмента явления адиабатического сдвига не проявляются и стружка по общей классификации по своей морфологии близка к сливной. При этом благодаря рассчитанной в САМ системе траектории ВПФ стружка имеет постоянную толщину и сегментирована достаточно, чтобы удовлетворять условиям автоматизированного производства

Ключевые слова: резание металлов, высокопроизводительное фрезерование, морфология стружки, повышение производительности

Введение

Лезвийная обработка методом фрезерования занимает ведущее место в машиностроении. Задача сокращения затрачиваемого машинного времени и повышения производительности данного метода служит причиной внедрения новейших технологий в данной области. Помимо широко известного метода высокоскоростного фрезерования, сегодня интенсивно внедряются в производство метод высокопроизводительного и высокоподачного фрезерования [1]. Воплощение данных технологий стало возможным благодаря комплексному развитию металлорежущих станков с ЧПУ, инструментальных материалов и геометрии режущего инструмента, а также систем программирования станков с ЧПУ. Особый интерес представляет изучение вопросов, связанных с практикой применения данных новейших методов обработки: условий использования, ограничений, накладываемых внешней средой, номенклатурой изделий, техническими и технологическими особенностями производства. Также, с экономической точки зрения, актуальным предметом исследования является возможность применения новейших методов с минимальными затратами. Данная работа по-

священа анализу применения метода высокопроизводительного фрезерования на станках с ЧПУ общего назначения, без использования специализированного оборудования. Под специализированными в данной работе понимаются станки с ЧПУ, предназначенные для обработки определенных материалов или реализации определённых производительных методик, таких как высокоскоростное фрезерование [2, 3]. Неспециализированным называют станки общего назначения, не отличающиеся повышенной жесткостью конструкции, мощным или скоростным шпинделем и т.д. Так, максимальная частота шпинделя, устанавливаемого на подобное оборудование, достигает 8 000 – 10 000 об/мин. [4].

Метод ВПФ имеет несколько отличительных характеристик, по которым оценивается эффективность его применения [5]. Во-первых, за основную характеристику процесса принимается так называемая объемная производительность резания. Данная величина рассчитывается как объем металла, удаленный за единицу времени. Главной целью ВПФ является оптимизация объемной производительности резания, а следовательно, сокращение машинного времени. Во-вторых, при ВПФ максимально используется поверхность инструмента вдоль его режущей кромки, и глубина резания может достигать четырех диаметров фрезы. Данное условие является ключевым фактором

повышения производительности. Траектория ВПФ имеет сложную геометрию, она рассчитывается таким образом, чтобы толщина стружки была постоянной, при этом величина контакта фрезы с материалом, скорость и подача становятся переменными величинами [4].

Резание металлов с образованием стружки является комплексным физическим процессом. Необходимую основу для оптимизации процесса резания и разработки технологических рекомендаций по построению операций лезвийной обработки деталей современной техники представляют исследования физических явлений, протекающих в зоне контакта инструмента с деталью. Анализ морфологии стружки, полученной изучаемым методом фрезерования, позволяет судить о деформационных, температурных, силовых процессах в зоне резания при управляемых переменных режимах обработки. Также интерес представляют изучение и прогнозирование уровня вибраций и их влияния на состояние обрабатываемой поверхности при ВПФ, которое также производится на основе анализа образцов стружки [6].

Анализ морфологии стружки, в первую очередь, затрагивает вопрос определения типа модели, по которой возникают изучаемые образцы. В целом выделяют три вида стружки: сливная, элементная и стружка надлома. Но для процессов современного скоростного и высокоподачного фрезерования, когда стружка в любом случае будет разделена на сегменты, четких границ зачастую не наблюдается, и стружку рассматривают как элементную, особое внимание направляя на ее зубчатую структуру, выделяющуюся на микроснимках.

