

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Интеллектуальная система планирования гибкого автоматизированного производства А.Д. Данилов, В.А. Ломакин.....	7
Применение генетического алгоритма для очистки цифрового изображения от коррелированного шума О.С. Бучнев.....	12
Решение задачи дифференциальной игры для группы агентов на основе принципа роевого интеллекта С.В. Иванов, Д.Г. Белоножко, И.Д. Королев, Н.Я. Половинчук, М.Ю. Жукова.....	18
Робастное квазиравдоподобное оценивание параметров моделей непрерывно-дискретных систем В.М. Чубич, С.О. Кулабухова.....	28
Исследование следящей системы с астатическим модальным регулятором в MATLAB А.П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, Ю.Н. Каревская.....	35
Система контроля и управления доступом на предприятие: понятие, характеристика и основные требования А.Е. Козлов.....	42
Хранение данных процесса в информационных системах специального назначения Д.В. Терехов, А.Д. Данилов.....	48

Радиотехника и связь

Применение программно-аппаратных средств при проектировании цифровых электроизмерительных приборов Н.Н. Цыбов.....	57
Кольцевая антенная решетка из петлевых вибраторов Пистолькорса с резистивными нагрузками в контурах протекания токов А.В. Ашихмин, Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, П.В. Першин, Ю.А. Рембовский, С.М. Федоров.....	69
Современное состояние CAD/CAE-систем для анализа электромагнитной совместимости в задачах оптимального проектирования конструкций радиоэлектронных средств М.А. Ромащенко, Д.С. Сеимова.....	73
Сферическая линза Люнеберга на основе печатных плат с электрически малыми рассеивателями К.А. Быков, Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров.....	78

Машиностроение и машиноведение

Особенности разработки технологии электроэрозионно-плазменного нанесения покрытий на металлы Е.В. Смоленцев, М.В. Кондратьев, О.Г. Меньшикова.....	84
Технология комбинированной обработки рабочего канала в высокоресурсных форсунках из минералокерамических материалов С.В. Сафонов, Е.А. Салтанаева, О.В. Скрыгин.....	91
Механизм формирования высокоресурсного термостойкого покрытия В.П. Смоленцев, А.И. Портных, Е.В. Паничев.....	96

Моделирование газодинамического тракта тарельчатого сопла жидкостного ракетного двигателя с обратным потоком в кольцевой камере сгорания К.В. Косовягин, Г.И. Скоморохов.....	100
Автоматизированный выбор и проектирование элементов системы управления гибкого автоматизированного производства Дж.Ф. Мамедов, Г.С. Абдуллаев, Ш.Т. Мамедова, Б.А. Валиева, О.И. Попова.....	107
Технологические режимы плазменного нанесения многослойных термозащитных покрытий А.И. Портных, В.П. Смоленцев, Е.В. Паничев.....	112
Формообразование панелей крыла дальнемагистрального самолета Д.С. Гребенников, В.И. Максименков.....	116
Анализ современного состояния финишных методов обработки в среде свободных абразивов деталей, имеющих малые пазы и отверстия М.А. Тамаркин, Е.В. Смоленцев, Е.Н. Колганова.....	122
Моделирование процесса механической обработки с целью оптимизации режимных параметров Д.М. Черных, Ю.С. Ткаченко, В.С. Цыганов.....	130

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Intelligent system of flexible automated manufacturing scheduling A.D. Danilov, V.A. Lomakin	7
Application of a genetic algorithm for cleaning a digital image from correlated noise O.S. Buchnev	12
Solution to the problem of differential game for a group of agents based on the principle of swarm intelligence S.V. Ivanov, D.G. Belonozhko, I.D. Korolev, N.Ya. Polovinchuk, M.Yu. Zhukova	18
Robust quasi-likelihood estimation of the parameters of the continuous-discrete system models V.M. Chubich, S.O. Kulabukhova	28
Study of tracking system with astatic modal regulator in MATLAB A.P. Kharchenko, Yu.S. Slepokurov, Yu.N. Karevskaya	35
Control system and access control in the enterprise: concept, characteristics and basic requirements A.E. Kozlov	42
Storage of process data in information systems of special purpose D.V. Terekhov, A.D. Danilov	48

Radio engineering and communication

Using software and hardware tools in the design of digital electrical measuring devices N.N. Tsybov	57
Annular antenna grid of pistolkor loop vibrators with resistant loads in the current circuits A.V. Ashihmin, L.N. Korotkov, Yu.G. Pasternak, P.V. Pershin, Yu.A. Rembovskiy, S.M. Fedorov	69
Modern condition of CAD/CAE systems for the analysis of electromagnetic compatibility in the problems of optimal design of radio electronic facilities M.A. Romashchenko, D.S. Seimova	73
Spherical Luneberg lens on the basis of printed boards with electrically small diffusers K.A. Bykov, L.N. Korotkov, Yu.G. Pasternak, R.E. Rogozin, S.M. Fyedorov	78

Mechanical engineering and science of machines

Features of technology development of electro-erosion-plasma application of metal coatings E.V. Smolentsev, M.V. Kondrat'ev, O.G. Men'shikova	84
Technology of combined processing of the working channel in high-resource nozzles from mineral ceramic materials S.V. Safonov, E.A. Saltanaeva, O.V. Skrygin	91
Mechanism of formation of high-life heat-resistant coating V.P. Smolentsev, A.I. Portnykh, E.V. Panichev	96
Design of the gas dynamic tract of the disc nozzle of a liquid rocket engine with reverse flow in an annular combustion chamber K.V. Kosovyagin, G.I. Skomorohov	100
Automation choosing and design of the control system elements of flexible automation manufacture J.F. Mamedov, Q.S. Abdullaev, Sh.T. Mamedova, B.A. Valieva, O.I. Popova	107
Process conditions for plasma laying of multilayer protective coatings A.I. Portnykh, V.P. Smolentsev, E.V. Panichev	112
Shaping wing panels of a long-haul aircraft D.S. Grebennikov, V.I. Maksimenkov	116

Analysis of the modern condition of deburring details having small grooves and holes in the media of free abrasives

М.А. Тамаркин, Е.В. Смолентsev, Е.Н. Колганова..... 122

Machining modeling to optimize process parameters

Д.М. Черныkh, Ю.С. Tkachenko, В.С. Tsyganov..... 130

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.1.001

УДК 004.023

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНАЯ СИСТЕМА ПЛАНИРОВАНИЯ ГИБКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

А.Д. Данилов, В.А. Ломакин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в современных производственных системах в вопросах оптимизации загрузки технологического оборудования и сокращения времени изготовления продукции ключевую роль играет система календарного планирования. В данной статье представлена методика оптимизации нагрузки на производственные мощности, учитывающая группу критериев, которые характерны для металлообрабатывающих предприятий. Задача календарного планирования представляется в виде взвешенного графа, который необходимо сориентировать, целевыми функциями являются время выполнения плана и нагрузка на технологическое оборудование. В качестве эффективного метода решения данных производственных проблем используется алгоритм муравьиных колоний, который отлично решает задачи большой размерности и задачи, имеющие графовую интерпретацию. На начальном этапе, в процессе создания технологических карт, в целях предварительной оптимизации, производится кластеризация по типу и очередности выполнения технологических операций над деталями. Для удовлетворения потребностей гибкого, быстросменного производства вводится матрица приоритетов деталей, благодаря данному улучшению алгоритма, в первую очередь будут изготавливаться изделия, которые наиболее важны для производства и выполнения заказа точно в срок. Следующим шагом выполняются расчет оптимального плана загрузки и визуализация построенных решений в виде таблиц, ориентированного графа и диаграммы Ганта

Ключевые слова: теория расписаний, календарное планирование, интеллектуальные системы, алгоритм муравьиной колонии, кластеризация

Введение

Мощность и стабильность производства во многом определяются решениями, применяемыми на этапах создания производственных расписаний и оперативного управления. Эффективное календарное планирование позволяет на предприятии экономить время и ресурсы на производство продукции, оперативно реагировать на изменение спроса рынка. В частности, согласно теории расписаний задача календарного планирования сводится к упорядочиванию отдельных операций по исполнителям и по времени с целью сокращения времени изготовления продукции [1].

Актуальность проблемы

Для любого производства можно синтезировать множество возможных вариантов загрузки оборудования, основной сложностью является то, что число таких вариантов обычно оказывается большим и растет экспоненциально с ростом размерности. Также для производственных систем характерны нарушения процесса изготовления продукции, связанные

с отраслевыми особенностями. Так, на металлообрабатывающих предприятиях можно столкнуться с различными дефектами заготовок, которые могут обнаружиться на различных стадиях обработки деталей, что, в итоге, станет причиной задержки производства. Также негативно на сроки изготовления продукции влияет нестабильно работающее оборудование, несвоевременная подача заготовок и инструмента и другие нештатные ситуации. Кроме того, расписание может быть составлено с неравномерной загрузкой станочного парка, что приведет к износу узлов оборудования и дальнейшей поломке. Все это ведет к неизбежной корректировке существующего календарного плана.

Таким образом, актуальными проблемами календарного планирования на металлообрабатывающих предприятиях являются оптимизация составления расписаний, которая позволит равномерно распределить нагрузку между обрабатывающими единицами, а также введение возможности осуществления корректировок в производственный план в случае выхода из строя станочного оборудования или останковки его на плановый ремонт.

Данная проблема широко освещается с точки зрения многостадийных систем в работах

В.С. Танаева, Ю.Н. Сотскова, В.А. Струсевича, В.В. Шкурбы. В работах А.А. Лазарева и Е.Р. Гафарова представлены некоторые алгоритмы оптимизации составления расписаний для технологического оборудования [2, 3].

Постановка задачи

Таким образом, для решения задачи оптимизации календарного планирования необходимо выбрать наилучшее расписание, которое минимизирует время производства продукции [4].

Гибкое автоматизированное производство представляется в виде многостадийной системы. Процесс изготовления изделий состоит из нескольких последовательных стадий, на каждой из которых это изделие обслуживается тем или иным технологическим оборудованием. Так изготовление детали обычно включает несколько последовательных операций, каждая из которых выполняется на некотором станке из имеющихся в цехе.

Имеется конечное множество $N=\{1, 2, \dots, n\}$ деталей, каждая деталь состоит из конечного множества операций $O=\{1, 2, \dots, o\}$, и конечное множество $M=\{1, 2, \dots, m\}$ станков. Технологическая карта детали задает отношения предшествования между операциями. Над изделием в определённый момент времени может выполняться только одна операция, также одновременно станок может выполнять только один тип операций. Время выполнения операции O_o равно p_o , и она может выполняться на любом из станков.

Для составления расписания необходимо для каждого изделия определить начало и конец выполнения операций. Календарный план загрузки станочного парка принято считать оптимальным тогда, когда сумма времени, отведенного на выполнение операций над деталями, стремится к минимуму (1).

$$\sum_{j=1}^n C_j \rightarrow \min, \quad (1)$$

где C_j – момент окончания выполнения операции j над деталью, n – количество операций над деталью.

Теоретическая часть

Для решения задачи оптимизации календарного плана методом муравьиных колоний

рабочие процессы металлообрабатывающего предприятия представляются в виде направленного графа, формируется муравьиная колония, производится поиск лучшего варианта загрузки технологического оборудования с учетом установленных ограничений [5].

Распределение станочного парка по выполняемым операциям можно наглядно представить в виде графа (2):

$$G = (V, D), \quad (2)$$

где V – множество вершин, каждая из которых представляет тип операции над определенным видом детали;

D – множество дуг графа, представляющих продолжительность выполнения операции.

Граф имеет стартовую и финишную вершину, дуги, соединяющие данные узлы с операциями над деталями, имеют нулевую длину рис. 1.

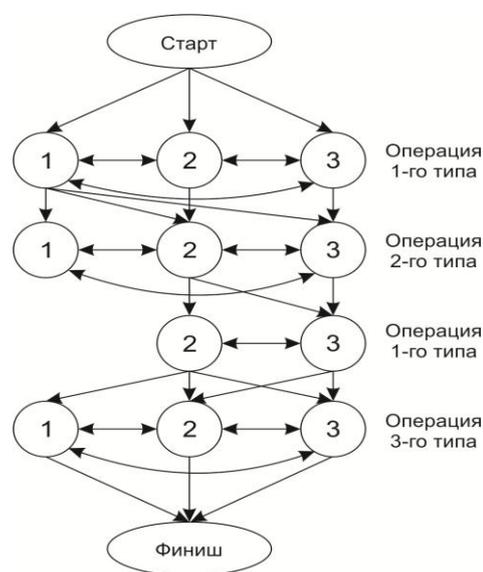


Рис. 1. Графоаналитическая модель

Для металлообработки характерны отношения предшествования, когда важна строгая последовательность операций и возможен возврат на станок для выполнения уже другой операции. Поэтому на этапе технологической подготовки производства, в процессе создания технологических карт для изделий, производится кластеризация по типу операции и устанавливается последовательность выполнения операций согласно маршруту изготовления детали.

Также существуют ситуации, когда в первую очередь необходимо изготовить определенный тип деталей [6]. Для того чтобы интеллектуальная система календарного планирования обладала достаточным уровнем гибкости, формируется матрица приоритетов изделий, которая определяет значимость изготавливаемой детали для производства. Исходя из этого, типовые формулы метода муравьиных колоний претерпевают некоторые изменения.

Значения матрицы приоритетов будет учитываться при расчете вероятности выбора следующей операции из списка кандидатов для k -го муравья (3).

$$P_{ij}^k(t) = \frac{(\tau_{ij}(t))^\alpha * \eta_{ij}^\beta * r}{\sum_{j \in J_i^k} (\tau_{ij}(t))^\alpha * \eta_{ij}^\beta * r}, \quad (3)$$

где $\tau_{ij}(t)$ - уровень феромона на дуге графа между текущей операцией и операцией соответствующей вершине ij , η_{ij} - эвристическое расстояние между текущей операцией и операцией соответствующей вершине ij (данная величина обратная к времени выполнения операции над деталями $\eta_{ij} = 1/d_{ij}$, где d_{ij} - время выполнения операции над деталью в вершине ij), J_i^k - список операций над деталями, которые может посетить муравей после выполнения предыдущей операции, α - коэффициент значимости концентрации феромона, β - коэффициент значимости эвристической информации, r - коэффициент значимости детали, принимает значения от 0 до 1.

Известно из многочисленных опытов, что при $\alpha = 0$ выбирается самая длительная операция над деталями, что соответствует «жадному» алгоритму. При $\beta = 0$ выбор работы основывается на уровне феромона, маршруты всех муравьев сводятся к одному субоптимальному решению. При $r=1$ муравей переходит в вершину операции, которая соответствует наиболее приоритетной детали для производственного плана.

Когда все муравьи построили полный путь от стартовой до финишной вершины, каждый агент откладывает на пройденную дугу феромон в соответствии со следующим выражением (4).

$$\Delta \tau_{ij}^k(t) = \frac{Q}{L^k(t)}, \quad (4)$$

где $L^k(t)$ - время выполнения запланированных операций над деталями на всех станках, Q – параметр, значение которого выбирают одного порядка с временем оптимальной обработки партии деталей.

Далее осуществляется обновление феромона для выбора наилучшей последовательности запуска деталей в обработку, так как концентрация феромона увеличивается на непродолжительных операциях и уменьшается на длительных. Влияние внешней среды определяется коэффициентом испарения $p \in [0,1]$, правило испарения феромона имеет вид (5).

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-p)\tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t). \quad (5)$$

Далее происходит выбор оптимального пути по критерию минимальной длительности производственного цикла, выбранный путь является субоптимальным.

Результаты экспериментальных исследований

В процессе апробации системы оптимизации составления календарных планов, в основе которой лежит алгоритм муравьиных колоний, была решена контрольная задача, состоящая из 11 операций над деталями и 3 станков.

На рис. 2 изображен начальный экран программы, в окне которого вводятся исходные данные о технологическом маршруте и длительности этапов обработки деталей, настраиваемые параметры алгоритма, а также приоритетные коэффициенты деталей.

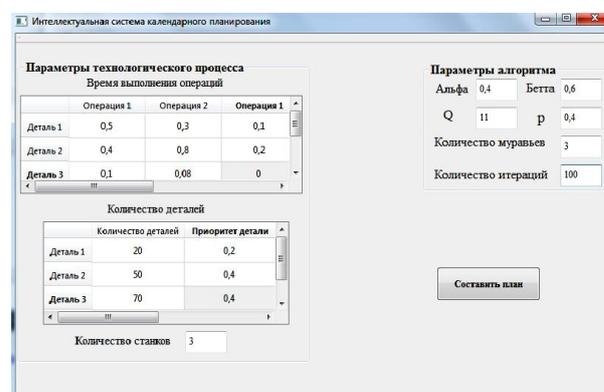


Рис. 2. Пользовательский интерфейс программы

На рис. 3 представлены результаты работы интеллектуальной системы календарного планирования.

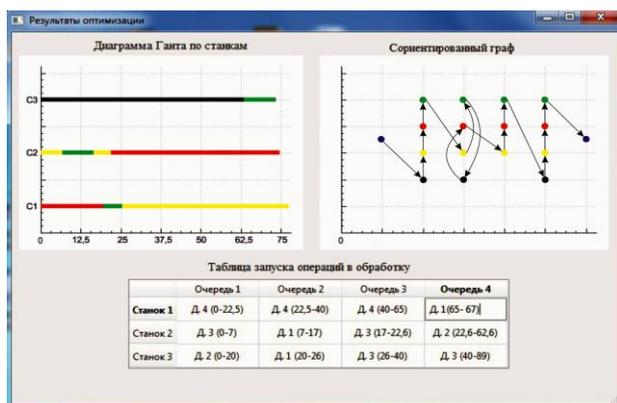


Рис. 3. Окно результатов программы

На форме изображены диаграмма Ганта, таблица и ориентированный граф, в которых указано время начала и окончания операций для каждого станка.

Заключение

В данной статье предложена программная реализация интеллектуальной системы календарного планирования гибких автоматизиро-

ванных производств. Данный продукт использует преимущества алгоритма муравьиных колоний для решения задачи оптимизации составления графиков и расписаний производства. Результатом работы системы является распределение заданий между оборудованием с временем начала операций.

Литература

1. Данилов А.Д. Модели для автоматизированного проектирования поточных производств // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т. 5. № 6. С. 163-166.
2. Лазарев А.А., Гафаров Е.Р. Теория расписаний. Задачи и алгоритмы. МГУ им. М.В. Ломоносова. 2011. С. 222.
3. Танаев В.С., Сотсков Ю.Н., Струевич В.А. Теория расписаний. Многостадийные системы. М.: Наука, 1989. 328 с.
4. Данилов А.Д., Головнев В.Н. Цифровые системы управления. Воронеж: ВГЛТА, 2007. 235 с.
5. Данилов А.Д., Ломакин В.А. Интеллектуализация управления гибким автоматизированным производством // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. Т. 12. № 5. С. 60-64.
6. Краснопрошина А.А. Системы управления гибкими автоматизированными производствами. М.: Высшая школа, Главное издательство, 1987. 383 с.

Поступила 29.11.2018; принята к публикации 04.02.2019

Информация об авторах

Данилов Александр Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: danilov-ad@yandex.ru, тел. 8920-430-74-54

Ломакин Владислав Андреевич – аспирант кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: vldlmkn@rambler.ru, тел. 8950-769-42-27

INTELLIGENT SYSTEM OF FLEXIBLE AUTOMATED MANUFACTURING SCHEDULING

A.D. Danilov, V.A. Lomakin

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in modern production systems, the scheduling system plays a key role in optimizing the loading of technological equipment and reducing production time. This article presents a methodology for optimizing the load on production capacity, taking into account the group of criteria that represent characteristic of metalworking enterprises. The task of scheduling is presented in the form of a weighted graph, which must be oriented, the time of the plan and the load on the process equipment are the target functions. As an effective method of solving these production problems, an ant colony algorithm is used, which perfectly solves large-scale problems and problems that have graph interpretation. At the initial stage, in the process of creating process charts, for the purpose of preliminary optimization, clustering is performed according to the type and sequence of technological operations on the parts. To meet the needs of flexible, quick-change production, a matrix of priorities of parts is introduced. Thanks to this improvement of the algorithm, the products that are most important for the production and execution of the order on time will be manufactured first. The next step is the calculation of the optimal load plan and the visualization of the constructed solutions in the form of tables, oriented graph and Gantt chart

Key words: scheduling theory, scheduling, intelligent systems, ant colony algorithm, clustering

References

1. Danilov A.D. "Models for the automated designing of line productions", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, vol. 5, no. 6, pp. 163-166.
2. Lazarev A.A., Gafarov E.R. "The theory of schedules. Tasks and algorithms" ("Teoriya raspisaniy. Zadachi i algoritmy"), Lomonosov MSU, 2011, 222 p.
3. Tanaev V.S., Sotskov Yu.N., Strusevich V.A. "The theory of schedules. Multistage systems" ("Teoriya raspisaniy. Mnogostadiynye sistemy"), Moscow, Nauka, 1989, 328 p.
4. Danilov A.D. "Digital control systems" ("Tsifrovye sistemy upravleniya"), Voronezh., Voronezh State University of Forestry and Technologies, 2007, 235 p.
5. Danilov A.D., Lomakin V.A. "Intelligent control of flexible manufacturing system", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 5, pp. 60-64.
6. Krasnoproshina A. A. "Control system of flexible automated production" ("Sistemy upravleniya gibkimi avtomatizirovannymi proizvodstvami"), Vysshaya shkola, 1987, 387 p.

Submitted 29.11.2018; revised 04.02.2019

Information about the authors

Aleksandr D. Danilov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru, tel. 8920-430-74-54

Vladislav A. Lomakin, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: vldlmkn@rambler.ru, tel. 8950-769-42-27

ПРИМЕНЕНИЕ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОЧИСТКИ ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ ОТ КОРРЕЛИРОВАННОГО ШУМА

О.С. Бучнев

Иркутский национальный исследовательский технический университет,
г. Иркутск, Россия

Аннотация: при использовании изображений для выполнения прикладных исследований нередко сталкиваются с наличием шумов, содержащихся на изображении. Для устранения шумов разработаны и широко применяются методы частотной фильтрации. Однако на спектре изображения не всегда удается разделить частоты, соответствующие шуму, и частоты, соответствующие изображению. В том случае, когда шум, содержащийся в изображении, обладает свойством пространственной коррелированности, возможно применение генетического алгоритма для получения случайного поля, взаимно коррелированного с содержащимся на изображении шумом, и последующая очистка изображения от шума. В статье рассмотрено применение генетического алгоритма для получения взаимно коррелированного случайного поля, это позволит выполнить очистку изображения от шума, повысив тем самым его качество. На примере конкретного изображения показано, что рассмотренный алгоритм имеет преимущество в сравнении с частотной фильтрацией. В качестве критериев оценки меры близости приведены взаимные корреляционные функции модельного шума и случайного поля, полученного в результате работы предлагаемого генетического алгоритма, а также взаимные корреляционные функции модельного незашумленного изображения и изображения, полученного в результате очистки

Ключевые слова: обработка изображений, частотная фильтрация, преобразование Фурье, случайное поле, корреляционная функция, генетический алгоритм

Введение

При выполнении научных исследований, будь то микроэлектроника или исследования космоса, огромную роль играют цифровые изображения. При создании цифровых изображений могут возникать шумы, которые обусловлены, в зависимости от области исследований или природы применяемой аппаратуры, чувствительностью элементов, цифровых преобразователей или воспроизводящих устройств. Например, при исследовании космоса шум на цифровом изображении может возникнуть в процессе его выполнения или передачи. При получении изображения шум может быть обусловлен температурой сенсоров, а в процессе передачи изображение может быть искажено в результате воздействия каких-либо возмущений в атмосфере.