На данный момент исследователи выделяют три теории формирования зубчатой структуры стружки в зависимости от скорости пластической деформации и свойств обрабатываемого материала. Исследования советских ученых, таких как Бобров, Лоладзе, Клушин и др., относящиеся к 50-70 гг. прошлого века [7], дополнились современными разработками западной науки, в большей степени тяготеющими к практическому применению на современном оборудовании с ЧПУ и с использованием ISO инструментальных материалов, особенно твердых сплавов с покрытиями.

Первая теория формирования зубчатой структуры стружки рассматривает главной причиной эффект адиабатического разогрева зоны сдвига теплом, образующимся при

пластическом деформировании срезаемого слоя с высокой скоростью деформации [8]. Вторая теория принадлежит Виас и Шоу (Vyas и Shaw) (1999) [9] и называется теорией циклического разрушения или надлома. Согласно ей, основной причиной зубчатого строения стружки является образование в срезаемом слое материала системы трещин. Разделение методов по признаку чувствительности к адиабатическому сдвигу привело к появлению третьей теории, объединяющей оба механизма. Бай и Додд (Bai и Dodd) [10] предположили, что полоса адиабатического сдвига предшествует разрушению, которое происходит в две стадии. Сначала происходит термическое разупрочнение материала, а затем разрушение. Экспериментально доказано, что трещины проходят вдоль полос адиабатического сдвига [11].

Приведенные исследования и выводы нашли свое наиболее наглядное подтверждение в экспериментальных исследованиях Ванг и Жаньцян (Wang, Zhanqiang) (2013) [12]. В указанной работе показана зависимость морфологии стружки от динамических свойств обрабатываемого материала и режимов резания. Фрезерной обработке на разных режимах подвергались два вида материала: алюминиевый сплав и углеродистая сталь. При этом авторы выявили одинаковые законы изменения морфологии полученной стружки, отличие заключалось лишь в скоростях резания, при которых эти изменения возникали. Соответственно, подтверждая третью теорию образования зубчатой стружки, ключевой особенностью явилась именно чувствительность материала заготовки к адиабатическому сдвигу (рис. 1), на который, в свою очередь, наибольшее влияние оказали скорость резания и подача. Уровень сегментации зубчатых вершин образцов стружки зависит от пластичности материала. Исследуемому алюминиевому сплаву потребовалась большая скорость резания, чем стали, чтобы достигнуть тех же значений сегментации. Показано, что повышения только скорости резания недостаточно, чтобы получить полезное разупрочнение материала при резании. Увеличение подачи без резкого увеличения скорости резания позволяет достигнуть положительного эффекта, при этом избежать чрезмерного нагрева в зоне резания и, как следствие, уменьшить износ инструмента и компенсировать негативные температурные последствия.