Для борьбы с аддитивным шумом, который не зависит от пространственных координат и не коррелирует с изображением, применяется пространственная фильтрация. Во многих случаях шум бывает пространственно-независимым. Причиной появления периодического шума могут быть электрические или электромеханические помехи во время получения изображения при сканировании или видеосъемке.

Развитие и повышение быстродействия вычислительной техники предоставляет новые возможности, использование которых позволяет расширить или усовершенствовать набор имеющихся методов обработки изображений. К числу таких задач относится, кроме прочего, цифровая обработка и фильтрация случайных полей и изображений.

Частотная фильтрация

В том случае, когда сигнал и шум удовлетворяют условию аддитивности, некоррелированности и стационарности, наилучшей линейной фильтрацией по критерию минимума среднеквадратического отклонения является винеровская фильтрация [1–4]. Для аддитивной модели, в которой получаемый сигнал есть сумма исходного сигнала и шума:

$$g(x, y) = s(x, y) + \mu(x, y), \quad (1)$$

где $s(x, y)$ - полезный сигнал, а $\mu(x, y)$ - шум, $x \in [0, X - 1]$, $y \in [0, Y - 1]$, X, Y - размеры обрабатываемого изображения, оптимальный линейный фильтр будет иметь частотную характеристику [5]:

$$G(f) = \frac{P_s(f)}{P_s(f) + P_\mu(f)}. \quad (2)$$

В этом выражении $P_s(f)$ - энергетический спектр изображения, $P_\mu(f)$ - энергетический спектр шума, а частота f - является координа-

той в двумерном спектре: $f(u, v), u \in [0, X - 1], v \in [0, Y - 1], X, Y$ – размеры обрабатываемого изображения. При построении фильтра (2) основная трудность заключается в оценке значений $P_s(f)$ и $P_\mu(f)$. Будем исходить из того, что ни одна, ни другая функции не известны. Все, что известно, это имеющийся сигнал $g(x, y)$ и его спектр $P_g(t) = P_s(t) + P_\mu(t)$. Обладая только этой информацией, требуется из зашумленного изображения выделить шум $\mu(t)$, что позволит в дальнейшем получить незашумленное изображение. При этом подразумевается, что помеха представляет собой стационарное, однородное, нормально распределенное случайное поле. Понятно, что полностью восстановить исходное изображение, обладая лишь имеющимися данными, не удастся. Возможно лишь нахождение некоторого, оптимального в смысле какого-либо критерия, приближения шума, обладающего теми же статистическими свойствами, что и шум, присутствующий в изображении и совпадающий по фазе с исходным шумом. Это позволит значительно улучшить изображение как с точки зрения визуального восприятия, так и с точки зрения статистических критериев для оценки близости изображений.

Для удаления периодических шумов применяется частотная фильтрация. С помощью методов частотной фильтрации возможна избирательная обработка отдельных полос частот, либо же небольшой области частотного прямоугольника. Эти методы дают хорошие результаты тогда, когда шум, присутствующий на изображении, имеет частоты, которые не сливаются на изображении спектра с частотами полезного сигнала. В противном случае, при применении, например, барьерного режекторного фильтра, вместе с шумом пропадет и часть информации полезного сигнала. Наглядно это показано на рис. 1.

Как видно из рис. 1, после выполнения фильтрации из изображения частично исчез шум, также исчезли и некоторые детали самого изображения. Значение взаимной корреляционной функции исходного изображения и изображения, полученного в результате фильтрации при $\tau_1 = \tau_2 = 0$ $r(0,0) = 0,936$. Подход, который может быть применен для уменьшения показанного недостатка частотной фильтрации, основан на моделировании шума как случайного поля с ненулевой корреляционной функцией с применением генетического алгоритма.

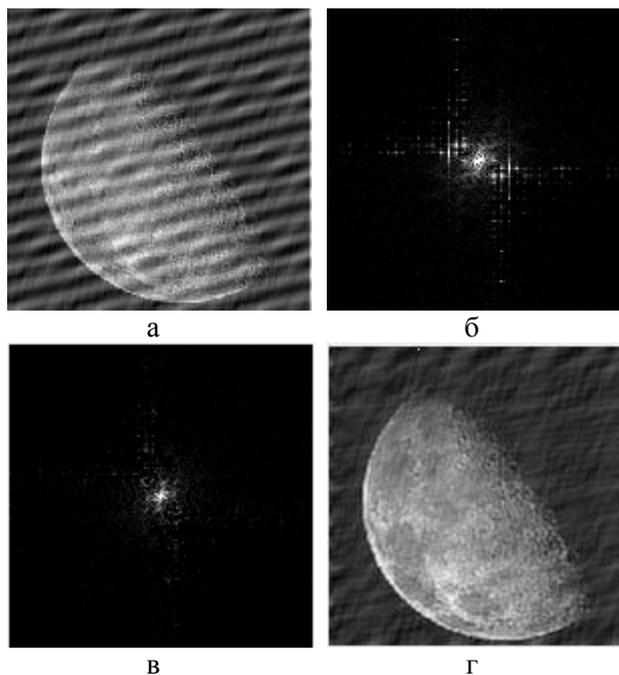


Рис. 1: а – исходное зашумленное изображение (источник изображения: [6, 206]), б – его спектр, в – спектр, умноженный на барьерный режекторный фильтр, г – результат фильтрации изображения в частотной области

Метод решения

Для моделирования случайных полей разработаны и широко используются численные методы, основанные на авторегрессионных моделях, перестановочных процедурах, спектральном разложении корреляционной функции [7-10]. Рассмотрим случай, когда шум, присутствующий на изображении, является стационарным, однородным, нормально распределенным, с ненулевой корреляционной функцией случайным полем и допускает аппроксимацию с помощью выражения:

$$\mu(x, y) = \int_0^X \int_0^Y f(u, v) \cos(ux + vy) dudv, \quad (3)$$

где $f(u, v)$ – нормально распределенные случайные числа, $u \in [0, X - 1], v \in [0, Y - 1]$. Тогда для выделения шума, которое содержит изображение, возможно использование информации о нем, содержащейся в самом изображении. Для этого необходимо найти коэффициенты $f(u, v)$ в (3) такого случайного поля $\hat{\mu}(x, y)$, которое минимизирует квадратичное приближение к зашумленному изображению:

$$Q = \sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} (g(x, y) - \hat{\mu}(x, y))^2 \rightarrow \min. \quad (4)$$

Когда шум, содержащийся в изображении, является периодическим неслучайным полем, для нахождения коэффициентов $\hat{\mu}(x, y)$ можно применить способ тригонометрической интер-

поляции методом наименьших квадратов [11], обобщив его на двумерный случай. Решение этой задачи предполагает трудоемкую реализацию численных методов решения систем алгебраических уравнений, поэтому для нахождения неизвестных коэффициентов A_k и B_k предлагается использовать генетический алгоритм [12], основанный на классическом генетическом алгоритме [13-16]. Сформируем алгоритм поиска коэффициентов $f(u, v)$ для выражения (3), обеспечивающих выполнение (4).

Пусть имеется дискретная реализация двумерного случайного поля размера $X \times Y$. При реализации генетического алгоритма каждая особь представляет собой одно возможное решение задачи, а каждая хромосома особи соответствует одному значению $f(u, v)$ в выражении (3). Набор особей образует популяцию размера L . При выполнении итераций будут отбираться особи, обеспечивающие меньшее значение квадратичного критерия:

$$Q_l = \frac{\sum_{x=0}^{X-1} \sum_{y=0}^{Y-1} (g(x, y) - \hat{\mu}_l(x, y))^2}{xy}, l = 1, 2, \dots, L, \quad (5)$$

где $\hat{\mu}_l(x, y)$ – реализация поля, полученная с помощью набора хромосом l -й особи.

Реализация генетического алгоритма предполагает выполнение следующих этапов:

1. На первом этапе необходимо выполнить начальное заполнение массивов: набор хромосом для каждой особи популяции заполняется случайными числами с $m = 0, D = 1$, эти числа будут коэффициентами в разложении (3). Также необходимо определить пороговое значение квадратичного критерия G для отбора наиболее приспособленных особей.

2. Для каждой особи по выражению (5) вычисляется значение квадратичного критерия – средний квадрат отклонения элементов реализации имеющегося случайного поля от полученного с помощью l -й особи.

3. Особи, для которых $\Delta_l > G$, $l = 1, 2, \dots, L$, выбраковываются, оставшиеся особи подвергаются процедуре скрещивания. Скрещивание предполагает выполнение операции кроссовера, а полученные в результате скрещивания потомки подвергаются операции мутации.

4. Затем формируется новая популяция особей, в которую попадают родители с наилучшим значением критерия (5) и их потомки.

В качестве критерия останова можно принять достижение максимального числа итераций или вырождение популяции, то есть когда

в течение нескольких итераций Q_l ($l = 1, 2, \dots, L$) остается постоянным.

Экспериментальная часть и результаты

В качестве обрабатываемого изображения, как и в предыдущем случае, выберем изображение из [6, 206]. В качестве модельного шума получим случайное поле с корреляционной функцией, которая может быть аппроксимирована выражением $r(\tau_1, \tau_2) = e^{-0,05(\tau_1 + \tau_2)} \cos(0,27\tau_1 + 0,47\tau_2)$.

Далее с помощью разложения корреляционной функции в ряд Фурье [7] получим значения коэффициентов $f(u, v)$ в (3) и выведем случайное поле. Иллюстрации исходного изображения, шума, зашумленного изображения и их спектры приведены на рис. 2.

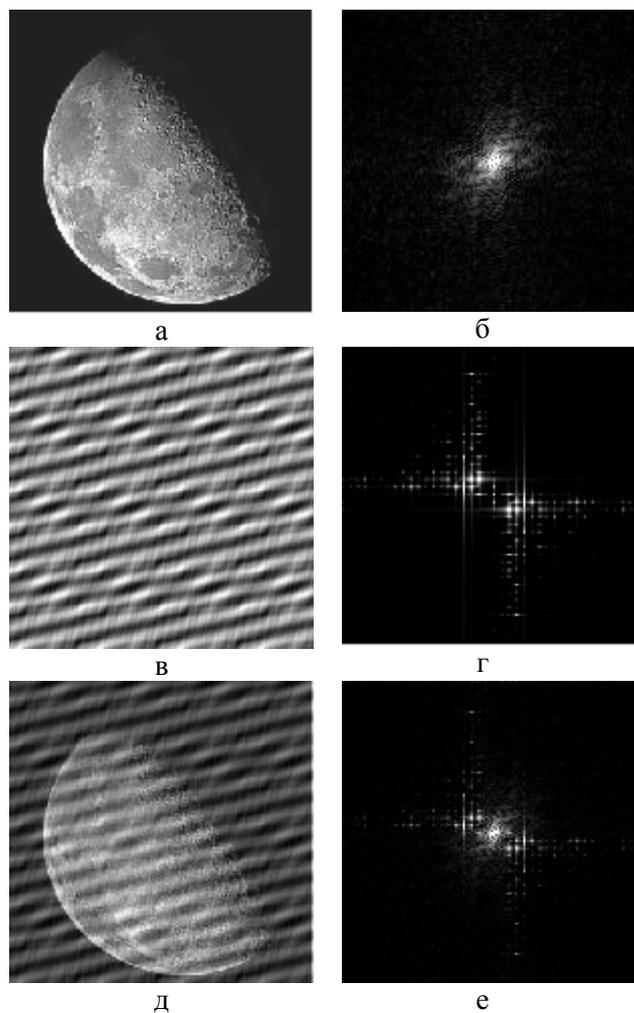


Рис. 2: а – исходное изображение, б – спектр исходного изображения, в – шум, г – спектр шума, д – зашумленное изображение, е – спектр зашумленного изображения

Шум $\mu(x, y)$ обладает нормальным законом распределения с $m = 0$ и $\sigma = 30$. Значения интенсивностей изображения шума и зашумленного изображения нормированы в интервале $[0, 255]$. Так как результат фильтрации с помощью барьерного режекторного фильтра не может считаться идеальным, для нахождения коэффициентов $f(u, v)$ шума в зашумленном изображении применен описанный выше генетический алгоритм. Оценку близости модельного и полученного шума будем выполнять с помощью их взаимной корреляционной функции. Результат работы генетического алгоритма приведен на рис. 3. Поскольку корреляционная функция случайного поля $r(\tau_1, \tau_2)$ является функцией двух переменных, симметричной относительно $\tau_1 = \tau_2$, будем показывать сечение корреляционной функции при $\tau_1 = \tau_2$.

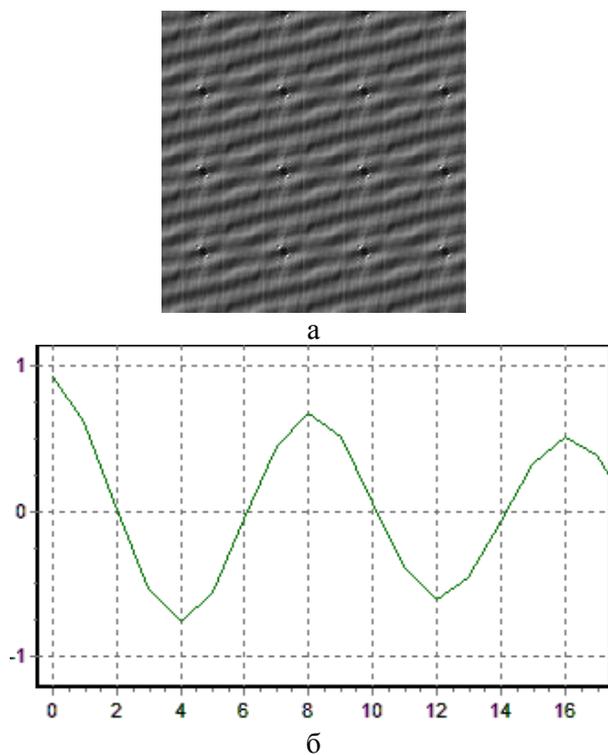


Рис. 3: а – полученный с помощью генетического алгоритма шум и б – сечение взаимной корреляционной функции модельного и полученного шума при $\tau_1 = \tau_2$

Из рис. 3 видно, что максимум взаимной корреляционной функции достигается при $\tau_1 = \tau_2 = 0$ $r(0,0) = 0,922$, поэтому полученный с помощью генетического алгоритма шум полностью совпадает по фазе с модельным шумом. Также на изображении шума присутствуют локальные пики – минимумы и максимумы (интенсивности 0 и 255), обусловленные наличием полезного сигнала в зашумленном изображении.

Для их удаления воспользуемся линейным пространственным усредняющим фильтром в окрестности 3×3 пика (x, y) .

Результат фильтрации с последующей нормировкой интенсивностей пикселей полученного изображения в $[0, 255]$ приведен на рис. 4 (а). После того, как получены значения шума $\mu(x, y)$ в (1), можно выполнить преобразование $s(x, y) = g(x, y) - \mu(x, y)$. Результат преобразования приведен на рис. 4 (б).

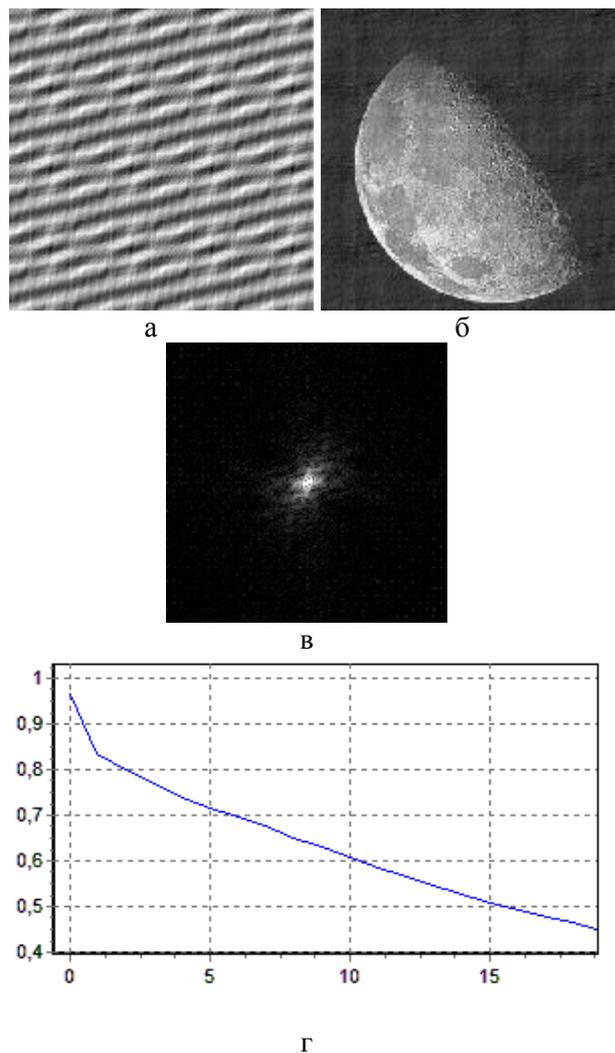


Рис. 4: а – изображение шума, полученное с помощью генетического алгоритма и последующей пространственной локальной усредняющей фильтрации, б – очищенное от шума изображение, в – спектр очищенного изображения, г – взаимная корреляционная функция очищенного и исходного изображения

Визуальная оценка изображения показывает значительное улучшение его качества, а значение взаимной корреляционной функции исходного и очищенного от шума изображения $r(0,0) = 0,964$ говорит о том, что статистически изображения близки друг другу. На удале-

ние случайной периодической составляющей указывает также близость спектров исходного (рис. 2 (б)) и очищенного изображения (рис. 4 (в)).

Заключение

В статье рассмотрено применение генетического алгоритма генерирования взаимно-коррелированных случайных полей для очистки цифрового изображения от коррелированного шума. Несмотря на то, что в статье приведен лишь один пример, проведена серия экспериментов с различными комбинациями частот в шуме. В большинстве из них применение генетического алгоритма для получения коррелированного шума показало преимущество перед частотной фильтрацией.

Литература

1. Wiener N. Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series. NY, John Wiley, 1949. 163 p.
2. Chee Sun Won, Robert M. Gray Stochastic Image Processing. Springer (October 4, 2014). 166 p.
3. Боде Г., Шеннон К. Упрощенное изложение линейной минимально-квадратичной теории сглаживания и предсказания // Теория информации и ее приложения. М.: Физматгиз, 1959. С. 113-137.
4. Возенкрафт Дж., Джейкобс И. Теоретические основы техники связи. М.: Мир, 1969. 640с.
5. Чочиа П.А. Применение частотной фильтрации изображения для удаления помех, вызванных тиснением фотобумаги // Информационные процессы. 2010. Т. 10. № 4. С. 334-338.
6. Гонсалес Р., Вудс Р. Цифровая обработка изображений. Изд. 3-е, испр. и доп. М.: Техносфера, 2012. 1104 с.
7. Быков В.В. Цифровое моделирование в статистической радиотехнике. М.: Советское радио, 1971. 328 с.
8. Петров А.В. О подходах к вероятностному анализу перестановочных процедур генерирования случайных процессов // Вестник ИрГТУ. 2016. № 2 (109). С. 29-38.
9. Пригарин С.М. Методы численного моделирования случайных процессов и полей. Новосибирск: Изд. ИВМиМГ СО РАН, 2005. 259 с.
10. Михайлов Г.А. Численное построение случайного поля с заданной спектральной плотностью // Докл. АН СССР. 1978. Т. 238. № 4. С. 793-795.
11. Токмакова А.А. Выделение периодической компоненты из временного ряда // Машинное обучение и анализ данных. 2011. Т. 1. № 1. С. 40-50.
12. Бучнев О.С. Применение генетического алгоритма для генерирования взаимно-коррелированных случайных полей // Вестник ИрГТУ. 2018. Т. 22. № 5. С. 75-82.
13. Рутковская Д., Пилиньский М., Рутковский Л. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы. М.: Горячая линия – Телеком, 2006. 452 с.
14. Генетические алгоритмы, искусственные нейронные сети и проблемы виртуальной реальности / Г.К. Вороновский, К.В. Махотило, С.Н. Петрашев, С.А. Сергеев. Харьков: ОСНОВА, 1997. 112 с.
15. Курейчик В.М., Лебедев Б.К., Лебедев О.К. Поисковая адаптация: теория и практика. М.: Физматлит, 2006. 272 с.
16. Емельянов В.В., Курейчик В.В., Курейчик В.М. Теория и практика эволюционного моделирования. М.: Физматлит, 2003. 432 с.

Поступила 19.12.2018; принята к публикации 04.02.2019

Информация об авторе

Бучнев Олег Сергеевич – канд. техн. наук, доцент кафедры автоматизированных систем, Иркутский национальный исследовательский технический университет (664074, Россия, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83), e-mail: buchnevo81@mail.ru

APPLICATION OF A GENETIC ALGORITHM FOR CLEANING A DIGITAL IMAGE FROM CORRELATED NOISE

O.S. Buchnev

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract: when using images to perform applied research, a researcher is often confronted with the presence of noise contained in the image. To eliminate the noise, frequency filtering methods have been developed and are widely used. However, in the image spectrum, it is not always possible to separate the frequencies corresponding to the noise and the frequencies corresponding to the image. In the case when the noise contained in the image has the property of spatial correlation, it is possible to use a genetic algorithm to obtain a random field that is mutually correlated with the noise contained in the image, and the subsequent cleaning the image from the noise. The article discusses the use of a genetic algorithm to obtain a mutually correlated random field; this will allow cleaning the image from noise, thus increasing its quality. Using the example of a specific image, it is shown that the considered algorithm has an advantage over the frequency filtering. As criteria for evaluating the measure of proximity, the mutual correlation functions of the model noise and the random field obtained as a result of the proposed genetic algorithm are given, as well as the mutual correlation functions of the non-noisy image and the image, obtained as a result of using the genetic algorithm

Key words: image processing, frequency filtering, Fourier transform, random field, correlation function, genetic algorithm

References

1. Wiener N. "Extrapolation, interpolation and smoothing of stationary time series", NY, John Wiley, 1949.
2. Chee Sun Won, Gray R. M. "Stochastic image processing", Springer, 2014.
3. Bode G., Shannon K. "Simplified presentation of the linear minimal-quadratic theory of smoothing and prediction", *Information Theory and its Applications (Teoriya informatsii i ee prilozheniya)*, Moscow, Fizmatgiz, 1959, pp. 113-137.
4. Wosenkraft J., Jacobs I. "Theoretical foundations of communication technology", Moscow, Mir, 1968.
5. Chochia P.A. "The use of frequency filtering of the image to remove noise caused by embossing photo paper", *Information Processes (Informatsionnye protsessy)*, vol. 10, no. 4, 2010.
6. Gonzalez R., Woods R. "Digital image processing, 3rd Edition, revised and augmented", Moscow, Tekhnosfera, 2012, 1104 p.
7. Bykov V.V. "Digital modeling in statistical radio engineering" ("Tsifrovoye modelirovanie v statisticheskoy radiotekhnike"), Moscow, Sovetskoye Radio, 1971, 328 p.
8. Petrov A.V. "On approaches to probabilistic analysis of permutation procedures for generating random processes", *Herald of ISTU (Vestnik IrGTU)*, 2016, no. 2 (109), pp. 29-38.
9. Prigarin S.M. "Methods of numerical simulation of random processes and fields" ("Metody chislennogo modelirovaniya sluchaynykh protsessov i poley"), Novosibirsk, ICMMG SB RAS, 2005.
10. Mikhailov G.A. "Numerical construction of a random field with a given spectral density", *Papers of Academy of Sciences of the USSR (Dokl. AN SSSR)*, 1978, vol. 238, no. 4, pp. 793-795.
11. Tokmakova A.A. "Isolation of a periodic component from a time series", *Machine Learning and Data Analysis (Mashinnoye obucheniye i analiz dannykh)*, 2011, vol. 1, no. 1, pp. 40-50.
12. Buchnev O.S., "The use of the genetic algorithm for generating mutually correlated random fields", *Herald of ISTU (Vestnik IrGTU)*, 2018, vol. 22, no. 5, pp. 75-82.
13. Rutkovskaya D., Pilin'sky M., Rutkovsky L. "Neural networks, genetic algorithms and fuzzy systems" ("Neyronnye seti, geneticheskie algoritmy i nechetkie sistemy"), Moscow, Goryachaya liniya - Telekom, 2006, 452 p.
14. Voronovsky G.K., Makhotilo K.V., Petrashev S.N., Sergeev S.A. "Genetic algorithms, artificial neural networks and virtual reality problems" ("Geneticheskie algoritmy, iskusstvennyye neyronnye seti i problemy virtual'noy real'nosti"), Kharkov, Osnova, 1997, 112 p.
15. Kureichik V.M., Lebedev B.K., Lebedev O.K. "Search adaptation: theory and practice" ("Poiskovaya adaptatsiya: teoriya i praktika"), Moscow, Fizmatlit, 2006, 272 p.
16. Emelyanov V.V., Kureychik V.V., Kureychik V.M. "Theory and practice of evolutionary modeling" ("Teoriya i praktika evolyutsionnogo modelirovaniya"), Moscow, Fizmatlit, 2003, 432 p.

Submitted 19.12.2018; revised 04.02.2019

Information about the author

Oleg S. Buchnev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Irkutsk National Research Technical University (83 Lermontova ul., Irkutsk 664074, Russia), e-mail: buchnevo81@mail.ru

**РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОЙ ИГРЫ ДЛЯ ГРУППЫ АГЕНТОВ
НА ОСНОВЕ ПРИНЦИПА РОЕВОГО ИНТЕЛЛЕКТА****С.В. Иванов¹, Д.Г. Белоножко¹, И.Д. Королев¹, Н.Я. Половинчук², М.Ю. Жукова³**¹**Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко, г. Краснодар, Россия**²**Московский государственный технический университет гражданской авиации
(Ростовский филиал), г. Ростов-на-Дону, Россия**³**Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону, Россия**

Аннотация: рассматривается решение задачи оптимизации своих действий группой агентов в едином информационном пространстве. Актуальность данной проблемы заключается в том, что одиночный агент мультиагентной системы способен осуществлять ограниченный перечень действий, особенно в условиях, когда рассматриваются большие потоки информации и количество целевых задач несет крупномасштабный характер. Выполнение стоящих перед агентами сложных задач возможно только при условии объединения их в группы. В работе проведён анализ принципов управления группой агентов. Анализ принципов управления группой агентов показал, что для решения широко-масштабных многоцелевых задач управления движением группой агентов в едином информационном пространстве в условиях противодействия наиболее подходит структура децентрализованного управления, которая включает в себя метод роевого интеллектуального управления группой агентов. Метод роевого интеллектуального управления предусматривает обмен информацией как внутри группы, так и с внешней средой. Поэтому актуальной научной задачей является интеграция системы навигации, связи и управления движением агентов в составе мультиагентной системы. С целью получения оптимальной функции управления действиями мультиагентной системы в работе решена двухточечная краевая задача, получена оптимальная траектория движения агента в составе мультиагентной системы. Приведён пример, иллюстрирующий эффективность предложенного подхода

Ключевые слова: децентрализованная структура управления, мультиагентные интеллектуальные системы, летательный аппарат, оценивание, регуляризация, роевой интеллект

Введение

Актуальные вопросы оптимального управления группами агентов при переключении режимов их функционирования в едином информационном пространстве представляют собой наиболее интересные условия для экспериментальных изысканий и определения приоритетов развития. Так, алгоритмическое и программно-математическое обеспечение применяемой модели учитывает формальное представление критериев оптимизации, которые предъявляют высокие требования к точностным характеристикам измеряемых величин, а также к обеспечению высокой надежности систем с целью обеспечения достоверности информации, циркулирующей в едином информационном пространстве как между агентами внутри группы, так и с внешней средой.

Такой обмен достоверной информацией внутри группы агентов позволяет обеспечить требуемое качество выполнения целевых задач, стоящих перед агентами группы [1].

Например, в условиях большого количества разнообразных задач, выполняемых летательными аппаратами (ЛА) различного назначения в полете необходимо учитывать их единое целевое назначение. Данное обстоятельство приводит к тому, что различные цели достигаются комплексами благодаря их объединению в группы для успешного выполнения поставленных перед ними задач.

Современная реализация группового движения ЛА приобретает все более сложный характер. Проблема группового управления мультиагентными системами в настоящее время особенно актуальна в связи с тем, что возможности одиночного агента весьма ограничены, особенно в условиях, когда рассматриваются большие потоки информации и количество целевых задач несет крупномасштабный характер. Выполнение стоящих перед агентами сложных задач возможно только при условии объединения их в группы, где каждый из агентов работает автономно, но цель для всех является единой. Особенно в условиях их применения при перераспределении задач в группе агентов, на их автономную систему функционирования накладываются ограничения. Они связаны со спецификой решаемых задач и об-

ластью взаимного информационного обмена [2].

Важно учитывать то обстоятельство, что применение централизованного управления группой агентов несет за собой трудности взаимного обмена информацией между участниками группы [3]. Особенно остро встает вопрос, когда игра является антагонистической, т.е. рассмотрение взаимного движения системы «мультиагентная система – внешняя среда», предусматривает действия каждого агента в автономном режиме с целью обеспечения самостоятельного выполнения целевых задач. Факт, что нарушение канала обмена информацией между центральным агентом и другими участниками группы не должно привести к потере управления и срыву целевой задачи, стоящей перед группой, является ключевым при рассмотрении задач распределенного группового управления с децентрализованной структурой организации [4].

Анализ принципов управления группой агентов показал, что для решения широкомащштабных многоцелевых задач управления движением группой агентов в едином информационном пространстве в условиях противодействия наиболее подходит структура децентрализованного управления, которая включает в себя метод роевого интеллектуального управления группой агентов.

Метод роевого интеллектуального управления предусматривает обмен информации как внутри группы, так и с внешней средой.

Поэтому актуальной научной задачей является интеграция системы навигации, связи и управления движением мультиагентной системы.

Постановка задачи

Рассмотрим дифференциальную игру мультиагентной системы, в которой задействованы два агента y и z , перемещающиеся в пространстве $\{\xi, \eta\}$ (рис. 1) [5].

Совпадение агентов y и z отражается следующим уравнением:

$$y(\theta) = z(\theta), \quad (1)$$

где θ - момент встречи.

Если встреча вовсе не осуществится, то полагаем $\theta = \infty$.

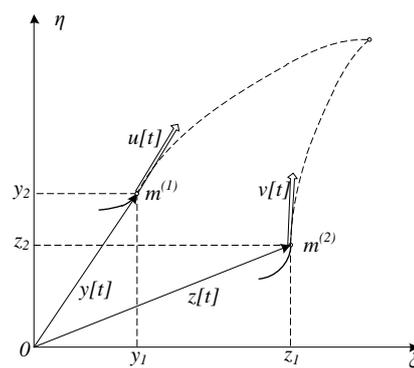


Рис. 1. Геометрия задачи

Примем, что целью противодействующего игрока является встреча точки $m^{(1)}$ с точкой $m^{(2)}$, и он заинтересован в том, чтобы это событие произошло как можно раньше. Уклоняющийся игрок, напротив, стремится избежать встречи или хотя бы предельно оттянуть её. Поэтому в данном случае в качестве платы γ , которая оценит исход игры, является следующая функция:

$$\gamma = \theta - t_0, \quad (2)$$

где t_0 – момент начала игры.

Таким образом, осуществившиеся в какой-то момент времени t состояния $y(t)$ и $z(t)$ точек $m^{(1)}$ и $m^{(2)}$ определяют позицию $x(t) = \{y(t), z(t)\}$, реализовавшуюся в этот момент времени. Стратегией U (стратегией V) уклоняющегося игрока (противодействующего игрока) является правило, указывающее для любой возможной позиции x , в которой $y \neq z$, какая стратегия u (стратегия v) должна быть сообщена агенту y (агенту z) в тот момент t , когда в мультиагентной системе реализуется эта позиция. Каждая стратегия U отождествляется с некоторой вектор-функцией $u(x)$, а каждая стратегия V – с некоторой вектор-функцией $v(x)$, определенными для всех переменных $x = \{y, z\}$, где $y \neq z$. Тогда стратегии $u(t)$ и $v(t)$, реализующиеся в системе в текущий момент времени t при выборе уклоняющимся игроком стратегии $u(x)$, а противодействующим игроком стратегии $v(x)$, определяются равенствами

$$u[t] = u(x[t]), \quad v[t] = v(x[t]). \quad (3)$$

Множества $\{U\}$ и $\{V\}$ допустимых стратегий стесняются двумя условиями:

- векторы u и v , сопоставляемые позициям x правилом (3), должны удовлетворять неравенствам $\|u\| \leq \mu$, $\|v\| \leq \nu$;

- векторы $u(x)$ и $v(x)$ должны изменяться непрерывно с изменением x ; более того, мы потребуем, чтобы вектор-функции $u(x)$ и $v(x)$ в каждой ограниченной замкнутой области пространства $\{x\}$, не содержащей точек x , где $y=z$, удовлетворяли условиям Липшица.

$$\begin{aligned} \|u(x^{(1)})-u(x^{(2)})\| &\leq \lambda \|x^{(1)}-x^{(2)}\|, \\ \|v(x^{(1)})-v(x^{(2)})\| &\leq \lambda \|x^{(1)}-x^{(2)}\|. \end{aligned} \quad (4)$$

Итак, множества $\{U\}$ и $\{V\}$ допустимых стратегий изображаются соответственно совокупности $\{u(x)\}$ и $\{v(x)\}$ всех вектор-функций $u(x)$ и $v(x)$, удовлетворяющих

$$\|u(x)\| \leq \mu, \quad \|v(x)\| \leq \nu. \quad (5)$$

Функционирование мультиагентной системы R описывается следующим уравнением взаимного движения:

$$\dot{x}_R = f(x_r, \tilde{u}, t), \quad (6)$$

где $x_r = |x_{r1}, \dots, x_{rn}|^T$, $\tilde{u} = |u \ v|^T$, $|x_{r1}, \dots, x_{rn}|^T$ – вектор состояния мультиагентной системы, состоящей из n агентов r_i , $i = 1, 2, \dots, n$.

Функционирование группы агентов отражено действиями динамических препятствий, осуществляющих активное информационное противоборство [4].

Динамическое состояние уклоняющегося агента y и противодействующего агента z в текущий момент времени t представлено в виде [6]:

$$x(t) = |y_r(t) \ z_r(t)|^T. \quad (7)$$

В сложных мультиагентных системах на управляющие воздействия накладываются следующие ограничения:

$$\begin{aligned} u_{min}(t) &\leq U(t) \leq u_{max}(t), \\ v_{min}(t) &\leq V(t) \leq v_{max}(t), \quad t \in [t_0, t_k], \end{aligned} \quad (8)$$

где $U = |u_1 \ \dots \ u_n|^T$, $V = |v_1 \ \dots \ v_n|^T$.

Векторные функции управлений мультиагентной системы $u(t)$ уклоняющегося и противодействующего игроков $v(t)$ в текущий момент времени t представлены следующими соотношениями [7]:

$$\int_{t_0}^{t_k} \sum_{i=1}^r k_i u_i^2(t) dt \quad \text{и} \quad \int_{t_0}^{t_k} \sum_{j=1}^p k_j v_j^2(t) dt, \quad (9)$$

где $K_i K_j$ – соответствующие диагональные матрицы чувствительности.

Каждый агент $r_i(u_i)$ формирует некоторые стратегии управления на заданном интервале времени $T = t_k - t_0$. В результате мультиагентная система изменяет свое состояние в зависимости от состояния внешней среды, что приводит к необходимости формирования управления в текущий момент времени, учитывая текущие условия обстановки, с целью оптимизации действий мультиагентной системы.

Предполагается, что каждый из агентов, описанных уравнением вида (6) формирует свои стратегии управления идентично всем участникам группы для достижения единой цели управления [8]. Стратегии управления уклоняющегося игрока $y(t)$ и противодействующего игрока $z(t)$ с учетом вектор-функции управляющих воздействий $u(t)$, а также работу мультиагентной системы можно описать с помощью следующей системы дифференциальных уравнений вида [9]:

$$\begin{aligned} \dot{y}(t) &= f_y(y, t) + g_u(u, y, z, t), \quad y(t_0) = y_0 \\ \dot{z}(t) &= f_z(z, t) + g_v(v, z, y, t), \quad z(t_0) = z_0, \end{aligned} \quad (10)$$

где f_y, f_z, g_u, g_v – известные непрерывные и дифференцируемые достаточное количество раз функции своих аргументов; u, v – управляющие функции ($u \in R^r, v \in R^p$); $t \in [t_0, t_k]$ – независимая переменная – время; y_0, z_0, t_0 – начальные условия и начальный момент времени поиска кратчайших и безопасных стратегий управления, согласно вышепринятому допущению известные уклоняющемуся игроку заранее; t_k – незадаанный заранее конечный момент времени.

Решение задачи

Для успешного поиска оптимальных стратегий управления мультиагентной системы в задаче синтеза терминально-оптимального управления группой агентов предполагается исходить из условия решения максиминной задачи [10, 11]:

$$\begin{aligned} J(y, z, u, v, t) &= L_1(y, t_k) + \int_{t_0}^{t_k} (L_2(y, z, t) + \\ &\max u \min v \quad + \frac{1}{2} (v^T(t) K_1 v(t) - u^T(t) K_2 u(t))) dt, \end{aligned} \quad (11)$$

где K_1, K_2 – симметричные положительно определенные матрицы соответствующих разностей, T – знак транспонирования.

В работе рассматривается решение задачи дифференциальной игры мультиагентной динамической системы на примере автономного агента в условиях противодействия внешней среды. В этих условиях необходимо построить стратегию управления уклоняющимся игроком $u(t)$ в условии активного противодействия, учитывая принцип гарантированного наилучшего результата, формируемого по критерию обратной связи, когда противодействующий игрок может немедленно воспользоваться любым неоптимальным шагом, сделанным уклоняющимся агентом.

Целевой функцией в задаче группового управления мультиагентной распределенной системой является минимаксный критерий, позволяющий синтезировать закон группового управления с целью получения решения в функции текущих координат движения объектов. Данный закон позволяет получить решение задачи оптимального управления, обеспечивающий перевод мультиагентной системы R из некоторого начального состояния x_0 в требуемое терминальное x_k , т.е. в процессе группового движения системы «мультиагентная система – внешняя среда» с учётом заданных ограничений на вектор сетевого управления (8) и вектор обобщённых состояний (10), должны быть выполнены ограничения вида:

$$x(t_0) = x_0, \quad x(t_k) = x_k. \quad (12)$$

Требуется получить решение только лишь с точки зрения интересов одного уклоняющегося агента. Тогда, сведём данную задачу к задаче поиска одностороннего управления \tilde{u} мультиагентной системы [10].

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + g(x, u, \tilde{v}, t), \quad x(t_0) = x_0 \quad (13)$$

$$x_0 = |y_0 \ z_0|^T; \quad x = |y \ z|^T; \quad x \in R^{n+m} \quad (14)$$

$$f = |f_y \ f_z|^T; \quad g = |g_u \ g_v|^T, \quad (15)$$

где $\tilde{v}(z, y, t)$ – "наилучшая" функция управления противодействующего агента.

Оптимальная стратегия уклоняющегося игрока $\bar{u}(t)$ реализуется из более узкого, в сравнении с (11), условия

$$\max_u \{J[u, \tilde{v}(z, y, t)]\}, \quad (16)$$

с учетом терминальных условий гамильтониан имеет следующий вид [10]:

$$H(x, u, \tilde{v}, \lambda, t) = -L_2(x, t)K_1\tilde{v}(x, t) + 0,5u^T(t)K_2u(t) + \lambda^T(t)f(x, t) + \lambda^T(t)g(x, u, \tilde{v}, t), \quad (17)$$

$$-\min_u \{H[x, u, \tilde{v}, \lambda, t]\} = -\min_u \{0,5u^T K_2 u + \lambda g(x, u, \tilde{v}, t)\} = \bar{H}(\bar{x}, \lambda, t), \quad (18)$$

а вектор-функция управления противодействующего игрока представлена следующим образом:

$$\bar{v}(x, t) = K_1^{-1} \left| 0 \left[\frac{\partial g_v(x, v, t)}{\partial v} \right]^T \right| \lambda(t), \quad (19)$$

где оптимальная фазовая траектория $x(t)$ и вектор сопряженных переменных $\lambda(t)$ описываются сопряженными уравнениями канонической двухточечной краевой задачи (ДТКЗ) [12]:

$$\dot{x}(t) = f(x, t) - \varphi(x, t)u(t) \quad (20)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \left(\frac{df}{dx} \right)^T \lambda(t) - \frac{dL}{dx}, \quad (21)$$

где управление $u(t)$ удовлетворяет уравнению

$$u(t) = -K^{-1}\varphi^T(x, t)\lambda(t). \quad (22)$$

В формуле (21) принято обозначение [12]

$$L = 1/2[h(t) - z(x, t)]^T P[h(t) - z(x, t)] + a1/2x^T(t)x(t), \quad (23)$$

где $z(x, t)$ – непрерывно-дифференцируемая функция своих аргументов, дифференцируемая по совокупности аргументов, $h(t)$ - вектор измерений, $P = \text{diag}\{p_i, i = \overline{1, l}\}$ - весовая матрица, характеризующая интенсивность помех в каналах измерений.

С учетом (20)-(23) уравнения квазиоптимального управления принимают вид

$$\dot{x}(t) = f(x, t) - \varphi(x, t)K^{-1}\varphi^T(x, t)\lambda(t), \quad (24)$$

$$\dot{\lambda}(t) = \left(\frac{dz}{dx} \right)^T P[h(t) - z(x, t)] - \left(\frac{df}{dx} \right)^T \lambda(t) - ax(t), \quad (25)$$

при краевых условиях

$$x(t_0) = x_0, \quad (26)$$

$$\lambda(t_1) = \frac{\partial V[x(t_1), t_1]}{\partial x(t_1)}, \quad (27)$$

где $\left(\frac{df}{dx}\right)$, $\left(\frac{dz}{dx}\right)$ – матрицы Якоби соответствующей размерности.

Таким образом, чтобы найти оптимальную траекторию $x(t)$, доставляющую минимум функционалу (11), необходимо решить ДТКЗ размерности $2n$.

В случае, если $x(t_0)$ и $x(t_1)$ не фиксированы, а $\frac{\partial V[x(t_1), t_1]}{\partial x(t_1)} = 0$, краевые условия имеют вид:

$$\lambda(t_0) = \lambda(t_1) = 0. \quad (28)$$

Проведенный анализ выражения (25) дает возможность определить достаточные условия оптимальности, которые заключаются в необходимости рассмотрения положительных матриц чувствительности P и K .

Решение уравнений движения в виде (24), (25) при условиях (26), (27) представляет собой достаточно сложную в вычислительном плане двухточечную краевую задачу.

Рассмотрим одно из конструктивных направлений ее решения на основе метода “переноса” граничных условий [12].

В дальнейшем для упрощения многоитерационной процедуры решения системы дифференциальных уравнений введем следующие обозначения, не нарушающие общность решения задачи [13]:

$$\left\{\frac{\partial V[x(t_1), t_1]}{\partial x(t_1)}\right\}^T = Q(x(t_1)). \quad (29)$$

Задача состоит в поиске такой функции управления, которая обеспечивала бы перевод мультиагентной системы из состояния $x(t_0)$ в терминальное состояние $x(t_k)$, с учетом следующих ограничений, действующих на объект управления [14]:

$$x(t_0) = x_0, \lambda(t_1) = Q(x(t_1)). \quad (30)$$

Обозначим

$$x = x(\lambda_0, t), \lambda = \lambda(\lambda_0, t) \quad (31)$$

решение системы (24), (25) для начальных условий $x(t_0) = x_0, \lambda(t_0) = \lambda_0$.

В (31) для простоты обозначений опущен аргумент x_0 , поскольку этот вектор остается неизменным при решении двухточечной краевой задачи. Необходимо найти такой вектор λ_0^* , чтобы $\lambda(\lambda_0^*, t_1) = Q(x(\lambda_0^*, t_1))$.

Введем функцию $\lambda_0(t)$, удовлетворяющую условию

$$\lambda(\lambda_0(t), t) = Q(x(\lambda_0(t), t)). \quad (32)$$

Величину $\lambda_0(t)$ по аналогии с [13] можно интерпретировать как такое начальное значение вектора λ , которое обеспечивает решение краевой задачи на “текущем” отрезке $[t_0, t_1]$. Из (32) следует, что искомое λ_0^* удовлетворяет равенству $\lambda_0^* = \lambda_0(t_1)$

Введем обозначения [13]:

$$\hat{x}(\lambda_0(t), t) = \tilde{x}(t), Q(\tilde{x}) = \lambda(\lambda_0(t), t) = \tilde{\lambda}(t). \quad (33)$$

С учетом (33) можно записать

$$\dot{\hat{x}}(t) = \frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} \frac{d\lambda_0}{dt} + \frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial t} \quad (34)$$

$$\dot{\tilde{\lambda}}(t) = \frac{\partial \lambda(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} \frac{d\lambda_0}{dt} + \frac{\partial \lambda(\lambda_0(t), t)}{\partial t}. \quad (35)$$

Выражение (35) с учетом (33) имеет вид

$$\dot{\tilde{\lambda}}(t) = \frac{dQ(\tilde{x}(t))}{dt} = \frac{\partial Q(\tilde{x}(t))}{\partial \tilde{x}} \left[\frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} \frac{d\lambda_0}{dt} + \frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial t} \right]. \quad (36)$$

Частные производные $\frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial t}$, $\frac{\partial \lambda(\lambda_0(t), t)}{\partial t}$ вычисляются при фиксированном $\lambda_0(t)$. Поэтому с учетом (24), (25), (33) можно записать

$$\frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial t} = f(\tilde{x}, t) - \varphi(\tilde{x}, t) K^{-1} \varphi^T * * (\tilde{x}, t) \tilde{\lambda}(t), \quad (37)$$

$$\frac{\partial \lambda(\lambda_0(t), t)}{\partial t} = \left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^T P[h(t) - z(\tilde{x}, t)] - - \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^T \tilde{\lambda}(t) - a\tilde{x}(t). \quad (38)$$

Подставляя (37), (38) в (35), (36), получим

$$\dot{\hat{x}} = \frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} \frac{d\lambda_0}{dt} + + f(\tilde{x}, t) - \varphi(\tilde{x}, t) K^{-1} \varphi^T (\tilde{x}, t) Q(\tilde{x}(t)), \quad (39)$$

$$\begin{aligned} \lambda_0(t) = & \left\{ \frac{\partial Q(\tilde{x}(t))}{\partial \tilde{x}} \frac{\partial \tilde{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} - \frac{\partial \lambda(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} \right\}^{-1} \times \\ & \times \left\{ -\frac{\partial p_1(\tilde{x}(t))}{\partial \tilde{x}} [f(\tilde{x}, t) - \right. \\ & \left. - \varphi(\tilde{x}, t) K^{-1} \varphi^T(\tilde{x}, t) Q(\tilde{x}(t))] + \right. \\ & \left. + \left(\frac{\partial z}{\partial \tilde{x}} \right)^T P[h(t) - z(\tilde{x}, t)] - \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{x}} \right)^T Q(\tilde{x}, t) - \right. \\ & \left. - a\tilde{x}(t) \right\}. \end{aligned} \quad (40)$$

Функции $x(t)$ и $\lambda_0(t)$ с учетом (33) удовлетворяют начальным условиям

$$\tilde{x}(t_0) = x_0, \quad \lambda_0(t_0) = Q(x_0). \quad (41)$$

При этом значения матриц чувствительности

$\hat{x}(\lambda_0(t), t)/\partial \lambda_0$, $\partial \lambda(\lambda_0(t), t)/\partial \lambda_0$, находящиеся в правых частях уравнений (39), (40), определяются при условии (25) [13].