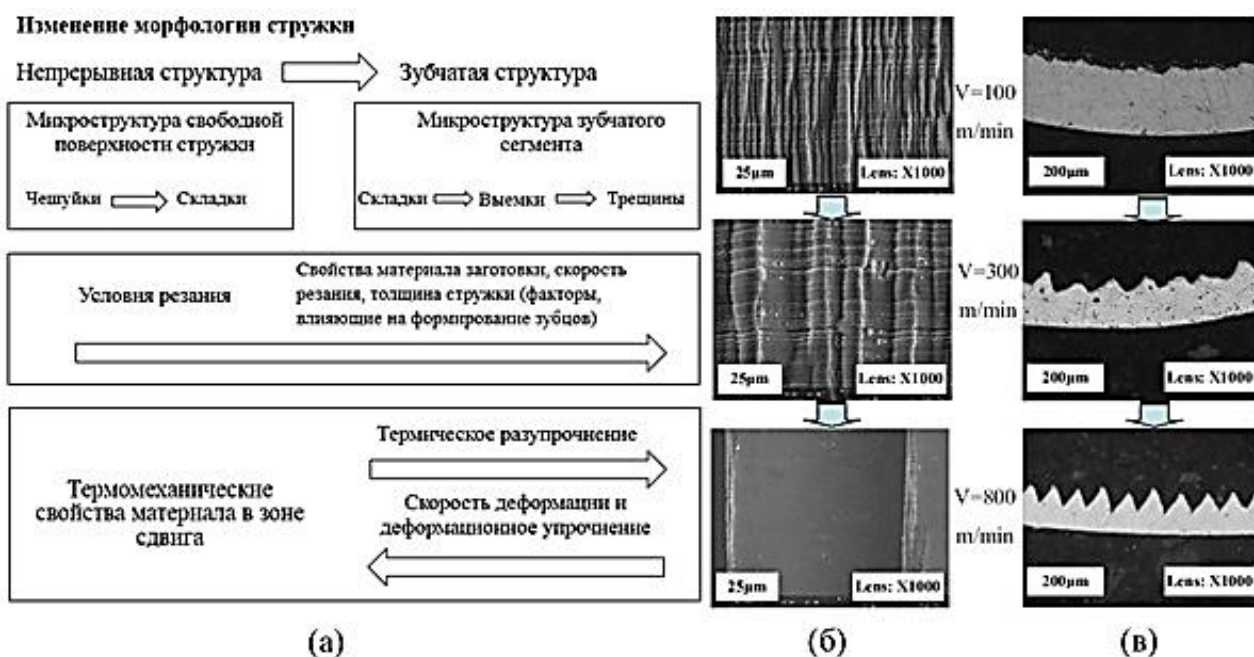


Рис. 1. а - изменение морфологии стружки в зависимости от условий резания и поведения материала в зоне сдвига; б - микрографические снимки свободной поверхности стружки AISI 1045 (сталь 45) при разной скорости резания, толщина стружки 0,1 мм; в - микрографические снимки шлифов образцов стружки, соответствующих (б)

Таким образом, изучение морфологии полученной в результате серии экспериментов стружки в сочетании с новейшими исследованиями производительных методов фрезерования позволит провести анализ оптимальных условий использования ВПФ на станках общего назначения, а также качественно оценить достигнутый уровень производительности резания.

Методика проведения исследования

Исследование направлено на изучение морфологии стружки, полученной высокопроизводительным фрезерованием легированной высококачественной стали 12ХН3А на станке AWEA AF-1000, оснащённом 7,5 кВт шпинделем, имеющим максимальную скорость в 10 000 об/мин. (средние кинематические и силовые характеристики).

В ходе исследования применялся комплекс технологических параметров четырех уровней, характеризующихся разной степенью производительности, с фиксацией состояния технологической системы во время резания и последующим изучением морфологии образцов стружки для каждого уровня обработки.

Обработка производилась твердосплавной фрезой производства SGS (табл. 1) для четырех уровней производительности с повышением режимов резания и средней толщиной стружки, при этом глубина резания оставалась неизменной и составляла 26 мм. Закрепление инструмента происходило в цанговый патрон, глубина резания превышала 2D фрезы. Технологические параметры для каждого уровня указаны в табл. 2.

Таблица 1

Характеристики режущего инструмента

Характеристики	Значения
Полное наименование	SGS 45103 12
Диаметр фрезы, мм	12
Количество зубьев	6
Длина режущей части, мм	26
Угол подъема стружечной канавки, град.	41
Материал фрезы	Твердый сплав
Покрытие	Ti-NAMITE-X

Технологические параметры уровней производительности

Название параметра	Уровень			
	1	2	3	4
Толщина стружки, мм	0,052	0,058	0,064	0,07
Скорость резания, м/мин	42	72	84	90
Среднее значение скорости вращения шпинделя, об/мин	1120	1908	2226	2410
Среднее значение подачи, мм/мин	1110	2121	2512	2360
Среднее значение подачи, мм/зуб	0,163	0,185	0,188	0,196
Объемная производительность резания, мм ³ /сек	113	207	233	275

Состояние технологической системы фиксировалось в процессе обработки: однородность стружки (размер и цвет), температура, износ покрытия и геометрии фрезы. Во время резания смазочно-охлаждающие технологические средства (СОТС) не применялись, т.к. это могло привести к сокращению стойкости инструмента [13]. Также использование СОТС не желательно по причине искажения картины микроструктуры образцов стружки с точки зрения влияния адиабатического сдвига. В процессе обработки фиксировались колебания температуры в зоне резания, температуры инструмента и заготовки после резания. Измерения осуществлялись инфракрасным пирометром SEM DT-8863 481691.

Полученные образцы стружки были сгруппированы по уровню обработки, после чего на электронном микроскопе были получены микроснимки образцов каждой группы и проведен их морфологический анализ.

Результаты исследования и их обсуждение

Внешний вид полученных образцов стружки показан на рис. 2. Образцы для пер-

вых трех уровней обработки не имеют внешних следов влияния температуры, однако для образцов четвертого уровня наблюдается потемнение прирезцово́й поверхности. Зафиксированные температуры показаны в табл. 3. Распределение температур для наиболее агрессивного уровня обработки фиксировалось тепловизором Testo 875 и показано на рис. 3.

С целью установления оптимальных условий ВПФ были изучены микроснимки образцов стружки и соотнесены с зафиксированными температурами. На снимках, как и в работе [13], отчетливо прослеживаются стадии деформации до состояния видимости полос адиабатического сдвига, но без критического сегментирования, что объясняется ограничениями технологической системы, а именно, характеристиками станка. При попытке поднять уровень резания, увеличить толщину стружки и динамику обработки срабатывает автоматическая система предотвращения перегрузок и станок останавливается.



Рис. 2. Внешний вид стружки в зависимости от уровня обработки

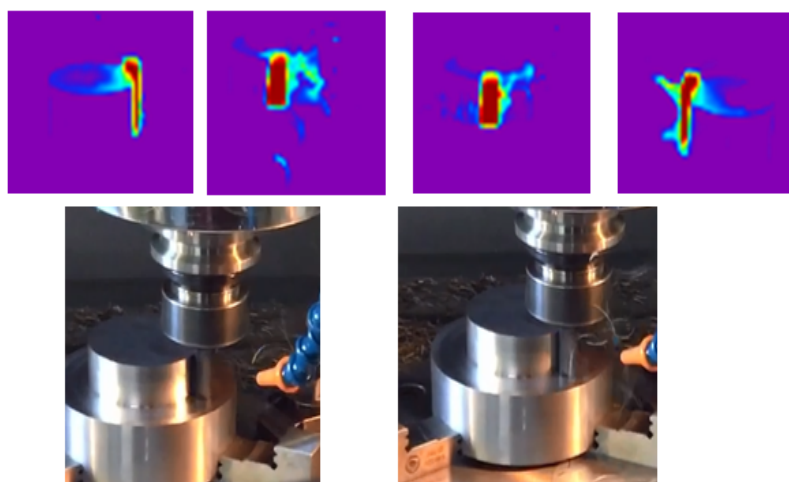


Рис. 3. Распределение температур для четвертого уровня обработки

Таблица 3

Зафиксированная максимальная температура для разных уровней обработки

Зафиксированная максимальная температура, град. Цельсия	Уровень			
	1	2	3	4
В зоне резания	80	86	105	120
Фрезы после остановки	50	60	70	60
Заготовки после остановки	30	40	50	70

Таким образом, полученный уровень производительности является оптимальным с точки зрения характеристик оборудования. Для оценки вероятности инструментального износа по причине адиабатного сдвига, как доминирующего процесса деформации, использовались микроснимки образцов стружки. Снимки получены с помощью сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA3. На снимках отчетливо видны складчатые сегменты, которые согласно исследованию [12], являются началь-

ной стадией на пути образования зубчатой стружки. Указанные сегменты морфологически отличаются в зависимости от уровня обработки. Так, на первом уровне данные структуры практически не различимы, а к четвертому формируются совершенно отчетливо. Благодаря отличному качеству снимков удалось установить средний размер рассматриваемых структур. На рис. 4 показаны снимки с указанием размера формирующихся сдвиговых складок и соответствующий им уровень обработки.