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{\partial \hat{x}(\lambda_0, \tau)}{\partial \lambda_0} \right] = & \frac{\partial p_1[\hat{x}(\lambda_0(t), \tau), \lambda(\lambda_0(t), \tau), \tau]}{\partial \hat{x}} \times \\ & \times \frac{\partial \hat{x}(\lambda_0, \tau)}{\partial \lambda_0} + \frac{\partial p_1[\hat{x}(\lambda_0(t), \tau), \lambda(\lambda_0(t), \tau), \tau]}{\partial \lambda} \times \\ & \times \frac{\partial \lambda(\lambda_0, \tau)}{\partial \lambda_0}, \quad \tau \in [t_0, t] \end{aligned} \quad (42)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial \tau} \left[\frac{\partial \lambda(\lambda_0(t), \tau)}{\partial \lambda_0} \right] = & \frac{\partial p_2[\hat{x}(\lambda_0(t), \tau), \lambda(\lambda_0(t), \tau), \tau, a]}{\partial \hat{x}} \frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), \tau)}{\partial \lambda_0} + \\ & + \frac{\partial p_2[\hat{x}(\lambda_0(t), \tau), \lambda(\lambda_0(t), \tau), \tau, a]}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda(\lambda_0(t), \tau)}{\partial \lambda_0}, \quad \tau \in [t_0, t], \end{aligned} \quad (43)$$

где

$$p_1[\hat{x}, \lambda, t] = f(\hat{x}, t) - \varphi(\hat{x}, t) K^{-1} \varphi^T(\hat{x}, t) \lambda(t), \quad (44)$$

$$p_2[\hat{x}, \lambda, t, a] = \left(\frac{\partial z}{\partial \tilde{x}} \right)^T P[h(t) - z(\hat{x}, t)] - \left(\frac{\partial f}{\partial \tilde{x}} \right)^T Q(\hat{x}, t) - a\hat{x}(t). \quad (45)$$

Начальные условия $x(t_0) = x_0$ для системы уравнений (39) и (42) представлены в следующем виде:

$$\frac{\partial \hat{x}(\lambda_0, t_0)}{\partial \lambda_0} = 0, \quad \frac{\partial \lambda(\lambda_0, t_0)}{\partial \lambda_0} = E,$$

$$x(\lambda_0(t), t_0) = x_0, \quad \lambda(\lambda_0(t), t_0) = \lambda_0(t), \quad (46)$$

где [0] и E - соответственно нулевая и единичная матрица порядка $n \times n$ [14].

Путем интегрирования уравнений движения в частных производных (42), (43), (46) решается задача оптимального управления дви-

жением мультиагентной системой в условиях активного противодействия.

Как показано в [12], без существенного ухудшения результатов можно воспользоваться упрощенной процедурой, заключающейся в совместном интегрировании (39), (40) и уравнений для матриц чувствительности следующего вида (для $t = \tau$):

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} \right] = & \frac{\partial p_1[\hat{x}(t), Q(\hat{x}(t)), t]}{\partial \hat{x}} \times \\ & \times \frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} + \\ & + \frac{\partial p_1[\hat{x}(t), Q(\hat{x}(t)), t]}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda(\lambda_0(t), t_0)}{\partial \lambda_0}, \end{aligned} \quad (47)$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left[\frac{\partial \lambda(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} \right] = & \frac{\partial p_2[\hat{x}(t), Q(\hat{x}(t)), t, a]}{\partial \hat{x}} \times \\ & \times \frac{\partial \hat{x}(\lambda_0(t), t)}{\partial \lambda_0} + \frac{\partial p_2[\hat{x}(t), Q(\hat{x}(t)), t, a]}{\partial \lambda} \frac{\partial \lambda(\lambda_0, t_0)}{\partial \lambda_0}. \end{aligned} \quad (48)$$

Соотношения (24), (25) при краевых условиях (26)-(28) либо формулы (39), (40) при начальных условиях (41) определяют алгоритмы квазиоптимального управления вектора состояния $x(t)$. Полученные траектории согласованы с погрешностями исходных данных таким образом, что $x(t)$ стремится к точному решению при $\eta \rightarrow 0$ в условиях управляемости системы (10).

Следует отметить, что на практике не всегда имеется возможность определять a из соотношения (40), особенно в системах обработки информации, функционирующих в масштабе времени близком к реальному. В этом случае целесообразно назначить фиксированное значение a , обеспечивающее порядок убывания $a(\eta_0)$ достаточный для построения регулирующего алгоритма [8], в частности, можно положить $a = \eta_0^2$. В этом случае оценка вектора состояния $x(t)$ будет не хуже, чем при самой неблагоприятной помеховой обстановке.

Сформированная двухточечная краевая задача трансформировалась в задачу одностороннего управления, без учета управления со стороны внешней среды, и управление мультиагентной системы строится по принципу наилучшего гарантированного результата [15].

Пример

С целью оценки эффективности рассмотренного подхода и возможности синтеза управления агентом в реальном времени было прове-

дено моделирование примера в математическом пакете прикладных программ MATLAB [16].

В качестве агента использовалась модель движения беспилотного летательного аппарата (БЛА) [16].

Моделирование движения БЛА осуществлялось в соответствии с алгоритмом управления с интегральной адаптацией:

$$\begin{aligned}
 u_1 &= c_x \frac{\rho x_1^2}{2} S - \left(k_1 + \frac{m}{T_1} \right) (x_1 - x_1^*) - \\
 &- k_1 \left(1 + \frac{m}{T_1} \right) \int (x_1 - x_1^*) dt, \\
 u_2 &= \arcsin \left(\frac{2m}{c_y \rho x_1 S} \left(\left(k_2 + \frac{1}{T_2} \right) (x_2 - x_2^*) + \right. \right. \\
 &\left. \left. + k_2 \left(\frac{1}{x_1} + \frac{1}{T_2} \right) \int (x_2 - x_2^*) dt \right) \right).
 \end{aligned} \tag{49}$$

где $x_1 = x_1^*$ - скорость полета, а $x_2 = x_2^*$ - путевой угол.

При моделировании замкнутой системы с адаптивным регулятором использовалась математическая модель:

$$\begin{aligned}
 \dot{x}_1 &= \frac{u_1 - c_x \frac{\rho x_1^2}{2} S + m_1}{m}; \\
 \dot{x}_2 &= -\frac{c_y \rho x_1 S \sin(u_2)}{2m} + \frac{m_2}{m x_1}; \\
 \dot{x}_3 &= x_1 \cdot \cos(x_2); \\
 \dot{x}_4 &= -x_1 \cdot \sin(x_2),
 \end{aligned} \tag{50}$$

где m_1 и m_2 – кусочно-постоянные внешние возмущения.

На рис. 2-5 представлены результаты моделирования динамики ЛА с адаптивным регулятором. Имитировался выход ЛА в заданный стационарный режим (путевой угол – 45° и скорость полета – 180 км/ч) с дальнейшим действием возмущений. Возмущения задавались кусочно-постоянными и изменялись следующим образом:

$$\begin{aligned}
 m_1 &= 0, m_2 = 0, 0 < t \leq 50 \text{ c} \\
 m_1 &= 500, m_2 = 500, 50 < t \leq 100 \text{ c} \\
 m_1 &= -500, m_2 = -500, 100 < t \leq 150 \text{ c} \\
 m_1 &= 200, m_2 = 0, 150 < t \leq 200 \text{ c}
 \end{aligned} \tag{51}$$

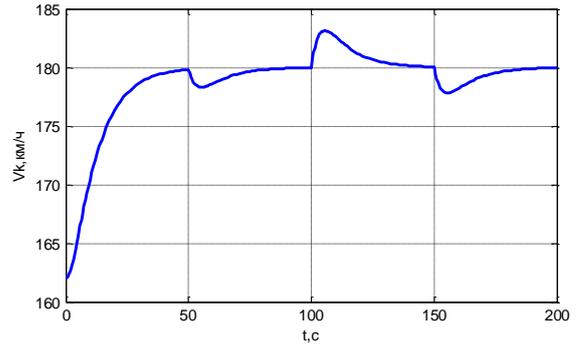


Рис. 2. Переходной процесс скорости полета БЛА

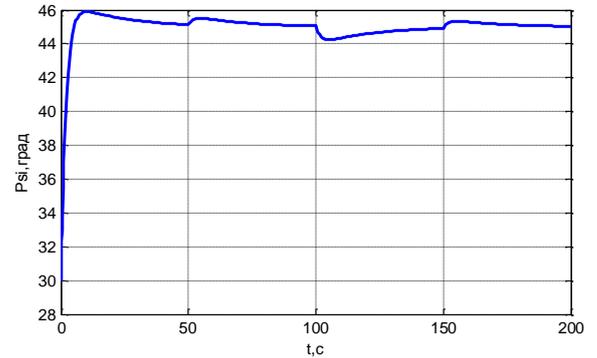


Рис. 3. Переходной процесс путевого угла БЛА

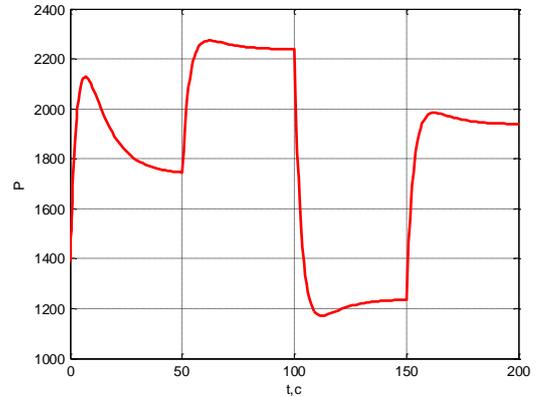


Рис. 4. Переходной процесс тяги двигателя БЛА

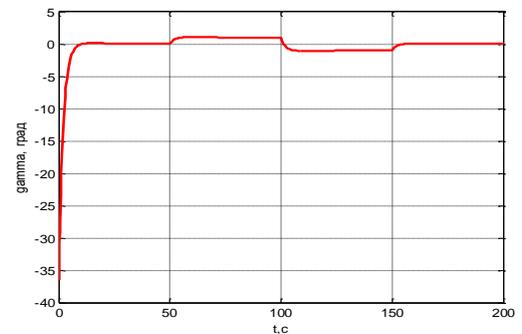


Рис. 5. Переходной процесс скоростного угла крена БЛА

Более подробный анализ результатов моделирования содержится в [16].

Выводы

Результаты численного моделирования демонстрируют высокую эффективность синтезированного адаптивного регулятора в задаче компенсации внешних возмущений и позволяют сделать вывод о возможности ее реализации в реальном масштабе времени на бортовых вычислительных средствах, что обеспечит высокий уровень интеллектуализации управления группой БЛА.

Полученные результаты подтвердили, что синтезированный алгоритм управления агентом, входящим в систему «мультиагентная система – внешняя среда» может быть эффективно использован для управления группой смешанных беспилотных летательных аппаратов, выполняющих разнородные функции при выполнении целевых задач по предназначению как в гражданских, так и военных целях.

Литература

1. Лобанов И.А., Рожнов А.В. Управление в едином информационно-управляющем поле смешанными и разнотипными группами пилотируемых и беспилотных летательных аппаратов при переключении режимов их функционирования // Перспективы развития и применения комплексов с беспилотными летательными аппаратами. 2016. С. 148-152.

2. Легович Ю.С., Максимов Д.Ю. Логические модели выбора решения в самоорганизующихся системах // Проблемы управления. 2013. № 3. С. 18–27.

3. Тимофеев А.В., Юсупов Р.М. Принципы построения интегрированных систем мультиагентной навигации и интеллектуального управления мехатронными роботами, 2011. С. 237–244.

4. Применение беспилотных летательных аппаратов при разведке труднодоступных и масштабных зон чрезвычайных ситуаций / И.М. Янников, П.М. Фомин, Т.Г. Габричидзе, А.В. Захаров // Вектор науки ТГУ. 2012. № 3 (21). С. 49–53.

5. Красовский Н.Н. Игровые задачи о встрече движений. М.: Наука, 1970. 420 с.

6. Половинчук Н.Я. Терминальное наведение баллистических летательных аппаратов: монография. МО РФ, 2001. 246 с.

7. Сейдж Э.П., Уайт Ч.С. Оптимальное управление системами. М.: Радио и связь, 1982. 398 с.

8. Абросимов В.К. Групповое движение интеллектуальных летательных аппаратов в антагонистической среде. М.: Наука, 2013. 168 с.

9. Половинчук Н.Я., Щербань И.В. Методы и алгоритмы терминального наведения баллистических летательных аппаратов: монография. МО РФ, 2013. 238 с.

10. Федоров В.В. Численные методы. М.: Наука, 1979. 56 с.

11. Барков В.В., Кочетков Ю.А. Краевая задача оптимального управления нелинейными детерминированными системами // Теория и системы управления. 1995. № 6. С. 90-95.

12. Бурлай И.В. Регулярные методы оценивания состояния объектов в динамической и кинематической постановке // Изв. РАН. ТиСУ. 2000. № 3. С. 17-23.

13. Половинчук Н.Я., Иванов С.В. Синтез алгоритма терминально-оптимального управления высокоскоростным маневрирующим летательным аппаратом // Двойные технологии. 2017. № 1. С. 43-44.

14. Половинчук Н.Я., Иванов С.В., Котельнищкая Л.И. Синтез управления маневром уклонения беспилотным летательным аппаратом с учетом терминальных ограничений // Вестник Дон. гос. техн. ун-та. 2018. Т. 18. № 2. С. 190-200.

15. Щербань И.В., Иванов С.В., Щербань О.Г. Стратегия управления игроком-союзником в задаче нелинейной дифференциальной игры с терминальными ограничениями // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 1. С. 21-27.

16. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ «Программа для исследования автопилота по управлению боковым движением беспилотного летательного аппарата» № 2018661795 от 18.09.2018 г.

Поступила 11.09.2018; принята к публикации 04.02.2019

Информация об авторах

Иванов Станислав Валерьевич – канд. техн. наук, доцент, Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко (350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4), тел. 8-(918)-942-07-50, e-mail: sta399@yandex.ru

Белоножко Дмитрий Григорьевич – адъюнкт, Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко (350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4), тел. +7 (914)-665-64-74, e-mail: staeer@ Rambler.ru

Королев Игорь Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор, Краснодарское высшее военное училище им. С.М. Штеменко (350063, Россия, г. Краснодар, ул. Красина, д. 4), тел. +7 (918)-311-46-21, e-mail: pi_korolev@mail.ru

Половинчук Николай Яковлевич – канд. техн. наук, профессор, Московский государственный технический университет гражданской авиации (Ростовский филиал) (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, проспект Шолохова, д. 262 В), тел. +7 (928)-603-63-12, e-mail: npolovinchuk@yandex.ru

Жукова Мария Юрьевна – аспирант, Донской государственный технический университет (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), тел. +7 (928)-615-56-78, e-mail: marg88@list.ru

SOLUTION TO THE PROBLEM OF DIFFERENTIAL GAME FOR A GROUP OF AGENTS BASED ON THE PRINCIPLE OF SWARM INTELLIGENCE

S.V. Ivanov¹, D.G. Belonozhko¹, I.D. Korolev¹, N.Ya. Polovinchuk², M.Yu. Zhukova³

¹Shtemenko Krasnodar Higher Military School, Krasnodar, Russia

²Moscow State Technical University of Civil Aviation (Rostov branch), Rostov-on-don, Russia

³Don State Technical University, Rostov-on-don, Russia

Abstract: the solution of the problem of optimization of their actions by a group of agents in a single information space is considered. The urgency of this problem lies in the fact that a single agent of a multi-agent system is able to carry out a limited list of actions, especially in conditions when large streams of information are considered and the number of targets is large-scale. The implementation of complex tasks facing agents is possible only if they are combined into groups. The paper analyzes the principles of managing a group of agents. Analysis of the principles of managing a group of agents showed that for solving large-scale multi-purpose tasks of controlling the movement of a group of agents in a single information space, in the face of opposition, the structure of decentralized management, which includes the method of swarm intelligent control of a group of agents, is most suitable. The method of swarm intellectual control provides for the exchange of information both within the group and with the external environment. Therefore, the actual scientific task is the integration of the navigation system, communication and motion control of agents as part of a multi-agent system. In order to obtain the optimal function of controlling the actions of the multi-agent system, a two-point boundary-value problem was solved in the work, and an optimal trajectory of the agent's motion within the multi-agent system was obtained. An example is given illustrating the effectiveness of the proposed approach

Key words: decentralized control structure, multi-agent intelligent systems, aircraft, evaluation, regularization, swarm intelligence

References

1. Lobanov I.A. Rozhnov A.V. "Control in a single information-control field mixed and diverse groups of manned and unmanned aerial vehicles when switching modes of operation", *Prospects for the development and use of complexes with unmanned aerial vehicles (Perspektivy razvitiya i primeneniya kompleksov s bespilotnyimi letatel'nyimi apparatami)*, 2016, 148-152 p.
2. Legovich Yu., Maksimov D.Yu. "A Logical model of decision making in self-organizing systems", *Control Problems (Problemy upravleniya)*, 2013, no. , pp. 18-27.
3. Timofeev A.V., Yusupov R.M. "Principles of construction of integrated systems of multi-agent navigation and intelligent control of mechatronic robots", ("Printsipy postroeniya integrirovannykh sistem mul'tiagentnoy navigatsii intellektualnogo upravleniya mekhatronnimi robotami"), 2011, pp. 237-244.
4. Yannikov I.M., Fomin P.M., Gabrichidze T.G., Zakharov, A.V. "The use of unmanned aerial vehicles in the exploration of hard-to-reach and large-scale emergency situations", *Science Vector TSU (Vektor nauki TGU)*, 2012, no. 3 (21), pp. 49-53.
5. Krasovskiy N.N. "Game problems on the encounter of motions" ("Igrovie zadachi o vstreche dvigeniy"), Moscow, Nauka, 1970, 420 p.
6. Polovinchuk N.I. "Terminal guidance of ballistic aircraft. Monograph" ("Terminal'noe navedenie balisticheskikh letatel'nykh apparatov") Monografiya, MO RF, 2001, 246 p.
7. Sage, E.P., White C.S. "Optimal control systems", Moscow, Radio i svyaz', 1982, 398 p.
8. Abrosimov V.K. "Group movement of intelligent aircraft in an antagonistic environment" ("Grupповое dvizhenie intellektualnykh letatel'nykh apparatov v antoganisticheskoi srede"), Moscow, Nauka, 2013, 168 p.
9. Polovinchuk N.I., Shcherban' I. V. "Methods and algorithms of terminal guidance of ballistic aircraft. Monograph" ("Metody i algoritmy terminal'nogo navedeniya balisticheskikh letatel'nykh apparatov"), Monografiya, MO RF, 2013, 238 p.
10. Fedorov V.V. "Numerical methods" ("Tsifrovye metody"), Moscow, Nauka, 1979, 56 p.
11. Barkov V.V. "Boundary value problem of optimal control of nonlinear deterministic systems", *Theory and control systems (Teoriya i sistemi upravleniya)*, 1995, no. 6, pp. 90-95.
12. Burlay I.V. "Regular methods of estimation of the state of objects in dynamic and kinematic statement", *Theory and control systems (Teoriya i sistemi upravleniya)*, 2000, no. 3, pp. 75-81.
13. Polovinchuk N.Ya., Ivanov S.V. "Synthesis of an algorithm of terminal optimal control of high-speed maneuvering aircraft", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 1, pp. 21-27.
14. Polovinchuk N.Ya., Ivanov S.V., Kotel'nitskaya L.I. "Synthesis synthesis of control of evasive maneuver unmanned aircraft subject to terminal constraints", *Double Technologies (Dvoynye tekhnologii)*, 2017, no. 1, pp. 43-44.
15. Shcherban' I.V., Ivanov S.V., Shcherban' O.G. "Strategy of controlling an ally player in the problem of nonlinear differential game with terminal constraints", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, no. 1, pp. 21-27.

16. Polovinchuk N.Ya., Ivanov S.V. “The program for the study of the autopilot to control the lateral movement of an unmanned aerial vehicle”, («Programma dlya issledovaniya avtopilota po upravleniyu bokovym dvizheniem bespilotnogo letatel'nogo apparata») Svidetel'stvo o gosudarstvennoj registracii programmy dlya EVM #2018661795, 18.09.2018.

Submitted 11.09.2018; revised 04.02.2019

Information about the authors

Stanislav V. Ivanov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Shtemenko Krasnodar Higher Military School (4 Krasina str., Krasnodar 350063, Russia), tel. +7(918)-942-07-50, e-mail: sta399@yandex.ru

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

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

Nikolay Ya. Polovinchuk, Cand. Sc. (Technical), Professor, Moscow State Technical University of Civil Aircraft (Rostov Branch) (262 B Sholokhova str., Rostov-on-Don 344000, Russia), tel. +7(928)-603-63-12, e-mail: npolovinchuk@yandex.ru

Mariya Yu. Zhukova, Graduate Student, Don State Technical University (1 Gagarina sq., Rostov-on-don 344000, Russia), tel. +7(928)-615-56-78, e-mail: marg88@list.ru

**РОБАСТНОЕ КВАЗИПРАВДОПОДОБНОЕ ОЦЕНИВАНИЕ
ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ НЕПРЕРЫВНО-ДИСКРЕТНЫХ СИСТЕМ****В.М. Чубич, С.О. Кулабухова****Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия**

Аннотация: аномальные наблюдения могут возникать, например, в результате аппаратного сбоя при приеме и/или передаче измерительных данных. В связи с этим представляется актуальной для практики разработка робастных процедур обработки данных, устойчивых к наличию аномальных измерений. Представлен вариант решения задачи робастной параметрической идентификации нелинейных непрерывно-дискретных систем, описываемых моделями с детерминированными уравнениями состояний и уравнениями измерений, возмущенными белым гауссовским шумом. Предложены три модификации критерия максимального правдоподобия, основанные на адаптации соответствующих результатов, известных для моделей с шумами в уравнениях состояний. При этом подлежащие оцениванию неизвестные параметры содержались в уравнениях состояния и наблюдения. Разработанное в рамках системы MATLAB программное обеспечение апробировано на модели электролиза, которая может быть использована, например, при получении пресной воды из соленой. Результаты проведенных численных исследований выявили преимущество предложенных робастных модификаций над классическим вариантом применения критерия максимального правдоподобия и показали их работоспособность в целом. Выполненный при случайном и группированном характере расположения аномальных наблюдений сравнительный анализ эффективности этих модификаций (рассматривались значения относительной ошибки оценивания в пространстве параметров) позволил выделить наиболее удачную из них и рекомендовать ее к практическому применению.

Ключевые слова: параметрическая идентификация, робастное оценивание, метод максимального правдоподобия, аномальные данные, нелинейная непрерывно-дискретная система

Введение

Часто на практике при построении моделей динамических систем приходится работать с измерительными данными, содержащими аномальные наблюдения. Это происходит, например, по причине сбоя во время сбора измерений, а также искажения при их передаче. Фактически происходит отклонение распределения шума измерений от его априорного предположения. В связи с этим применение классических методов статистического оценивания может привести к некорректным результатам решения задачи идентификации.

Для преодоления этих трудностей традиционно используются два подхода. Первый из них основан на предварительной обработке измерений и исключении аномальных данных в соответствии с некоторым критерием [1,2]. Во втором подходе используются робастные методы оценивания [3,4].

В [5] представлен один из возможных подходов к решению проблемы робастной параметрической идентификации стохастических линейных систем на основе современных робастных фильтров. В данной статье авторы

предприняли попытку адаптировать результаты работы [6] применительно к робастному оцениванию параметров моделей нелинейных непрерывно-дискретных систем с детерминированными уравнениями состояний с учетом возможности наличия аномальных наблюдений в экспериментальных данных.

Постановка задачи

Рассмотрим нелинейную непрерывно-дискретную систему, описываемую следующими уравнениями в пространстве состояний:

$$\begin{cases} \frac{dx(t)}{dt} = f[x(t), u(t), t; \theta], & t \in [t_0, t_N], \\ x(t_0) = x_0; \end{cases} \quad (1)$$

$$y(t_{k+1}) = h[x(t_{k+1}), t_{k+1}; \theta] + v(t_{k+1}), \quad k = 0, N-1, \quad (2)$$

где $x(t)$ – n -вектор состояния; $u(t)$ – r -вектор управления; $y(t_{k+1})$ – m -вектор измерения; $v(t_{k+1})$ – m -вектор шума измерений; θ –

s -вектор подлежащих оцениванию неизвестных параметров.

Будем считать шум измерений белой гауссовской последовательностью с нулевым математическим ожиданием и ковариационной матрицей R :

$$E[v(t_{k+1})] = 0, \\ E[v(t_{k+1})v^T(t_{j+1})] = \begin{cases} R, & k = j, \\ 0, & k \neq j. \end{cases}$$

Необходимо для математической модели (1), (2) с учетом высказанного априорного предположения разработать робастные модификации критерия максимального правдоподобия, устойчивые к появлению аномальных наблюдений, и провести сравнительный анализ их эффективности.

Параметрическая идентификация

Для оценивания неизвестных параметров математической модели (1), (2) воспользуемся методом максимального правдоподобия [7-9].

Известно, что при выполнении некоторых общих условий (условий регулярности), накладываемых на функцию правдоподобия, оценки максимального правдоподобия обладают следующими важными для практики асимптотическими свойствами:

1) асимптотическая несмещенность

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E[\hat{\theta}_N - \theta] = 0;$$

2) состоятельность

$$\lim_{N \rightarrow \infty} P\{\|\hat{\theta}_N - \theta\| > \delta\} = 0;$$

3) асимптотическая эффективность

$$\lim_{N \rightarrow \infty} E[(\hat{\theta}_N - \theta)(\hat{\theta}_N - \theta)^T] = M^{-1}(\theta).$$

Здесь $\|\cdot\|$ – некоторая векторная норма, а $M^{-1}(\theta)$ – дисперсионная матрица.

Задача квазиравдоподобного параметрического оценивания сводится к решению следующей задачи нелинейного программирования [10]

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta \in \Omega_\theta} \chi(\theta; Y_1^N) = \\ = \arg \min_{\theta \in \Omega_\theta} [-\ln L(\theta; y(t_1), y(t_2), \dots, y(t_N))], \quad (3)$$

где

$$\chi(\theta; Y_1^N) = \frac{Nm}{2} \ln 2\pi +$$

$$+ \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \varepsilon^T(t_{k+1}) B^{-1}(t_{k+1}) \varepsilon(t_{k+1}) + \\ + \frac{1}{2} \sum_{k=0}^{N-1} \ln \det B(t_{k+1}) \quad (4)$$

и

$$\varepsilon(t_{k+1}) = y(t_{k+1}) - h[x(t_{k+1}), t_{k+1}; \theta].$$

Способ вычисления ковариационной матрицы ошибки прогнозирования $B(t_{k+1})$ связан с той или иной робастной модификацией критерия максимального правдоподобия. Отметим, что если в соотношении (4) $B(t_{k+1}) = R$, то критерий идентификации совпадает с классическим критерием максимального правдоподобия.

Робастные модификации критерия максимального правдоподобия

Предложим три робастные модификации критерия максимального правдоподобия, адаптируя соответствующие результаты из статей [11-13], полученные для моделей с шумами в уравнениях состояний.

Робастная модификация на основе [11]

В этом случае ковариационная матрица ошибки прогнозирования вычисляется по формуле

$$B(t_{k+1}) = \sum_{i=1}^2 \omega_i (B_i + \varepsilon(t_{k+1}) \varepsilon^T(t_{k+1})),$$

где

$$\omega_i = \frac{c_i}{c_1 + c_2}, \quad i = 1, 2;$$

$$c_i = \frac{\alpha_i}{(2\pi)^{m/2} (\det B_i)^{1/2}} \exp\left(-\frac{1}{2} \varepsilon^T(t_{k+1}) B_i^{-1} \varepsilon(t_{k+1})\right), \\ i = 1, 2;$$

$$\alpha_i = \begin{cases} 1 - \gamma, & i = 1, \\ \gamma, & i = 2; \end{cases}$$

$$B_i = \begin{cases} R, & i = 1, \\ \lambda R, & i = 2; \end{cases}$$

γ – коэффициент загрязнения выборки и λ – коэффициент масштаба выборки.

Робастная модификация на основе [12]

Здесь для вычисления ковариационной матрицы ошибки прогнозирования используется соотношение

$$B(t_{k+1}) = \text{diag} \left(\frac{\beta_1^{k+1}}{\alpha_1^{k+1}}, \dots, \frac{\beta_m^{k+1}}{\alpha_m^{k+1}} \right),$$

в котором

$$\beta_i^{k+1} = \beta_i^k + \frac{1}{2} (\varepsilon_i(t_{k+1}))^2, \quad i = \overline{1, m},$$

$$\alpha_i^{k+1} = \frac{1}{2} + \alpha_i^k, \quad i = \overline{1, m}.$$

При этом начальные значения параметров $\alpha^0 = (\alpha_1^0, \dots, \alpha_m^0)$, $\beta^0 = (\beta_1^0, \dots, \beta_m^0)$ должны быть определены.

Робастная модификация на основе [13]

Для этой модификации ковариационная матрица ошибки прогнозирования определяется с помощью выражения

$$B(t_{k+1}) = \hat{R}(t_{k+1}),$$

где

$$\hat{R}(t_{k+1}) = \lambda_R \hat{R}(t_k),$$

$$\lambda_R = \frac{\text{tr} \hat{B}(t_{k+1})}{\text{tr} \hat{R}(t_k)} \quad (\text{tr } A - \text{след матрицы } A),$$

$$\hat{B}(t_{k+1}) = \frac{1}{k+1} \sum_{i=0}^k \varepsilon(t_{i+1}) \varepsilon^T(t_{i+1}).$$

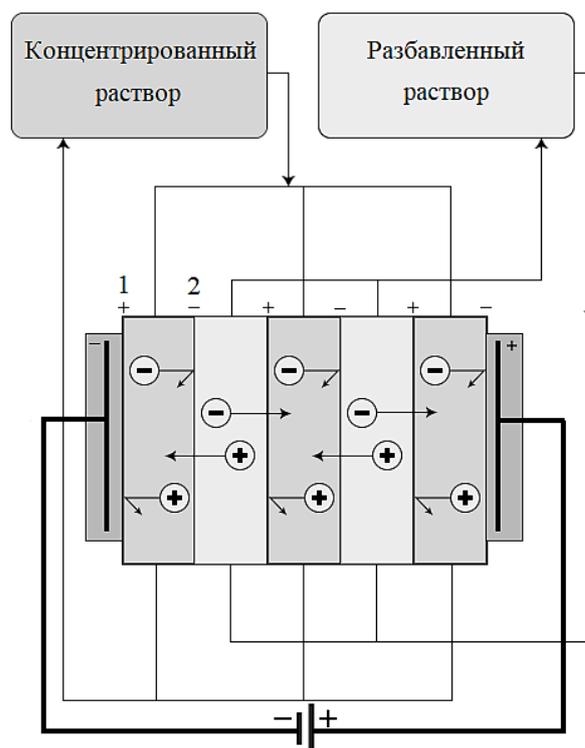
На начальном этапе полагают $\hat{R}(t_0) = R$.

Сравнительный анализ эффективности предложенных робастных модификаций

Сравнительный анализ эффективности предложенных робастных модификаций критерия максимального правдоподобия проведем на примере модели электролиза, рассмотренной в [14-16].

В настоящее время для многих регионов актуальна проблема получения пресной воды из соленой. Одним из наиболее распространенных и эффективных методов решения этой проблемы является электролиз, представляющий собой процесс изменения концентрации электролита в растворе под действием электрического тока. Процесс уменьшения концентрации солевого раствора (NaCl) схема-

тически представлен на рисунке и заключается в следующем.



Генератор постоянного тока

- 1 - катионная мембрана
- 2 - анионная мембрана

Общая схема электролизатора

Исходный солевой раствор помещают в резервуар с разбавленным раствором, при этом резервуар с концентрированным раствором изначально пуст. Далее раствор помещается в сосуд, разделенный полупроницаемыми мембранами. Мембраны подразделяются на два вида: катионные и анионные. Они расположены поочередно и задерживают положительно заряженные ионы (катионы) и отрицательно заряженные ионы (анионы) соответственно. Через сосуд пропускают постоянный электрический ток, который приводит ионы соли в движение. При этом анионы движутся в сторону положительного заряда, а катионы – отрицательного. Анионы проходят через катионные мембраны и задерживаются возле анионных мембран. Аналогичное происходит с катионами. В результате повышается концентрация солевого раствора между одной парой мембран и понижается между другой. Если концентрация увеличилась, то данный раствор помещается в резервуар с концентрированным раствором, а если умень-

шилась – с разбавленным. Процесс повторяется до достижения нужной степени очистки воды.

Модель электродиализа при условии постоянной плотности воды выглядит следующим образом:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{c_W B - x_1(t)W}{c_W x_3(t)} \\ \frac{-c_W B + x_2(t)W}{c_W x_4(t)} \\ \frac{W}{c_W} \\ -\frac{W}{c_W} \end{bmatrix}, t \in [t_0, t_N], \\ x(t_0) = x_0; \end{cases}$$

$$y(t_{k+1}) = x(t_{k+1}) + v(t_{k+1}), k = \overline{0, N-1}.$$

Здесь

$$B = \frac{\theta_2}{F} u(t) N_{cell} + \theta_1 (x_2(t) - x_1(t)) a_{mg} N_{cell};$$

$$W = \frac{\theta_4}{F} u(t) N_{cell} - \frac{\theta_3}{\rho_W} \varepsilon_B (x_2(t) - x_1(t)) a_{mg} N_{cell};$$

$x_1(t)$ – молярная концентрация растворенного вещества в концентрированном растворе, кмоль/м³; $x_2(t)$ – молярная концентрация растворенного вещества в разбавленном растворе, кмоль/м³; $x_3(t)$ – объем концентрированного раствора, м³; $x_4(t)$ – объем разбавленного раствора, м³; $u(t)$ – электрический ток, А; $c_W = 55.41$ – молярная концентрация воды при $t = 20^\circ\text{C}$, моль/м³; B – молярный расход растворенного вещества, кмоль/с; W – молярный расход воды, кмоль/с; θ_1 – постоянная мембраны для переноса растворенного вещества, м/с; θ_2 – число переноса растворенного вещества; θ_3 – постоянная мембраны для переноса воды, моль/(м²·с·бар); θ_4 – число переноса воды; $F = 96486$ – число Фарадея, Кл/моль; $N_{cell} = 8$ – количество пар мембран; $a_{mg} = 0.02$ – площадь мембраны, м²; $\rho_W = 998.2$ – плотность воды, кг/м³; $\varepsilon_B = 46.6$ –

параметр осмотического давления, бар·кг/моль.

Будем считать, что выполнены все априорные предположения, высказанные при постановке задачи, причем $t_0 = 0$ с; $N = 60$; $t_{k+1} = 120(k+1)$ с; $k = \overline{0, 59}$; $x_1(t_0) = 0.01$ кмоль/м³, $x_2(t_0) = 5$ кмоль/м³, $x_3(t_0) = 0.001$ м³, $x_4(t_0) = 2.46 \cdot 10^{-3}$ м³;

$$R = \begin{bmatrix} 4.9 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 4.9 \cdot 10^{-3} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 2.5 \cdot 10^{-9} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 2.5 \cdot 10^{-9} \end{bmatrix}.$$

В качестве входного сигнала выберем

$$u(t) = \begin{cases} 0.5 \text{ A,} & \text{если } t \in [0, 2760); \\ 11.5 \text{ A,} & \text{если } t \in [2760, 3600); \\ 2.5 \text{ A,} & \text{если } t \in [3600, 5340); \\ 8.0 \text{ A,} & \text{если } t \in [5340, 7200) \end{cases}$$

и определим значения параметров предложенных робастных модификаций в соответствии с табл. 1.

Таблица 1

Значения параметров робастных модификаций

Модификация	Значения параметров
Робастная модификация на основе [11]	$\gamma = 0.1, \lambda = 10000$
Робастная модификация на основе [12]	$\alpha^0 = \beta^0 = (1, 1, 1, 1)$

Для проведения численного исследования эффективности предложенных робастных модификаций критерия максимального правдоподобия воспользуемся разработанным программным обеспечением, написанным на языке MATLAB.

Для уменьшения влияния результатов от выборочных данных осуществим 100 независимых запусков системы и усредним полученные оценки вектора неизвестных параметров.

Сравнение эффективности предложенных модификаций будем производить по значениям относительной ошибки оценивания, которую будем вычислять по формуле

$$\delta_{\theta} = \frac{1}{s_1} \sum_{i=1}^{s_1} \frac{|\hat{\theta}_i^{cp} - \theta_i^{true}|}{|\theta_i^{true}|} + \frac{1}{s_2} \sum_{j=1}^{s_2} |\hat{\theta}_j^{cp}|.$$

Здесь $\hat{\theta}_i^{cp}$ – i -я компонента усреднённого вектора оценки неизвестных параметров по всем запускам, θ_i^{true} – i -я компонента вектора истинных значений параметров, s_1 – число ненулевых и s_2 – число нулевых истинных значений.

Рассмотрим два варианта расположения аномальных наблюдений: случайный и группированный характер.

Смоделируем данные измерений со случайно расположенными аномальными наблюдениями, используя истинные значения параметров:

$$\theta^{true} = [9.81 \cdot 10^{-8}, 0.92, 1.04 \cdot 10^{-7}, 8.54]^T,$$

приняв коэффициент загрязнения выборки 10%, дисперсию шума аномальных наблюдений $R_A = 10000R$.

Для решения оптимизационной задачи (3) воспользуемся методом последовательного квадратичного программирования или SQP (от англ. Sequential Quadratic Programming), являющимся одним из наиболее эффективных, современных методов нелинейного программирования [17] и реализованным в рамках пакета Optimization Toolbox [18].

Результаты параметрической идентификации модели электролиза при случайном расположении аномальных наблюдений представлены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты параметрической идентификации (случайный характер расположения аномальных наблюдений)

	Классический ММП	Робастная модификация на основе [11]	Робастная модификация на основе [12]	Робастная модификация на основе [13]
$\hat{\theta}_1^{cp}$	1.11e-7	1.03e-7	9.56e-8	1.03e-7
$\hat{\theta}_2^{cp}$	0.8537	0.9607	0.8949	0.8804
$\hat{\theta}_3^{cp}$	1.04e-7	1.07e-7	1.01e-7	1.05e-7
$\hat{\theta}_4^{cp}$	8.5720	8.3734	8.5484	8.5256
δ_{θ}	0.052	0.036	0.022	0.026

Изменим характер расположения аномальных наблюдений, сгруппировав их в две группы по три наблюдения, остальные условия эксперимента оставим неизменными. Смоделировав выборочные данные, вновь осуществим процедуру квазиравдоподобного оценивания параметров модели электролиза, представив численные результаты в табл. 3.

Таблица 3

Результаты параметрической идентификации (группированный характер расположения аномальных наблюдений)

	Классический ММП	Робастная модификация на основе [11]	Робастная модификация на основе [12]	Робастная модификация на основе [13]
$\hat{\theta}_1^{cp}$	1.11e-7	8.38e-8	9.36e-8	8.60e-8
$\hat{\theta}_2^{cp}$	0.8920	0.9453	0.9205	0.9676
$\hat{\theta}_3^{cp}$	1.09e-7	1.05e-7	1.05e-7	1.02e-7
$\hat{\theta}_4^{cp}$	8.4394	8.5018	8.4362	8.4899
δ_{θ}	0.056	0.048	0.016	0.049

Анализируя полученные результаты (см. последние строки табл. 2 и 3), можно резюмировать, что все предложенные робастные модификации критерия максимального правдоподобия подтвердили свою работоспособность. При этом для обоих вариантов расположения аномальных наблюдений лучшей оказалась модификация на основе [12]. Ее применение позволяет уменьшить относительную ошибку оценивания в 2.36 раза для случайного и 3.5 для группированного характера расположения выбросов. Для двух других модификаций эти величины равнялись 1.44 и 1.17 для модификации из [11], и 2 и 1.14 для модификации из [13].

Заключение

В работе были предложены некоторые робастные модификации критерия максимального правдоподобия для квазиравдоподобного оценивания моделей нелинейных непрерывно-дискретных систем. Проведен сравнительный анализ эффективности данных модификаций на примере модели электролиза.

По результатам проведенных исследований можно рекомендовать робастную модификацию из [12] как наиболее эффективную.

Литература

1. Лемешко Б.Ю. Робастные методы оценивания и отбраковка аномальных измерений // Заводская лаборатория. 1997. Т. 63. № 5. С. 43–49.
2. Кобзарь А.И. Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2006. 816 с.
3. Huber P.J., Ronchetti E.M. Robust statistics. New Jersey: John Wiley & Sons, 2009. 371 p.
4. Maronna R.A., Martin D.R., Yohai V.J. Robust statistics. Theory and Methods. England: John Wiley & Sons, 2006. 403 p.
5. Чубич В.М., Прокофьева А.Э. Параметрическая идентификация стохастических линейных дискретных систем на основе робастной фильтрации // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 2. С. 84–94.
6. Чубич В.М., Прокофьева А.Э. Сравнительный анализ некоторых робастных фильтров для нестационарных линейных дискретных систем // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2017. Т. 21. № 12. С. 123–137.
7. Ивченко Г.И., Медведев Ю.И. Введение в математическую статистику. М.: Изд-во ЛКИ, 2010. 600 с.
8. Боровков А.А. Математическая статистика. Новосибирск: Наука; Изд-во Ин-та математики, 1997. 772 с.
9. Мудров В.И., Кушко В.Л. Методы обработки измерений. Квазиравнодоподобные оценки. М.: Радио и связь, 1983. 304 с.
10. Åström K.J. Maximum Likelihood and Prediction Error Methods // Automatica. 1980. Vol. 16. P. 551–574.
11. Plataniotis K.N., Androutsos D., Venetsanopoulos A.N. Nonlinear filtering of non-Gaussian noise // Journal of Intelligent and Robotic Systems. 1997. Vol. 19. P. 207–231.
12. Särkkä S., Nummenmaa A. Recursive noise adaptive Kalman filtering by variational Bayesian approximations // IEEE Transactions on Automatic control. 2009. Vol. 54. P. 596–600.
13. Jwo D.-J., Chung F.-C., Weng T.-P. Adaptive Kalman filter for navigation sensor fusion // Sensor Fusion and its Applications. In TechOpen. 2010. P. 66–90.
14. Optimal design of experiments for parameter identification in electro dialysis models / F. Galvanin, R. Marchesini, M. Barolo, F. Bezzo, M. Fidaleo // Chemical engineering research and design. 2016. № 105. P. 107–119.
15. Fidaleo M., Moresi M. Electrodialytic desalting of model concentrated NaCl brines as such on enriched with a non-electrolyte osmotic component // Journal of membrane science. 2011. № 367. P. 220–232.
16. Чубич В.М., Филиппова Е.В. Активная идентификация стохастических динамических систем. Планирование эксперимента для моделей непрерывно-дискретных систем. Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. 96 с.
17. Измайлов А.Ф., Солодов М.В. Численные методы оптимизации. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 320 с.
18. Coleman T.F., Zhang Y. Optimization Toolbox. User's Guide // The MathWorks, Natick (Massachusetts, USA). 2018. 1172 p.