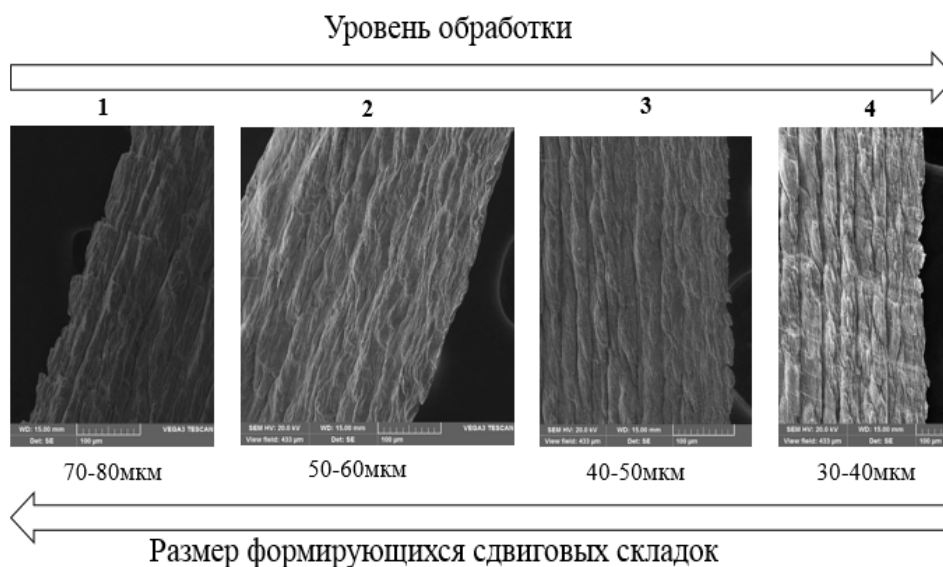


Рис. 4. Микроснимки образцов стружки

Анализ снимков показывает, что характерные адиабатические полосы возникают для четвертой группы образцов, то есть для верхнего уровня производительности, применимого к данной неспециализированной технологической системе. Согласно работе [14], при высоких режимах резания адиабатный сдвиг – доминирующий процесс деформации, который имеет место в основной зоне резания. Появление адиабатной полосы сдвига увеличивает износ инструмента и влияет на качество обрабатываемой поверхности. Однако авторы находят данное явление полезным из-за возникновения элементной стружки, которая является обязательным условием при автоматизированной обработке. Для обработки методом ВПФ, напротив, на первое место следует поставить вопрос инструментального износа, т.к. при фрезеровании на всю глубину режущей части твердосплавной фрезы с сохранением постоянной толщины стружки последняя однородна и достаточно сегментирована для автоматизированного производства. Таким образом, из четырех уровней производительности, указанных в табл. 3, оптимизированным по величине объемной производительности резания, применимости на неспециализированной технологической системе и прогнозируемому инструментальному износу является третий уровень.

Основные результаты и выводы

Существенное сокращение машинного времени достигается применением высокопроизводительного фрезерования, при этом, в отличие от высокоскоростного фрезерования, данный метод можно успешно внедрять на неспециализированном оборудовании. Снижая таким образом требования к технологической системе, производство повышает экономическую эффективность обработки. Также экологический и экономический интерес представляет возможность сократить использование СОТС.

Полученные результаты морфологического анализа образцов стружки не противоречат современной теории, определяющей степень обрабатываемости материала по его динамическим свойствам или чувствительности к адиабатическому сдвигу. Более того, основываясь на результатах современных исследований в данной области, удалось установить оптимальную границу повышения динамики обработки, оставаясь в пределах которой можно ожидать снижения износа инструмента, связанного с термическими эффектами и адгезией.

Таким образом, с одной стороны, обработка методом ВПФ на станках общего назначения

уступает по производительности этим же методикам на специализированном оборудовании с более мощными и скоростными шпинделями, с другой – существенно превосходит принятые традиционные методы фрезерования, когда режимы резания остаются постоянными, а угол контакта фрезы с материалом и толщина стружки изменяются. В исследовании обработке подвергалась легированная высококачественная сталь 12ХНЗА. Глубина обработки превышала 2 диаметра фрезы, при этом были найдены оптимальные условия резания, при которых опасные для инструмента явления адиабатического сдвига не проявляются и стружка по общей классификации по своей морфологии близка к сливной. Благодаря рассчитанной в САМ системе траектории ВПФ стружка имеет постоянную толщину и сегментирована достаточно, чтобы удовлетворять условиям автоматизированного производства.

Литература

1. High Performance Cutting (HPC) in the New Era of Digital Manufacturing/ G. Byrne et al.//7th HPC 2016– CIRP Conference on High Performance Cutting. 2016. Pp. 1-6.
2. Звонцов И.Ф., Иванов К.М., Серебренникий П.П. Разработка управляющих программ для оборудования с ЧПУ: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2018. С. 477-482.
3. Станки с ЧПУ для высокоскоростного фрезерования Датрон. URL: <http://www.datron.de>
4. Вилкина М.В. Применение метода высокопроизводительного фрезерования для резания конструкционных сталей//Вектор науки Тольяттинского государственного университета. 2017. № 3 (41). С. 35-39
5. Hnatik J., Kutlwaser J., Sklenicka J. Machining Cutting Force Measurement. In: Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium. 2016. Pp. 0955-0959.
6. Афонасов А.И., Ласуков А.А. Процесс элементного стружкообразования // Вестник машиностроения. 2013. № 12. С. 69-72.
7. Клушин М.И. О физических основах сверхскоростного резания металлов // Сборник трудов Горьковского политехнического института. 1961. Т. XVII. Вып. 4. С. 15-22.
8. Fourment L., Delalondre F.A. 3D study of the influence of friction on the Adiabatic Shear Band formation during High Speed Machining. In: Proceedings of the ESAFORM 2008 conference. 2008. Pp.723-728.
9. Vyas A., Shaw M.C. Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting. J Manuf Sci Eng. 1999. № 121. Pp. 163–72.
10. Bai Y., Dodd B. Adiabatic shear localisation: occurrence, theories and applications. Pergamon Press. 1992. Pp. 256-328.
11. Hot deformation and microstructural damage mechanisms in extra-low interstitial (ELI) grade Ti–6Al–4V/ T. Seshacharyulu, S. Medeiros, J. Morgan, J. Malas, W. Frazier, Y. Prasad. Mater Sci Eng A. 2000. № 279. Pp. 289–299.
12. Wang B., Zhanqiang L. Serrated chip formation mechanism based on mixed mode of ductile fracture and adiabatic shear. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B// Journal of Engineering Manufacture. 2013. № 228. Pp. 181-190.
13. Resource and Energy Efficiency in Machining Using High Performance and Hybrid Processes/ R. Neugebauer

et al. //5th CIRP Conference on High Performance Cutting. 2012. Pp. 3-15.

14. Ласуков А.А., Чазов П.А., Барсуков А.В. Изучение процесса элементного стружкообразования при реза-

нии труднообрабатываемых материалов // Инновационные технологии и экономика в машиностроении: сб. тр. V Междунар. науч.-практ. конф. В 2 тт. Томск: Изд-во ТПУ, 2014. Т. 1. С. 290-294.

Поступила 10.06.2019; принята к публикации 17.10.2019

Информация об авторах

Вилкина Марина Валерьевна - аспирант, инженер кафедры «Технология и производство артиллерийского вооружения», Балтийский государственный технический университет «ВОЕНМЕХ» им. Д.Ф. Устинова (190005, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. 1-я Красноармейская, 1), e-mail: m.vilkina@mail.ru

MORPHOLOGY ANALYSIS OF CHIPS OBTAINED AFTER CUTTING WITH HIGH PERFORMANCE MILLING METHOD

M.V. Vilkina

Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov, Saint-Petersburg, Russia