Поступила 26.12.2018; принята к публикации 25.01.2019

Информация об авторах

Чубич Владимир Михайлович – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой теоретической и прикладной информатики, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20), e-mail: chubich@ami.nstu.ru

Кулабухова Светлана Олеговна – магистрант, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр-т К. Маркса, 20), e-mail: kulabukhova.s@gmail.com

ROBUST QUASI-LIKELI ESTIMATION OF THE PARAMETERS OF THE CONTINUOUS-DISCRETE SYSTEM MODELS

V.M. Chubich, S.O. Kulabukhova

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: anomalous observations may arise, for example, as a result of a hardware failure during the reception and/or transmission of measurement data. In this regard, the development of robust data processing procedures that are resistant to the presence of anomalous measurements is relevant for practice. This article presents a solution to the problem of robust parametric identification of nonlinear continuous-discrete systems described by models with deterministic equations of state and measurement equations perturbed by white Gaussian noise. Three modifications of the maximum likelihood criterion are proposed, based on the adaptation of the corresponding results known for models with noise in the state equations. The unknown parameters to be estimated were contained in the equations of state and observation. The software developed within the MATLAB system was tested on the model of electro dialysis, which can be used, for example, in the production of fresh water from salt. The results of the numerical researches revealed the advantage of the proposed robust modifications over the classical version of the maximum likelihood criterion and showed their efficiency as a whole. The comparative analysis of the effectiveness of these modifications (the values of the relative error of estimation in the parameter space were considered) performed at random and grouped nature of the location of anomalous observations allowed to detect the most successful of them and recommend it for practical application

Key words: parametric identification, robust estimation, maximum likelihood estimation, outliers, nonlinear continuous-discrete system

References

1. Lemeshko B.Yu. "Robust methods for the estimation and rejection of anomalous measurements", *Industrial Laboratory (Zavodskaya laboratoriya)*, 1997, vol. 63, no, pp. 297-302.
2. Kobzar' A. I. "Applied mathematical statistics. For engineers and scientists" ("Prikladnaya matematicheskaya statistika"), Moscow, FIZMATLIT, 2006, 816 p.
3. Huber P.J., Ronchetti E.M. "Robust statistics", New Jersey, John Wiley & Sons, 2009. 371 p.
4. Maronna R.A., Martin D.R., Yohai V.J. "Robust statistics. Theory and Methods", England, John Wiley & Sons, 2006, 403 p.
5. Chubich V.M., Prokof'eva A.E. "Parametric identification of stochastic linear discrete systems based on robust filtering", *Proceedings of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 22, no. 2. pp. 84-94.
6. Chubich V.M., Prokof'eva A.E. "Comparative analysis on some robust filters for non-stationary linear discrete systems", *Proceedings of Irkutsk State Technical University (Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 21, no. 12, pp. 123-137.
7. Ivchenko G.I., Medvedev Yu.I. "Introduction to mathematical statistics" ("Vvedenie v matematicheskuyu statistiku"), Moscow, LKI Publ., 2010, 600 p.
8. Borovkov A.A. "Mathematical statistics" ("Matematicheskaya statistika"), Novosibirsk, Nauka, 1997, 772 p.
9. Mudrov V.I., Kushko V.L. "Methods for measurement processing. Quasi-like estimates", Moscow, Radio i svyaz', 1983. 304 p.
10. Åström K.J. "Maximum Likelihood and Prediction Error Methods", *Automatica*, 1980, vol. 16, pp. 551-574.
11. Plataniotis K.N., Androustos D., Venetsanopoulos A.N. "Nonlinear filtering of non-Gaussian noise", *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 1997, vol. 19, pp. 207-231.
12. Särkkä S., Nummenmaa A. "Recursive noise adaptive Kalman filtering by variational Bayesian approximations", *IEEE Transactions on Automatic control*, 2009, vol. 54, pp. 596-600.
13. Jwo D.-J., Chung F.-C., Weng T.-P. "Adaptive Kalman filter for navigation sensor fusion", *Sensor Fusion and its Applications. In TechOpen*, 2010, pp. 66-90.
14. Galvanin F., Marchesini R., Barolo M., Bezzo F., Fidaleo M. "Optimal design of experiments for parameter identification in electro dialysis models", *Chemical engineering research and design*, 2016, no. 105, pp. 107-119.
15. Fidaleo M., Moresi M., "Electrodialytic desalting of model concentrated NaCl brines as such on enriched with a non-electrolyte osmotic component", *Journal of membrane science*, 2011, no. 367, pp. 220-232.
16. Chubich V.M., Filippova E.V. "Active identification of stochastic dynamic systems. Design of experiments for models of continuous-discrete systems" ("Aktivnaya identifikaciya stohasticheskikh dinamicheskikh sistem. Planirovanie eksperimenta dlya modely nepreryvno-diskretnykh system"), Novosibirsk, NSTU, 2017, 96 p.
17. Izmaylov A.F., Solodov M.V. "Numerical methods of optimization" ("Chislennyye metody optimizatsii"), Moscow, FIZMATLIT, 2008, 320 p.
18. Coleman T.F., Zhang Y. "Optimization Toolbox. User's Guide", The MathWorks, Natick (Massachusetts, USA), 2018, 1172 p.

Submitted 26.12.2018; revised 25.01.2019

Information about the authors

Vladimir M. Chubich, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk 630073, Russia), e-mail: chubich@ami.nstu.ru
Svetlana O. Kulabukhova, MA, Novosibirsk State Technical University (20 Prospekt K. Marksa, Novosibirsk, 630073, Russia), e-mail: kulabuhova.s@gmail.com

ИССЛЕДОВАНИЕ СЛЕДЯЩЕЙ СИСТЕМЫ С АСТАТИЧЕСКИМ МОДАЛЬНЫМ РЕГУЛЯТОРОМ В МАТЛАВ

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

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: при работе мобильных транспортных систем (МТС), например подвижного промышленного робота, в режиме слежения за траекторией перемещения при максимальном быстродействии актуально уменьшение скоростной ошибки по управляющему и возмущающему воздействию. В классической теории автоматического управления скоростная ошибка может быть сведена к нулю при использовании астатической 2-го порядка следящей системы (СС), которая обладает структурной неустойчивостью. В этом случае используются специальные корректирующие устройства или применяется изотропное звено, компенсирующее дополнительный фазовый сдвиг в логарифмической фазовой частотной характеристике за счет введения форсирующе-интегрирующего звена в астатическую 1-го порядка СС. Модальный регулятор (МР) – это статический (пропорциональный) регулятор. Исследуется возможность применения в одноконтурной астатической 1-го порядка СС астатического МР с наблюдателем (НБ) для уменьшения скоростной и ошибки по ускорению при заданном быстродействии в условиях воздействия помех в цепи обратной отрицательной связи (ООС) и входном сигнале при типовых входных стандартных сигналах. Астатизм МР обеспечивается введением интегрирующих звеньев в обратные связи по составляющим вектора состояния (X1, X2, X3 и X4) СС. Проведено исследование влияния коэффициентов астатического МР СС на скоростную ошибку и ошибку по ускорению при сохранении заданного быстродействия. Приведено сравнение параметров качества управления СС с астатическим и статическим МР. Передача управляемых и управляющих информационных сигналов в условиях помех связана с помехозащищенностью или восстановлением полезного сигнала при приеме и передаче. Восстановление полезного сигнала при приеме и передаче управляющих и управляемых сигналов СС обеспечивается применением фильтра Калмана. В одноконтурной СС с астатическим МР и НБ ошибка по возмущающему воздействию значительно меньше ошибки по управляющему воздействию

Ключевые слова: мобильные транспортные системы, следящая система, скоростная ошибка, ошибка по ускорению, структурная схема одноконтурной системы, статический модальный регулятор, астатический модальный регулятор, наблюдатель, фильтр Калмана, передаточная функция

Введение

Для дистанционного управления мобильных транспортных систем требуется высокая точность отслеживания заданной траектории перемещения при заданном быстродействии.

При применении следящей системы (СС) с модальным регулятором (МР) и наблюдателем (НБ) [1-3] необходимо оценить скоростную ошибку и ошибку по ускорению в режиме слежения при воздействии помех в системе управления и изменении нагрузки.

Суммарная ошибка СС при медленно изменяющемся входном сигнале определяется

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_x(t) + \varepsilon_f(t),$$

где $\varepsilon(t)$ – ошибка системы; $\varepsilon_x(t)$, $\varepsilon_f(t)$ – составляющие ошибки по управляющему и возмущающему воздействию.

Составляющая ошибки СС по управляющему воздействию определяется

$$\varepsilon_x(t) = \varepsilon_1(t) + \varepsilon_2(t) + \varepsilon_3(t),$$

где $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$, $\varepsilon_3(t)$, – позиционная, скоростная и ошибка по ускорению.

Постановка задачи

Для исследований используется структурная схема СС [3].

На рис. 1 изображена структурная схема СС с астатическим МР, НБ, воздействием помехи в цепи датчика, воздействием возмущения, развернутой структурной схемой двигателя и при подаче линейного входного сигнала.

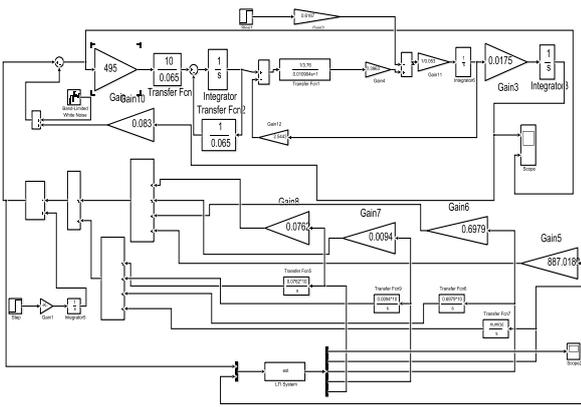


Рис. 1. Структурная схема СС с астатическим МР, НБ, воздействием помехи в цепи датчика, воздействием возмущения, развернутой структурной схемой двигателя и при подаче линейного входного сигнала

Возмущение подается в виде статической нагрузки СС с учетом коэффициента передачи по возмущению $K_m = R_y / (C_m C_e)$, выбранного

$$A1 = \begin{pmatrix} 0 & K_{ред} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & -1/(T_M T_y) & K_{\partial} / (T_M T_y) & 0 \\ -K_{дл} R1 - (K11 + K12/p) * R1 & -(K22 + K21/p) * R1 & -(K33 + K31/p) * R1 & -\frac{1}{T_y} - (K44 + K41/p) * R1 \end{pmatrix}$$

$$B1 = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & M_c * K_m & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ K_f * R1 & 0 & v \end{pmatrix}$$

$$C1 = (1 \ 0 \ 0 \ 0) \quad D1 = 0$$

В матрицах СС с астатическим МР введено обозначение: $R1 = K_{ny} * K_y / T_y$.

Для оценки скоростной ошибки и ошибки по ускорению используется линейный и нелинейный типовые входные сигналы.

Временная характеристика выходного сигнала, скоростной ошибки СС с астатическим МР, НБ, без воздействия помехи и при отработке угла 180 град. представлена на рис. 2.

для передаточной функции по возмущению [2].

Астатизм МР для исходной СС обеспечивается введением интегрирующих звеньев в обратные связи по составляющим вектора состояния.

Передаточная функция МР по составляющим вектора состояния X задается

$$W_i(s) = K11 + K12/s = K_i + n * K_i / s,$$

где K_i – значения коэффициента МР ($K1 - K4$); n – коэффициент.

Коэффициент n , определяющий коэффициент передачи интегрирующего звена $K_i = n * K_i$, влияет на быстродействие СС.

Матрицы $A1, B1, C1$ и $D1$ одноконтурной СС с астатическим МР воздействием возмущения M_c и помехи v определяются

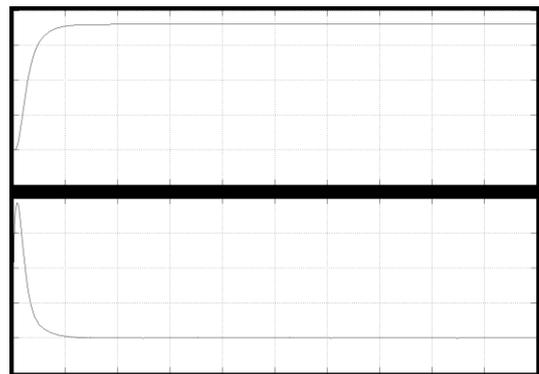


Рис. 2. Временная характеристика выходного сигнала, скоростной ошибки СС с астатическим МР, НБ, без помехи, при отработке угла 180 град

Временная характеристика выходного сигнала, ошибки по ускорению СС с астатическим МР, НБ, без воздействия помехи и при нелинейном входном сигнале представлена на рис. 3.

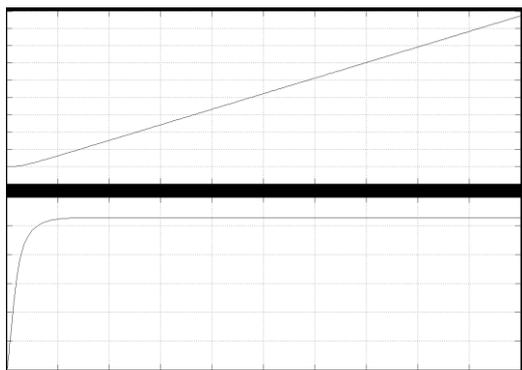


Рис. 3. Временная характеристика выходного сигнала, ошибки по ускорению СС с астатическим МР, НБ, без воздействия помехи и при нелинейном входном сигнале

В табл. 1 представлено изменение кратности корней полинома p при выборе коэффициентов МР и коэффициенты.

Таблица 1

Кратность корней полинома p и коэффициенты МР

Выбор корней	K1	K2	K3	K4
2* p	12,9377	-0,0026	0,0002	0,0169
3* p	72,6322	0,0573	0,0014	0,0339
4* p	237,0386	0,2108	0,0038	0,0508
5* p	588.3272	0.4898	0.0072	0.0678
6* p	1232.7	0.9	0	0,1

$$\frac{1933 s^{12} + 4.141e05s^{11} + \dots + 0.7218s^3 + 1.159e-15s^2 - 5.923e-34s}{s^{12} + 321s^{11} + 4.3e04s^{10} + \dots + 1.975e12s^3 + 0.0174s^2 + 6.784e-17s + 5.918e-32}$$

Передаточная функция в tf -форме ошибки по возмущению $W_{\epsilon f}(s) = \epsilon(s)/f(s) =$

$$\frac{0.0169 s^2 + 1.81 s + 23.85}{s^4 + 107.1s^3 + 4217s^2 + 4.317e04s + 1.22e05}$$

Установившееся значение скоростной ошибки СС с МР и НБ при единичном входном сигнале определяется отношением коэффициентов $W_{\epsilon x}(s) b_1/a_0 = 0.01$ 1/рад., что подтверждается исследованиями в табл. 2.

Ошибка по возмущению, определяемая отношением коэффициентов полинома числителя $W_{\epsilon f}(s) b_1/a_0$, на несколько порядков меньше.

Помехи в структурной схеме СС с МР и НБ при моделировании в инструментальной среде Matlab задаются генератором шума **Band-Limited** [3].

На рис. 4 представлена временная характеристика выходного сигнала, скоростная ошибка СС с астатическим МР, НБ, с воздействием помехи и при линейном входном сигнале

В табл. 2 представлены параметры составляющих ошибки СС: ошибка по возмущению – ϵ_{f1} ; скоростная ошибка $\epsilon_{2уст.а}$; ошибка по ускорению $\epsilon_{3уст.а}$ – СС с астатическим МР; ошибка по возмущению – ϵ_{f2} ; скоростная ошибка $\epsilon_{2уст.с}$ – СС с статическим МР.

Ошибка по ускорению $\epsilon_{3уст.с}$ СС с статическим МР линейно возрастает в функции времени.

Таблица 2

Кратность корней полинома p при выборе коэффициентов МР СС с астатическим и статическим МР и параметры составляющих ошибки СС

Выбор корней	ϵ_{f1} сек.	$\epsilon_{2уст.а}$ 1/сек.	$\epsilon_{3уст.а}$ 1/сек.	ϵ_{f2} сек.	$\epsilon_{2уст.с}$ 1/сек.
2* p	0.0002	0.04	5,3	0.0002	5,28
3* p	0.0002	0.035	5,3	0.0002	5,27
4* p	0.0002	0.018	5,3	0.0002	5,26
5* p	0.0002	0.012	5,3	0.0002	5,27
6* p	0.0002	0.01	5,3	0.0002	5.29

Передаточная функция в tf -форме ошибки по управлению $W_{\epsilon x}(s) = \epsilon(s)/X(s) = B(s)/A(s)$ СС с МР и НБ определяется при значении 2* p .

$B(s)/A(s)$ СС с МР и НБ определяется при значении 2* p

ствием помехи, линейном входном сигнале и кратности корней полинома 2* p .

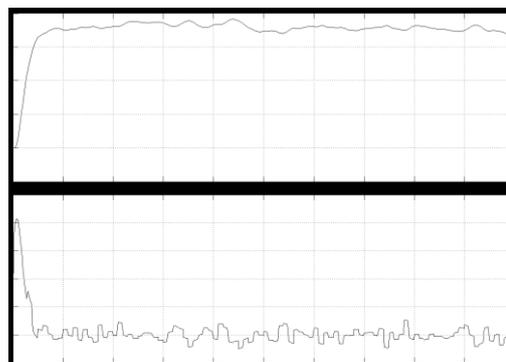


Рис. 4. Временная характеристика выходного сигнала, скоростной ошибки СС с астатическим МР, НБ, с воздействием помехи и при линейном входном сигнале

На рис. 5 представлена временная характеристика выходного сигнала, ошибки по ускорению СС с астатическим МР, НБ, с воздействием помехи, нелинейном входном сигнале и кратности корней полинома 2^*p .

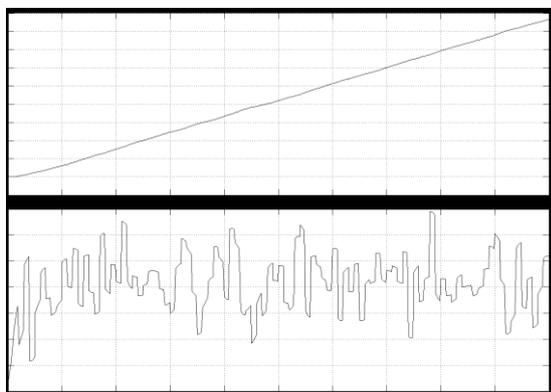


Рис. 5. Временная характеристика выходного сигнала, ошибки по ускорению СС с астатическим МР, НБ, с воздействием помехи и при нелинейном входном сигнале

Как видно, временная характеристика выходного сигнала, скоростная и ошибка по ускорению СС с астатическим МР и НБ искажаются и появляются колебания.

Исследования, проведенные в [3], доказали, что применение фильтра Калмана (ФК) при моделировании в среде Matlab структурных схем с векторно-матричным описанием является эффективным способом подавления помех в выходном сигнале СС с МР и НБ.

На рис. 6 изображена структурная схема СС с астатическим МР, НБ, ФК, установленным в цепи обратной отрицательной связи (ООС) и в цепи входного сигнала, с воздействием помехи по входному сигналу и в ООС, воздействием возмущения, использованием развернутой структурной схемы двигателя и с линейным входным типовым сигналом.

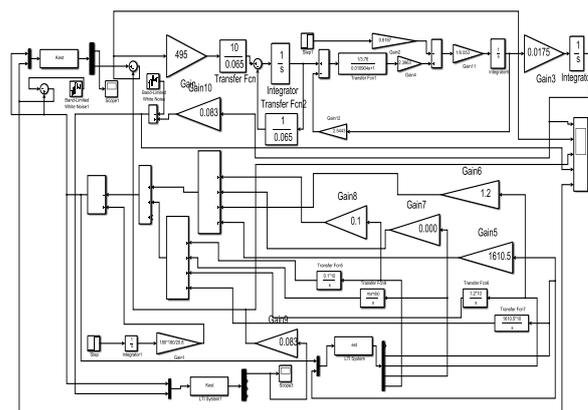


Рис. 6. Структурная схема СС с астатическим МР, НБ, ФК, воздействием помехи по входному сигналу, воздействием возмущения, развернутой структурной схемой двигателя и линейном входном сигнале

Временная характеристика выходного сигнала, скоростная ошибка, выходной сигнал ФК в цепи ООС, временная характеристика сигнала ООС с помехой, временная характеристика входного сигнала с помехой СС с астатическим МР, НБ, ФК, воздействием возмущения, при линейном входном сигнале представлены на рис. 7.

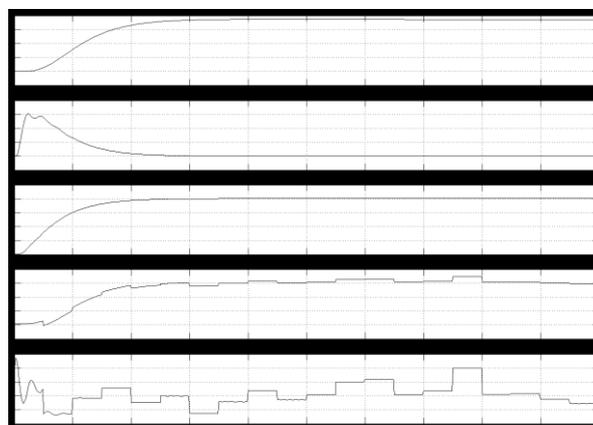


Рис. 7. Временная характеристика выходного сигнала, скоростная ошибка, выходной сигнал ФК, временная характеристика сигнала ООС с помехой, СС с астатическим МР, НБ, ФК, с воздействием помехи по входному сигналу, при линейном входном сигнале

Передаточная функция в tf -форме ошибки $W_{\epsilon}(s) = \epsilon(s) / X(s) = B(s) / A(s)$ СС с МР, НБ и ФК определяются при значении 2^*p :

$$\frac{2.83e04s^{15} + 8.657e06s^{14} + \dots - 7.283e14s^4 - 1920s^3 - 6.5e-20 s^2}{s^{16} + 95.4s^{15} + 2.46e05s^{14} + \dots + 2.4e19s^4 + 3.2e19s^3 - 6.1e05s^2 + 3.99e-09s + 1.16e-24}$$

В представленной передаточной функции $W_{\Sigma}(s)$ СС с МР, НБ и двумя ФК отсутствуют в полиноме $B(s)$ числителя коэффициенты b_0 , b_1 , и теоретически отсутствует так же установившееся значение скоростной ошибки.

В этом случае структурная схема СС с астатическим МР и НБ, ФК как в цепи датчика, так и в цепи формирования линейного входного сигнала, аналогична астатической СС 2-го порядка.

Оценим влияние изменения амплитуды помехи (увеличение в пять раз) в цепи входного сигнала и в цепи ООС на способность фильтрации и восстановления полезного сигнала из сигнала с помехой двух ФК.

На рис. 8 представлены те же временные характеристики при увеличенной амплитуде помехи и постоянном возмущении.

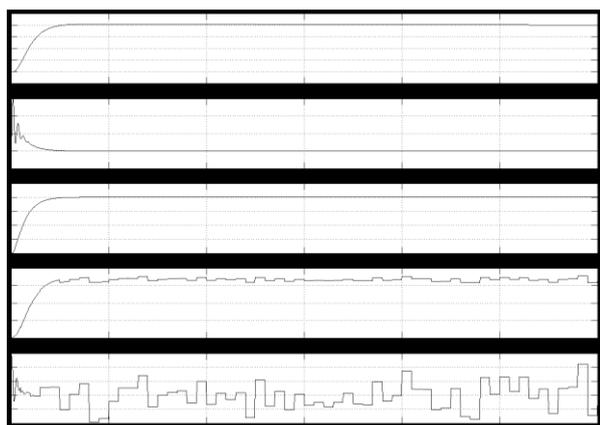


Рис. 8. Временная характеристика выходного сигнала, ошибка по ускорению, выходного сигнала ФК, временная характеристика сигнала ООС с помехой, СС с астатическим МР, НБ, ФК и с воздействием помехи по входному сигналу, при линейном входном сигнале и увеличении амплитуды помехи

Как видно из представленных временных характеристик СС с астатическим МР, НБ, с использованием двух ФК, линейного и нелинейного входных сигналов (с постоянной скоростью и постоянным ускорением) при дополнительном воздействии помехи на входной сигнал и установки ФК в цепи входного сигнала, выходной сигнал СС не искажается и постоянная составляющая скоростной ошибки отсутствует и при увеличении амплитуды помехи.

При аппаратной и программной реализации МР, НБ и двух ФК можно преобразовать СС в структурную схему, где один из ФК выполняет и функции НБ – рис. 9.

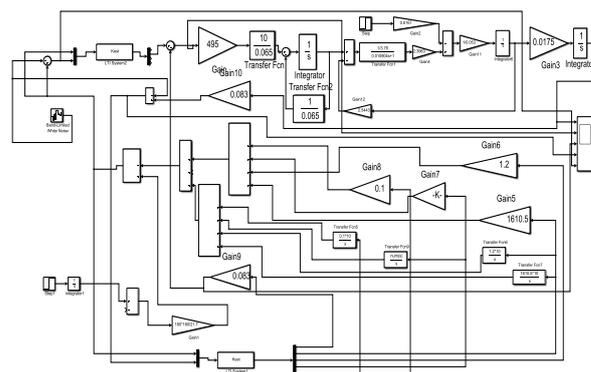


Рис. 9. Структурная схема СС с астатическим МР, двумя ФК, воздействием помехи по входному сигналу и в цепи датчика, воздействием возмущения, развернутой структурной схемой двигателя и линейном входном сигнале

Временные характеристики выходного сигнала и скоростной ошибки СС с астатическим МР и двумя ФК при линейном входном сигнале – рис. 10.