Abstract: the paper is aimed at studying the morphology of chips obtained by high-performance milling (HPM) on the CNC machine with average kinematic and force characteristics by milling of high-quality alloy steel for four levels of performance with higher cutting data and average chip thickness. The samples of chips were grouped by treatment level, after which the electron microscope obtained micro pictures of the samples from each group; and we carried out morphological analysis to establish the optimal conditions of HPM. Based on the results of current research in this area, we managed to establish optimal border enhancing handling dynamics, while remaining within which we can expect a decrease in the tool wear associated with thermal effects and adhesion. The depth of treatment exceeds 2 times the diameter of the cutter, thus it was found the optimum cutting condition, in which the phenomena of adiabatic shear does not appear and the chips on the General classification in their morphology are close to the continuous. Thanks to the calculated in CAM system trajectory, HPM chip has a constant thickness and segmented enough to satisfy the conditions of the automated production

Key words: metal cutting, high performance milling, chips morphology, improving performance

References

1. Byrne G. et al. "High performance cutting (HPC) in the new era of digital manufacturing", *7th HPC 2016 – CIRP Conference on High Performance Cutting*, 2016, pp.1-6
2. Zvontsov I.F., Ivanov K.M., Serebrenitskiy P.P. "Preparation of code for CNC machines" ("Podgotovka upravlyayushchikh programm dlya oborudovaniya s ChPU"), Saint Petersburg, Lan' Publ., 2018, 558 p.: 477-482
3. "Datron CNC machines for HSM", available at: <http://www.datron.de>
4. Vilkina M.V. "Appling of high performance milling approach for cutting of structural steel", *Vector of Science of Tolyatti State University* (*Vektor Nauki Tol'yatinskogo Gosudarstvennogo Universiteta*), 2017, no. 3 (41), pp. 35-39
5. Hnatic J., Kutlwaser J., Sklenicka J. "Machining cutting force measurement", *Proceedings of the 26th International DAAAM Symposium*, 2016, pp.0955-0959
6. Afonassov A.I., Lasukov A.A. "Serrated chips production process", *Bulletin of Mechanic Engineering (Vestnik Mashinostroeniya)*, 2013, no.12, pp. 69-72.
7. Klushin M.I. "About physical basis of superspeed metal cutting", *Coll. Papers of Gorky Polytechnic Institute (Sbornik trudov Gorkinskogo Gosudarstvennogo Universiteta)*, 1961, vol. XVII, no. 4, pp. 15-22.
8. Fourment L., Delalondre F.A. "3D study of the influence of friction on the Adiabatic Shear Band formation during High Speed Machining", *Proceedings of the ESAFORM2008 Conference*, 2008, pp. 723-728
9. Vyas A. Shaw M.C. "Mechanics of saw-tooth chip formation in metal cutting", *J. Manuf. Sci. Eng.*, 1999, vol. 121, pp. 163-72.
10. Bai Y., Dodd B. "Adiabatic shear localisation: occurrence, theories and applications, Pergamon Press, 1992, pp. 256-328
11. Seshacharyulu T., Medeiros S., Morgan J., Malas J., Frazier W., Prasad Y. "Hot deformation and microstructural damage mechanisms in extra-low interstitial (ELI) grade Ti-6Al-4V", *Mater. Sci. Eng., A*, 2000, vol. 279, pp. 289-99.
12. Wang B., Zhanqiang L. "Serrated chip formation mechanism based on mixed mode of ductile fracture and adiabatic shear", *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 2013, vol. 228, pp. 181-190.
13. Neugebauer R. et al. "Resource and energy efficiency in machining using high performance and hybrid processes", *5th CIRP Conference on High Performance Cutting*, 2012, pp. 3-15
14. Lasukov A.A., Chazov P.A., Barsuk A.V. "Studing of serrated chips formation during cutting of difficult-to-machine materials", *Innovation Technologies and Economics in Mechanical Engineering: collected papers of V International Scientific-Practical Conference*, Yurga, 2014, vol. 1, pp. 290-294.

Submitted 10.06.2019; revised 17.10.2019

Information about the author

Marina V. Vilkina, Graduate student, engineer of Process and Manufacturing engineering of Artillery equipment Department, Baltic State Technical University «VOENMEH» named after D.F. Ustinov (1 Krasnoarmeyskaya, Saint-Petersburg 190005, Russia), e-mail: m.vilkina@mail.ru