Рис. 10. Временные характеристики выходного сигнала и скоростной ошибки СС с астатическим МР и двумя ФК при линейном входном сигнале

- ФК выполняет функции НБ, при этом:
- выходной сигнал в структурной схеме СС – колебательный;
 - требуется получение новых коэффициентов МР (K_1 , K_2 , K_3 и K_4) для аperiodической переходной характеристики 2-го порядка согласно требованиям [1-3];
 - необходимо изменение коэффициента K_f на входе СС, для получения требуемого выходного сигнала от МР.

Выводы

Установившееся значение скоростной ошибки в одноконтурной СС с НБ, как астатической 1-го порядка, может быть значительно уменьшено при использовании астатического МР.

Астатический МР для СС с НБ может быть получен при дополнительном использовании в обратных связях по составляющим управляемого вектора состояния X интегрирующих звеньев, коэффициенты передачи которых подбираются.

Быстродействие СС с астатическим МР и СС с статическим МР при одних и тех же коэффициентах МР одинаковое, скоростная ошибка с астатическим МР при этом на несколько порядков меньше.

Повышение кратности корней полинома p для выбора коэффициентов астатического МР при обработке линейного сигнала не влияет на быстродействие, в отличие от обработки ступенчатого входного сигнала СС с статическим МР, где время уменьшается.

В передаточной функции по ошибке для СС с МР, НБ, ФК отсутствуют коэффициенты b_0 и b_1 , что теоретически повышает астатизм астатической 1-го порядка СС.

Воздействие помех в системе управления СС с астатическим МР и НБ также компенсируется применением ФК.

Дополнительное воздействие помех в входном сигнале СС с астатическим МР и НБ требует установки дополнительного ФК.

Воздействие возмущения и увеличение амплитуды помехи не приводит к увеличению суммарной ошибки СС.

Один из установленных ФК может выполнять и функции НБ, при этом скоростная ошибка отсутствует, но искажается форма выходного сигнала СС.

Литература

1. Харченко А. П., Слепокуров Ю.С., Аверьянов П.А. Синтез САУ в среде Matlab // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 4. С. 7-12.
2. Исследование влияния нагрузки в следящей системе в Matlab и Scilab / А. П. Харченко, Ю.С. Слепокуров, П.А. Аверьянов, И.Ю. Свицкий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 39-43.
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.

Поступила 03.12.2018; принята к публикации 24.01.2019

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: eayts@yandex.ru

STUDY OF TRACKING SYSTEM WITH ASTATIC MODAL REGULATOR IN MATLAB

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

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: when mobile transport systems (MTS), for example, a mobile industrial robot, are operating in tracking mode of movement at maximum speed, it is important to reduce the speed error in the control and disturbing effects. In the classical theory of automatic control, the velocity error can be reduced to zero by using an astatic tracking system of 2nd order (TS), which is structurally unstable. In this case, special corrective devices are used or an isodromic link is used, which compensates for an additional phase shift in the logarithmic phase frequency characteristic due to the introduction of a force-integrating element into the first-order astatic TS. The modal regulator (MR) is a static (proportional) regulator. The possibility is studied of using an astatic MR with an observer (OB) in a single-loop astatic static TS of 1st order to reduce the speed and acceleration error for a given speed under the influence of interference in the negative feedback circuit (NF) and the input signal with typical input standard signals. Astaticism of MR is provided by the introduction of integrating links in the feedback on the components of the state vector (X_1 , X_2 , X_3 and X_4) of TS. A study was made of the influence of the coefficients of an astatic MR TS on the velocity error and the error in acceleration while maintaining a given response speed. A comparison of the quality parameters of TS control with astatic and static MR is given. Transmission of controlled and control information signals in the presence of interference is associated with noise immunity or restoration of the useful signal during reception and transmission. Recovery of the useful signal in the reception and transmission of control and controlled signals of TS is provided by the use of a

Kalman filter. In single-loop of TS with astatic MR and OB, the error in disturbing influence is much less than the error in controlling action

Key words: mobile transport systems, tracking system, speed error, acceleration error, block diagram of a single-circuit system, static modal controller, astatic modal controller, observer, Kalman filter, transfer function

References

1. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Aver'yanov P.A. "Synthesis SAU in Matlab environment", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13., no. 4, pp. 7-12.
2. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Averyanov P.A., Svirskiy I.Yu. "Study of the effect of the load in the servo system in Matlab and Scilab", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 39-43.
3. Kharchenko A.P., Slepokurov Yu.S., Karevskaya Yu.N. "Study 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.

Submitted 03.12.2018; revised 24.01.2019

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 st., Voronezh 394026, Russia), e-mail: usrs@list.ru.

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

СИСТЕМА КОНТРОЛЯ И УПРАВЛЕНИЯ ДОСТУПОМ НА ПРЕДПРИЯТИЕ: ПОНЯТИЕ, ХАРАКТЕРИСТИКА И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ

А.Е. Козлов

ПАО «Арсеньевская авиационная компания «Прогресс» имени Н.И. Сазыкина»,
г. Арсеньев, Россия

Аннотация: задача автоматизации контроля и управления доступом, а также учета рабочего времени персонала предприятия – одна из актуальных в нынешних условиях хозяйствования. В современную эпоху человек изобрел ворота, шлагбаумы, турникеты, предназначенные для ограничения прохода людей и проезда транспорта. Однако проблема создания электронной системы контроля управления доступом и использования её как на мелких предприятиях, так и на крупных, осуществляющих производство и выпуск высокоточной и наукоемкой продукции, остается актуальной. Без должного контрольно-пропускного и внутриобъектового режимов невозможно поддержание на соответствующем уровне безопасности предприятия и ответственности работников за соблюдение правил внутреннего трудового распорядка. Что представляет собой современная система контроля доступом, какие требования предъявляются к ней, каково её предназначение для промышленных предприятий и как она связана с системой учета рабочего времени и системой оплаты труда – основные вопросы, освещаемые в данной статье

Ключевые слова: контролирование сотрудников, считыватель, управление доступом, электронный учет рабочего времени, СКУД

Введение

В условиях развития импортозамещения и усиления развития отраслей промышленности одной из важнейших задач становится сохранение предприятиями лидирующих позиций на конкурентоспособном рынке. Это невозможно без должного обеспечения безопасности предприятия и его работников. Раскрытие сущности безопасности тесно связано с понятием угрозы безопасности, которая в данной статье связана с обеспечением физической безопасности при входе на предприятие, и систем, используемых для контроля доступа на предприятие.

Что такое «система контроля доступа»? Зачем она нужна? Основная задача системы контроля доступа – с помощью механизмов или электронных устройств ограничить доступ человеку на объект (помещение, предприятие) до того момента, пока он не подтвердит свои права на проход. Как принято, все новое и лучшее изначально предназначалось только для военных объектов. Но сегодня почти у каждого появилась возможность оборудовать свой объект системой контроля управления доступом (СКУД).

Конечно, сразу возникает один вопрос, а чем так плох старый способ контроля - через обычную проходную, где сидят вахтеры, сотрудники службы безопасности, девушки на ресепшен? Ответ очевиден - человек может делать

ошибки, пропускать по договоренности знакомых, не имеющих допуска на предприятие, ему это свойственно, а вот система контроля доступа ошибок допускать просто не может, так как она действует только в рамках заданной программы и отрицает какие-либо субъективные факторы.

Применение и состав СКУД

СКУД позволяет осуществлять круглосуточный контроль ситуации на охраняемой территории, обеспечивать безопасность сотрудников, а также посетителей, ограничить несанкционированный доступ к материальным ценностям [1]. В общем, все СКУД функционируют по одинаковым принципам, существенная разница между ними прослеживается только в надежности, качестве и удобстве повседневного использования.

Контролирование сотрудников может быть построено так называемой бесконтактной проверкой их присутствия на рабочем месте. Для этого достаточно установить оборудование системы контроля доступа в офис у входной двери. Тогда ответственность каждого за приход к началу рабочего дня без опозданий повышается, потому что исключается субъективный подход. Каждому сотруднику предприятия выдается карта, которую необходимо при входе и выходе проводить по считывающему устройству (считывателю) или вставлять в него.

В зависимости от места, целей установки проходной, т.е. обеспечения необходимой степе-

ни безопасности, производители предлагают турникеты трех видов: триподы, створчатые, роторные (рис. 1). Они позволяют как полностью блокировать проем прохода, так и частично [2].



Рис. 1. Виды турникетов

Для учебных заведений, офисов, метро используют триподы (треножник из 3-х металлических трубок), створчатые (с оптическими датчиками) устанавливают в общественных местах, роторные подходят для предприятий, куда по-сторонним проход должен быть запрещен.

Итак, система контроля доступа состоит из [3, 4]:

- пользовательского идентификатора – им может быть электронное устройство, карта, брелок или человеческий орган. Если это электронное устройство, то, как правило, внутри него имеется чип с антенной или используется магнитная полоса [5]. Если ли же это человеческий орган, то, в основном, используют отпечаток одного из пальцев (например, большого пальца правой руки) или же всей руки сразу, либо радужную оболочку глаза, или иные биометрические признаки личности: черты лица, геометрия кисти руки, рисунок сосудов за сетчаткой глаза, расположение вен на руке, динамические характеристики почерка, особенности речи, динамика ударов по клавишам и т.д. Любому пользовательскому идентификатору присваивается уникальный цифровой код, который, в свою очередь, содержит необходимую информацию о правах доступа его владельца [6];

- считывателя – устройство, выполняющее считывание информации с пользовательского идентификатора и направляющее полученные данные в контроллер системы доступа;

- преграждающих устройств (точки прохода), таких как турникеты, двери с замками, ворота, шлагбаумы, шлюзы. Обычно для полного контроля доступа в точках проходов устанавливают два считывателя: один - на входе, другой - на выходе. Если необходим только входной контроль, то в таком случае считыватель на выходе обычно не устанавливают - выход делают либо свободным, либо через кнопку выхода (RTE);

- кнопки выхода (RTE), которая служит для кратковременного разрешения прохода,

при этом контроллер системы контроля доступа запоминает факт выхода через точку прохода;

- контроллера системы контроля доступа – ключевой электронный модуль, реализующий идентификацию объектов доступа, по полученной информации от считывателей и осуществляющий управление разграничением доступа на территорию, управление преграждающими и сигнализирующими устройствами, получение событий от различных датчиков и принятие соответствующих решений с передачей их исполнительным устройствам и программному обеспечению;

- программного обеспечения СКУД - элемента системы, с помощью которого можно централизованно управлять контроллерами системы контроля доступа, используя персональный компьютер (ПК), вести мониторинг происходящих событий, формировать отчеты и т.д.;

- конверторов среды для подключения модулей СКУД друг к другу и к ПК, предоставляющих возможность организовать контроль доступа и учет рабочего времени на предприятии с несколькими проходными и большим количеством дверей или турникетов. Контроллер подключается к компьютеру с помощью специального конвертера (USB или TCP/IP) по протоколу RS-485 (рис. 2) [7-9];

- вспомогательного оборудования (датчики, кнопки, блоки бесперебойного питания и т.п.).

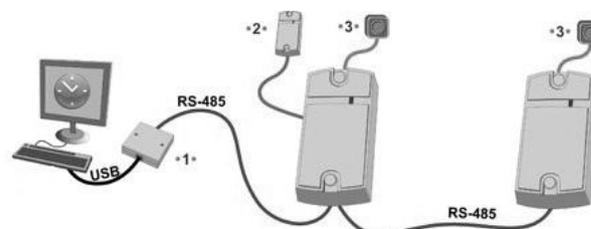


Рис. 2. Принцип объединения нескольких контроллеров в единую сеть

Итак, что же такое СКУД? СКУД - это целостная система, состоящая из программных и технических средств, используя которые осуществляется контроль и управление доступом в отдельные помещения, на обозначенные зоны и территории, контроль передвижения транспорта и персонала, а также контроль времени их присутствия на территории охраняемого объекта.

Требования к СКУД

Современная СКУД должна [9, 10]:

- обеспечивать контроль и управление доступом на различных типах контрольно-пропускных пунктов (КПП);

- исключать пронос/провоз запрещенных предметов и препаратов (оружия, взрывчатых и наркотических веществ, алкоголя, материалов и иных ценностей);
- задерживать потенциальных нарушителей как внутреннего трудового распорядка, так и внешних посетителей, пытающихся проникнуть на охраняемые объекты;
- иметь возможность использования различных способов удостоверения личности;
- иметь открытую программно-аппаратную платформу, которую впоследствии можно интегрировать с любой программой, осуществляющей учет рабочего времени;
- обладать возможностью корректиров-

ки по ситуациям и в соответствии с целями предприятия;

- обеспечивать автоматизацию процессов управления и координацию деятельности объекта;
- системно функционировать в случае выхода из строя её отдельных компонентов и в других чрезвычайных ситуациях (например, при пожаре, наводнении, отключении электроэнергии и т.д.).

Для того чтобы СКУД, а вместе с ней и система электронного учета рабочего времени функционировали эффективно, должна быть четко выстроена схема взаимодействия основных компонентов (рис. 3).

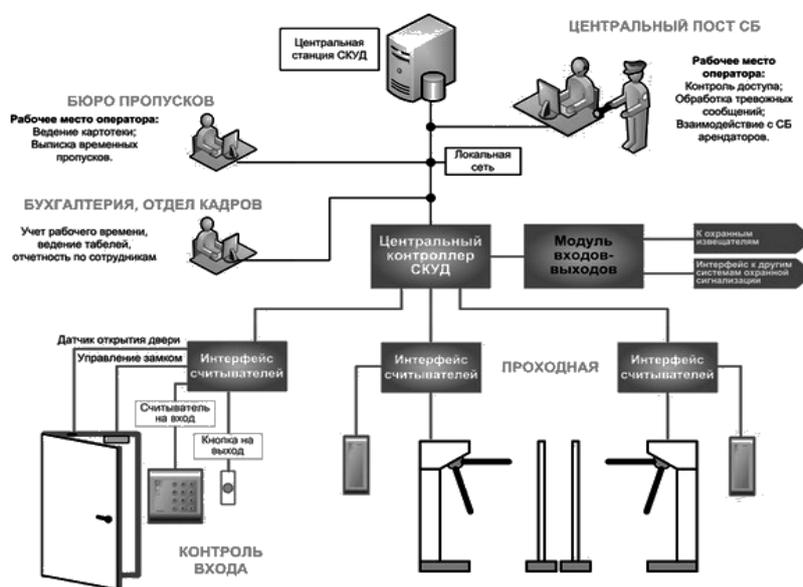


Рис. 3. Структура интегрированной СКУД

Перед тем, как интегрировать контрольно-пропускной режим, систему электронного учета рабочего времени и внедрить СКУД, необходимо определить [11]:

- объекты, площадки, здания, помещения, на которых необходимо организовать КПП;
- характер КПП для пропуска сотрудников, транспортных средств, материальных ценностей;
- потоки транспортных средств, грузов, материальных ценностей и людей (персонала предприятия и посетителей), проезжающих/проходящих через КПП и в отдельные здания (помещения) в течение суток;
- возможность провоза/пронеса через системы контроля доступом крупногабаритных грузов;
- возможность технических устройств, которыми будет оборудован КПП, осуществить

быструю эвакуацию сотрудников предприятия в случае экстренных ситуаций (например, пожар);

- необходимость установки средств и систем обнаружения оружия, взрывчатых, наркотических веществ, диктофонов, планшетов и иных технических средств;
- типы систем идентификации личности и виды используемых турникетов;
- виды пропусков, применяемых на предприятии (постоянные, временные, разовые и т.д.);
- возможность использования видеокамер совместно с системой управления доступом для повышения эффективности контрольно-пропускных функций;
- порядок прохода сотрудников в нерабочее время (за пределами нормальной продолжительности рабочего дня / рабочей смены), вы-

ходные и праздничные дни, ограничение доступа персонала в период отпусков и на время нетрудоспособности (в том числе и разрешение доступа в случае отзыва работника из отпуска или командировки), нахождение персонала на территории охраняемого объекта, работающего в режимах гибкого рабочего времени, сменности, ненормированного рабочего дня;

- порядок проезда/прохода дежурных специальных служб объекта (электриков, слесарей, работников связи и т.д.);
- порядок получения ключей, вскрытие помещений, оборудованных охранной сигнализацией, и т.д.

Не стоит забывать, что существуют отдельные категории лиц, которые пользуются правом прохода на объект без пропуска при предъявлении служебного удостоверения. К ним относятся:

- работники прокуратуры, полиции;
- отдельные категории работников санитарно-эпидемической службы, осуществляющие санитарный надзор.

Учитывая все вышеизложенные требования к СКУД и учитывая законодательство, необходимо разработать инструкцию о пропуском и внутриобъектовом режимах, содержащую следующие сведения:

- порядок пропуска сотрудников предприятия и иных лиц через КПП;
- порядок ввоза/вывоза, вноса/выноса на/с охраняемый(ого) объект(а) товарно-материальных ценностей посредством транспортных средств;
- пропуска, их виды, порядок оформления и хранения, их назначение;

- обязанности должностных лиц по обеспечению охраны, пропускного и внутриобъектового режимов.

Система учета рабочего времени

Для упрощения расчета заработной платы работникам, исходя из отработанных ими часов, также устанавливают систему учета рабочего времени сотрудников. Она позволяет повысить дисциплину в коллективах, потому что система может фиксировать каждый уход из кабинета, например, покурить, по своим делам или на обед [12]. Каждое опоздание, попадающее в отчет системы, будет известно работнику бухгалтерии.

Установка электронной проходной позволяет исключить человеческий фактор, но и поставить человека перед необходимостью фиксировать свой приход на рабочее место. Самые распространенные на данный момент это:

- системы учета рабочего времени по отпечатку пальца;
- системы учета рабочего времени по карточкам.

Обе просты, удобны в эксплуатации, но более надежной является первая, потому что фиксирует приход сотрудника на 100%, т.к. известно, что не бывает двух одинаковых отпечатков пальцев, а вторая позволяет другому человеку зафиксировать карточкой приход её владельца.

В общем виде декомпозиция процесса автоматизации учета рабочего времени приведена на рис. 4.

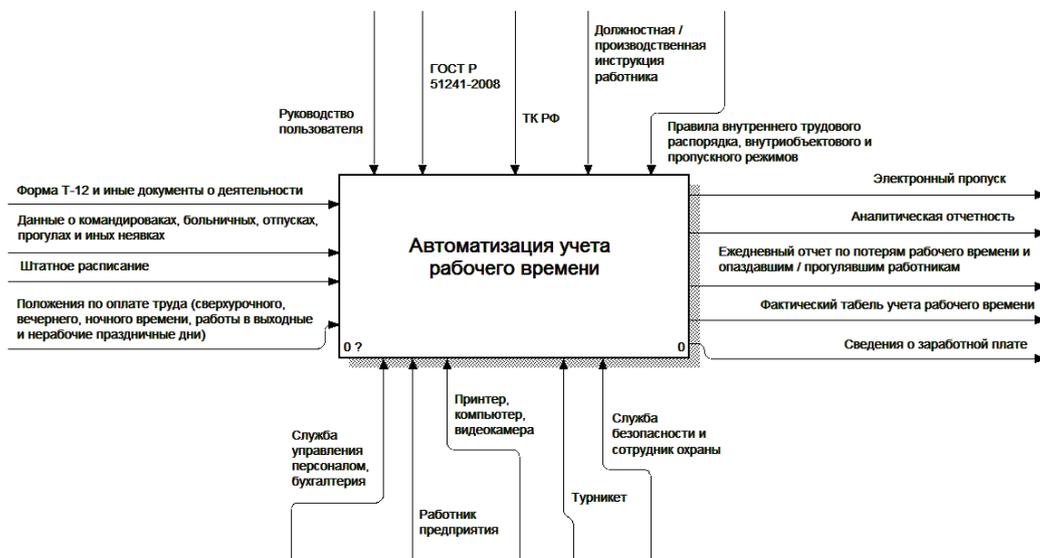


Рис. 4. Декомпозиция процесса автоматизации учета рабочего времени в BPWiN

Функционал системы учета рабочего времени позволяет решить любую задачу контроля доступа и учета рабочего времени и обладает широким спектром функциональных возможностей [13]:

- ведение графика работ сотрудников, учет больничных, командировок, отпусков, дней отдыха, обеденного перерыва (фиксированного, плавающего, адаптивного);
- мгновенная регистрация и мониторинг опозданий, ранних уходов, прогулов, контроль сотрудников на пропускных пунктах предприятия;
- возможность добавления собственных событий, регистрации местных командировок и дней отдыха, учет задач и поручений;
- расчет заработной платы (включая премии, выплаты стимулирующего и компенсационного характера) на основе графика режима работы и фактически отработанного времени;
- формирование отчетности, покрывающей весь спектр учета рабочего времени сотрудников, в том числе табель Т-13 и Т-12;
- фотофиксация, позволяющая получать фото сотрудников с IP камер при регистрации прихода/ухода;
- разграничение прав доступа сотрудников по работе с программой;
- разграничение времени прохода и уровня доступа сотрудников в контролируемые зоны.

Заключение

Подводя итог, хотелось бы отметить, что функционал системы учета рабочего времени содержит уникальные данные, присущие работнику, а СКУД, в свою очередь, оперируя сведениями о фамилии, имени, отчестве работника, его профессии/должности, времени входа/выхода и т.п., с соблюдением норм Трудового кодекса РФ и Федерального закона № 152-ФЗ, может помочь работодателю при вынесении дисциплинарных взысканий и иных административных правонарушений.

СКУД – довольно динамично развивающаяся система персональных данных, и крупные

предприятия должны активно её внедрять, чтобы повысить не только уровень исполнительской дисциплины, но и безопасность сотрудников предприятия, которая согласно Пирамиде Маслоу, является вторым уровнем потребностей, после физиологических.

Литература

1. Бадиков А.В., Бондарев П.В. Системы контроля и управления доступом. Лабораторный практикум. М.: НИЯУ МИФИ, 2010. 128 с.
2. Система контроля доступа – Электронная проходная [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://azbsec.ru/articles/kontrol-dostupa/yelektronnaya-prokhodnaya-skud.html>.
3. Раков И. Системы контроля и управления доступом: куда идем? // Алгоритм безопасности. 2011. № 4.
4. Контроль и управление доступом [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://bolid.ru/projects/iso-orion/access-control.html>.
5. Системы контроля и управления доступом [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://mgrss.ru/скуд.html>.
6. Рекомендации Р 78.36.005-99 / НИЦ «Охрана» ГУВО МВД России; сост. Н.Н. Котов, Л.И. Савчук, Е.П. Тюрин, В.Г. Синилов. 1998.
7. Система контроля доступа и учета рабочего времени по бесконтактным картам Time Control Factory Pass Card [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://www.time-control.ru/biometricheksiesistemy/control-dostupa-i-uchet-vremeni/po-cartam.html>.
8. Солодякин С. RS-485 против Ethernet в системах СКУД: попробуем разобраться? // Алгоритм безопасности. 2008. № 4.
9. Крахмалев А. Нормативная база для СКУД // Алгоритм безопасности. 2008. № 4.
10. РД 78.36.003-2002 Инженерно-техническая укрепленность. Технические средства охраны. Требования и нормы проектирования по защите объектов от преступных посягательств / НИЦ «Охрана» ГУВО МВД России; сост. Н.Н. Котов, Л.И. Савчук, Е.П. Тюрин. 2002.
11. Козлов А.Е. Система контроля и управления доступом на предприятии – эффективный путь обеспечения безопасности и сокращения потерь рабочего времени // Комплексные проблемы техносферной безопасности: материалы междунар. науч.-практ. конф. Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2017. 247 с.
12. Автоматизированный учет рабочего времени сотрудников [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL: <https://searchinform.ru/kontrol-sotrudnikov/uchet-rabocheho-vremeni/avtomatizirovannyj-uchet-rabocheho-vremeni-sotrudnikov.html>.
13. Руководство пользователя PerCo-WM01: Система контроля и управления доступом PERCo-Web. Модуль «Учет рабочего времени». 2017. 22 с.

Информация об авторе

Козлов Андрей Евгеньевич – начальник отдела по мотивации персонала и компенсациям, ПАО «Арсеньевская авиационная компания «Прогресс» имени Н.И. Сазыкина» (692345, Россия, Приморский край, г. Арсеньев, пл. Ленина, 5), e-mail: tg1801@mail.ru

CONTROL SYSTEM AND ACCESS CONTROL IN THE ENTERPRISE: CONCEPT, CHARACTERISTICS AND BASIC REQUIREMENTS

A.E. Kozlov

PJSC AAC «Progress», Arseniev, Russia

Abstract: the task of automating access control and management, as well as recording the working time of enterprise personnel, is one of the most pressing issues in the current business environment. In modern times, man has invented gates, barriers, and turnstiles designed to restrict the passage of people and the passage of vehicles. However, the problem of creating an electronic access control system and using it both in small enterprises and large ones engaged in the production and production of high-precision and high-tech products remains relevant. Without proper access and internal control regimes, it is impossible to maintain enterprise security and employees' responsibility for following the rules of internal labor regulations at an appropriate level. The main questions answered in this article are what a modern access control system is, what the requirements for it are, what its purpose for industrial enterprises is and how it is connected with the system of working time and payroll

Key words: employee monitoring, reader, access control, electronic time management, CSAC

References

1. Badikov A.V., Bondarev P.V. "Control systems and access control. Laboratory work" ("Sistemy kontrolya i upravleniya dostupom. Laboratornyi praktikum"), Moscow, NIYaU MIFI, 2010, 128 p.
2. "Access control systems" ("Sistema kontrolya dostupa"), available at: <http://azbsec.ru/articles/kontrol-dostupa/yelektronnaya-prokhodnaya-skud.html>.
3. Rakov I. Access control systems: where are we going?, *Security Algorithms (Algoritm bezopasnosti)*, 2011, no. 4.
4. "Access control and management" ("Kontrol' i upravlenie dostupom"), available at: <http://bolid.ru/projects/iso-orion/access-control.html>.
5. "Control systems and access control" ("Sistema kontrolya i upravleniya dostupom"), available at: <http://mgrss.ru/skud.html>.
6. Kotov N.N., Savchuk L.I., Tyurin E.P., Sinilov V.G. "Recommendations R 78.36.005-99", NITs "Okhrana", MIA of Russia, 1998.
7. "Time control factory pass card" ("Sistema kontrolya dostupa i ucheta rabocheho vremeni po beskontaktnym kartam"), available at: <http://www.time-control.ru/biometricheskie-sistemy/control-dostupa-i-uchet-vremeni-po-cartam.html>.
8. Solodyakin S. "RS-485 versus Ethernet in CSAC: let us try to examine", *Security Algorithms (Algoritm bezopasnosti)*, 2008, no. 4.
9. Krakhmalev A. "CSAC regulatory base", *Security Algorithms (Algoritm bezopasnosti)*, 2008, no. 4.
10. Kotov N.N., Savchuk L.I., Tyurin E.P. "RD 78.36.003-2002 Engineering strength. Technical means of protection. Requirements and design standards for the protection of objects from criminal encroachment" ("RD 78.36.003-2002 Inzhenerno-tehnicheskaya ukreplennost'. Tekhnicheskie sredstva okhrany. Trebovaniya i normy proektirovaniya po zashchite obektov ot prestupnykh posyagatel'stv"), NITs «Okhrana» MIA of Russia, 2002.
11. Kozlov A.E. "Enterprise Access Control and Control System - an effective way to ensure security and reduce lost work time", *Complex problems of technosphere safety: Proc. of the Intern. scientific-practical conf. (Materialy mezhdunarodnoi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Kompleksnyye problemy tekhnosfernoi bezopasnosti»)*, Voronezh, VSTU, 2017, 247 p.
12. "Automated employee time recording" ("Avtomatizirovannyi uchet rabocheho vremeni sotrudnikov"), available at: <https://searchinform.ru/kontrol-sotrudnikov/uchet-rabocheho-vremeni/avtomatizirovannyj-uchet-rabocheho-vremeni-sotrudnikov.html>.
13. "PerCo-WM01 User Manual: PERCo-Web Access Control and Management System. Modul "Accounting of working hours"" (Rukovodstvo pol'zovatelya PerCo-WM01: Sistema kontrolya i upravleniya dostupom PERCo-Web. Modul' «Uchet rabocheho vremeni»), 2017, 22 p.

Submitted 20.08.2018; revised 24.01.2019

Information about the author

Andrey E. Kozlov, personnel motivation and compensations department chief, PJSC AAC «PROGRESS» (5 Lenin Square, Arseniev 692345, Primorskiy Kray, Russia), e-mail: tg1801@mail.ru

ХРАНЕНИЕ ДАННЫХ ПРОЦЕССА В ИНФОРМАЦИОННЫХ СИСТЕМАХ СПЕЦИАЛЬНОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Д.В. Терехов¹, А.Д. Данилов²

¹Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена проблема разработки принципов хранения данных процесса с высоким временным разрешением на протяжении продолжительного периода времени. Данная задача была решена в рамках базового исполняющего информационного комплекса ПОРТАЛ, предназначенного обеспечивать все функции мониторинга процессов функционирования ядерных блоков, в виде системы архивирования HIST. Основным способом архивирования при данном варианте является асинхронное архивирование, позволяющее приложениям-клиентам добавлять информацию о переменной процесса. Предложена структура обработки данных системой архивирования. Показано, что процесс HIST может исполнять функции «единственного сервера» (без учета резервирования). При этом варианте система ответственна за все операции чтения и записи. Также здесь можно запустить два архивных сервера на одном узле ПОРТАЛ. Система архивирования сохраняет всю хронологию данных конфигурации переменных процесса (то есть для каждой переменной процесса может существовать несколько «конфигурационных наборов», отсортированных по их периоду действия). Система обеспечивает два типа запросов к архиву: получение «необработанных данных» и вычисленные накопления, базирующиеся на равноотстоящих временных интервалах. Предлагаемые принципы хранения данных процесса с высоким временным разрешением позволяют уменьшить объем хранимой информации за счет возможностей экстраполяции тенденций изменения переменных; хранить текстовую информацию в фактическом размере, а не максимально допустимой длины; осуществлять динамическую конфигурацию архива, при этом каждый вариант конфигурации можно трактовать как отдельный архив. Система успешно функционирует на Нововоронежской АЭС

Ключевые слова: система архивирования, модель данных, алгоритм сжатия, интерфейс чтения

Введение

В задачах организации информационного обмена в системах управления специального назначения важное место занимает разработка принципов хранения данных процесса с высоким временным разрешением на протяжении продолжительного периода времени, например, нескольких лет. Наибольшая ответственность при разработке таких компонентов для управления потоками данных возникает при создании систем управления потенциально опасными объектами, к которым относятся атомные электростанции.

В данной статье рассмотрены подходы к исполнению процедур хранения данных, введенных на Нововоронежской АЭС-2 в виде системы архивирования HIST, реализованной в базовом исполняющем информационном комплексе ПОРТАЛ, предназначенном обеспечивать все функции мониторинга процессов функционирования ядерных блоков [1].

Система архивирования HIST

В типичных приложениях объем аналоговых данных значительно больше, чем двоичных и/или текстовых данных. Поэтому при сохранении аналоговых данных HIST использует разрешающую способность по времени "всего" 1 миллисекунда (это экономит 13 битов по сравнению с полной временной меткой с разрешением 100 наносекунд). Кроме того, каждую аналоговую переменную процесса можно индивидуально сконфигурировать для сжатия данных согласно алгоритму "зоны нечувствительности", или "вращающейся двери". Цель этих алгоритмов состоит в том, чтобы устранить хранение значений данных, которые "едва отличаются от своего предшественника" или которые "можно предсказать исходя из тенденции изменения переменной процесса".

Независимо от алгоритмов сжатия, дальнейшая оптимизация сохраняет записи аналоговых значений инкрементным способом. Разница значений, состояний переменной процесса или временной метки обычно намного меньше, чем полные значения.

При архивировании двоичных и текстовых данных полная разрешающая способность во

времени составляет 100 наносекунд. В связи с их небольшим объемом (по сравнению с аналоговыми величинами) сжатие не проводится. Все текстовые строки сохраняются в размере их фактической, а не максимально допустимой длины.

Сообщения о нарушении границ аналоговых значений сохраняются в формате, подобном формату записей двоичных значений. Сама аналоговая величина является частью этой записи.

Выделенное для хранения архивных данных пространство диска поделено на ежедневные, недельные и ежемесячные тома. Данные тома можно индивидуально экспортировать в любую среду резервного копирования и импортировать из нее.

Прикладные программы – клиенты системы архивирования, могут получить доступ к архивным данным путем указания имени требуемой переменной процесса и момента времени (или интервала времени). Эти данные представляют собой либо «необработанные значения» (в том виде, как были сохранены в архиве), либо в форме «расчетных накопленных значений» (средняя величина, минимум, максимум, ... за интервал времени) [2].

Поскольку данные конфигурации для переменной процесса могут со временем измениться, HIST сохраняет все эти изменения. В тех случаях, когда осуществляется доступ к переменной процесса, также выдается и/или учитывается конфигурация этой переменной.

Архив оптимизирован для случая эффективной записи данных процесса с возрастающей временной отметкой. Тем не менее, данные могут быть добавлены, обновлены или даже удалены и в более позднее время.

Все данные конфигурации хранятся в общей коллекции (согласно возрастающему времени конфигурации) в центральном файле, тогда как данные процесса могут храниться в нескольких «экземплярах». Каждый «экземпляр» можно трактовать как отдельный архив. Подобная функциональность требуется для реализации тренажерных систем. Она упрощает одновременное хранение данных от нескольких тренажерных сеансов в одном центральном архиве.

Архитектура системы архивирования

Система архивирования (см. рис. 1) пишет данные процесса циклически. Каждую секунду таблицы PLS_ANA_HISTORY (история анало-

говых переменных) и PLS_BIN_HISTORY (история дискретных переменных) базы данных ПОРТАЛ сканируются для поиска новых записей. Это называется асинхронным архивированием.

Все измененные аналоговые данные обрабатываются согласно заданному алгоритму сжатия ("зона нечувствительности" или "вращающаяся дверь"). Слишком малые изменения значения отбрасываются (при условии, что состояние переменной процесса не изменилось). В остальных случаях в файл тома архива записывается новое значение в формате приращения.

Для измененных двоичных и текстовых переменных процесса сжатия не выполняется. Перед записью в архив они сортируются (по меткам времени) в промежуточном буфере (с задержкой на конфигурируемый интервал времени, например 2 секунды). Архивируются только те значения (из буфера), которые "старше 2 секунд" (в данном примере). Функция "старше чем" реализуется путем сравнения метки времени переменной процесса с текущим временем операционной системы. Эта задержка необходима для компенсации неизбежного разброса часов в различных системах ввода-вывода и/или для недетерминированных задержек передачи сигналов.

Двоичные/текстовые архивные файлы содержат последовательности записей в порядке меток времени. Аналоговые архивные файлы накапливаются из блоков истории изменений для одной переменной, внутри блока записи упорядочены в порядке их поступления.

Асинхронное архивирование является основным способом архивирования. Возможно также синхронное архивирование, позволяющее приложениям-клиентам добавлять информацию о переменной процесса (например, когда система ввода-вывода или ее сетевое подключение в нерабочем состоянии, но данные можно сохранить в локальной памяти). Данные вставляются в архив без сортировки (иначе нельзя будет включить более старые - пропущенные - данные). Реализация вставки не столь оптимизирована, как строго сортируемое по времени добавление в конец архива, но это приемлемо, поскольку вставка данных – это исключительный случай.

Что происходит с "несортированными" данными, полученными в процессе асинхронного архивирования? Все "слишком старые" данные переменной процесса пишутся в текстовые файлы с перечисленными через запятую

значениями (CSV). Эти файлы вставляются автоматически (в предварительно сконфигурированном цикле обработки Архиватора).

Данные конфигурации переменной процесса проверяются каждый раз при запуске системы архивирования.

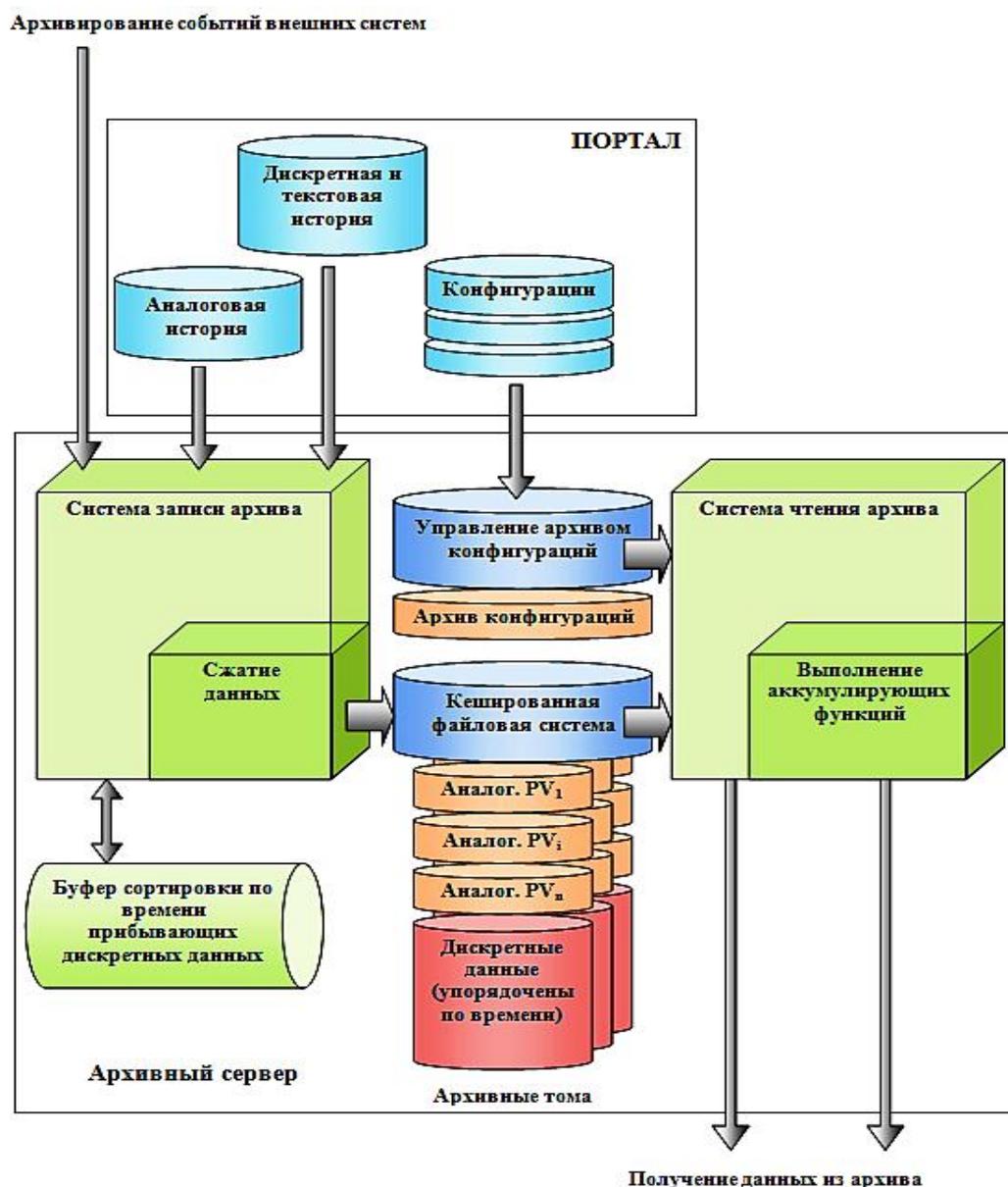


Рис. 1. Структура обработки данных системой архивирования

Они считываются из нескольких таблиц RtdB, обнаруженные изменения ведут к появлению "новых добавленных в конец" записей конфигурации (ничто не будет удалено!). Ясно, что большинство записей конфигурации генерируется при первом запуске системы архивирования. Кроме того, можно сконфигурировать цикл обработки (например, каждые 5 минут) для проверки конфигураций переменных процесса и архивирования изменения.

Приложения-клиенты могут изменять некоторые параметры системы архивирования

(например, глобально включить или отключить фильтрацию по «зоне нечувствительности») или перевести файлы архивных томов в "автономный" режим для резервного копирования.

Интерфейс чтения архива – обычно наиболее используемый интерфейс, доступ к которому имеют клиентские программы. Он обеспечивает выборку необработанных данных и накопленных.

Система архивирования обращается ко всем файлам на диске (за значениями переменных процесса и записями конфигурации) по-

средством очень эффективного механизма кэширования. Это избавляет от большинства медленных операций ввода - вывода файла.

Процесс HIST может исполнять функции «единственного сервера» (без учета резервирования). При этом варианте система ответственна за все операции чтения и записи. Также можно запустить два архивных сервера на одном узле ПОРТАЛ. При таком варианте один процесс отвечает за запись, а другой – за все чтение. Преимущество состоит в том, что чрезмерные запросы на чтение не могут поставить под угрозу операцию записи. В последнем случае вышеупомянутое кэширование будет использовать общедоступную память.

Модель данных системы архивирования

HIST сохраняет конфигурационные данные переменных процесса наряду с динамическими изменениями значения/состояния переменных процесса. Ясно, что последний класс данных является очень динамичным и быстро изменяется, но и конфигурационные данные могут изменяться со временем (но обычно намного реже) [3]. Именно поэтому система архивирования сохраняет всю хронологию данных конфигурации переменных процесса (то есть, для каждой переменной процесса может существовать несколько “конфигурационных наборов”, отсортированных по их периоду действия).

Данные конфигурации аналоговых, двоичных и текстовых переменных процесса вместе с некоторыми управляющими данными (данные начала/останова файла архива, имен пути, информация относительно рабочего экземпляра и т.д.) хранятся в центральном файле конфигурации. В зависимости от типа переменной процесса сохраняются немного отличные записи конфигурации.

Следует учесть, что некоторая конфигурационная информация не архивируется. Вместо этого запоминаются ссылки на текущие таблицы ПОРТАЛ.

Значения аналоговых переменных процесса, с одной стороны, и значения двоичных и текстовых переменных процесса, с другой стороны, записываются в отдельные файлы архивного тома. Все записи пишутся последовательно с возрастанием времени. Архивный том может охватывать один день (начинающийся в 00:00 UTC), одну неделю (начинающуюся в воскресенье 00:00 UTC) или один месяц (начинающийся первого числа месяца в 00:00 UTC).

Все временные метки сохраняются как Win32 FILETIME, UTC (т.е. по Гринвичу), как 64 бита (кроме случаев сжатия).

Аналоговые данные

Последовательность аналоговых значений хранится в отдельных „файловых потоках“ (блоками, совпадающими с непрерывными страницами в файле), индивидуально на каждую переменную процесса. Это учитывает тот факт, что аналоговые значения обычно запрашиваются для конкретной переменной с сортировкой по времени (по возрастанию или убыванию). Выборка данных для такого запроса осуществляется последовательным чтением.

При запросе архивной аналоговой переменной возвращается следующая информация:

- внутренний номер PV (4 байта);
- отметка времени (8 байт, время UTC с разрешением 100 наносекунд);
- значение (8 байт, с двойной плавающей точкой IEEE);
- состояние (8 байтовый необработанный статус ПОРТАЛ);
- номер пользователя PLS (2 байта);
- состояние выборки (НЕ сохраняется, генерируется при запросе):
 - а) необработанное значение;
 - б) интерполированное значение;
 - в) вычисленное значение;
 - г) циклическое (повторяемое) значение;
 - д) отсутствующее значение (нет данных);
 - е) ошибка преобразования.

В файле архивного тома используется другой формат (более компактный, сжатый). Аналоговые значения, метки времени и состояния хранятся в инкрементной форме (обычно разность между 2 смежными значениями довольно мала). Отметки времени усекаются до полных миллисекунд.

Дискретные и текстовые данные

Все дискретные и текстовые значения записываются в файл архивного тома по возрастанию временной метки. Это учитывает тот факт, что дискретные данные обычно запрашиваются за определенный период времени без указания конкретных переменных. Поэтому все дискретные переменные процесса совместно используют один и тот же файловый поток. Кроме того, существуют два отдельных файловых потока для динамических текстов (содер-

жащих значения текстовых переменных процесса и некоторую добавочную информацию для дискретных переменных, например, системные сообщения) и пользовательских текстов (комментарии, включенные в более поздний момент времени). Этот формат позволяет осуществлять эффективный доступ к сортированным по времени спискам сигнализаций и т.д. Следует напомнить, что нарушения границ аналоговых значений записаны в том же формате, что и записи дискретных значений [4].

Запрос архива для некоторого интервала времени означает последовательный доступ к файлам (если при этом не нужно возвращать тексты). Тем не менее, большинство записей значений в двоичном файле архивного тома не будет содержать текстов вообще. Сами тексты также сортируются по времени (в своем потоке).

При запросе дискретного архива возвращается следующая информация:

- внутренний номер PV (4 байта);
- тип PV (ТХТ/BIN/АНА, последний тип для нарушений границ, 1 байт);
- номер изменившегося бита (1 байт);
- номер пользователя PLS (2 байта);
- значение (2 байта);
- состояние выборки (аналогично аналоговой выборке);
- аналоговое значение (8 байт, для нарушения границ или связанного значения);
- отметка времени (8 байт, время UTC с разрешением 100 наносекунд);
- состояние (8 байтов необработанный статус ПОРТАЛ);
- дополнительный текст (максимум 1024 символа);
- текст (комментарии, добавленные позже, максимум 1024 символа);
- предыдущее значение и состояние.

Такая же запись используется при выборке текстовых переменных процесса, где некоторые поля не заполняются (например, значение и номер разряда). Значение переменной процесса хранится в поле «Дополнительный текст».

Алгоритм сжатия для аналоговых значений

Для каждой аналоговой переменной можно задать один из двух алгоритмов сжатия при архивировании. На рис.2 представлено пояснение алгоритма «зоны нечувствительности».

Алгоритм заменяет входное значение полигоном, который остается в диапазоне допуска

значений и имеет минимальное количество точек интерполяции. В архиве сохраняются только эти точки. Интерполяция значений происходит между этими точками в процессе чтения архива.

Пример: переменная содержит входные значения 2.1, 2.4, 1.95, 2.2, 2.8. Использование зоны нечувствительности величиной 0.5 приведет к сохранению только значений 2.1 и 2.8. Чтобы не показывать несуществующий линейный рост от 2.1 до 2.8, значение 2.1 будет добавлено в архив как циклическое значение с фиктивной временной меткой, равной временной метке значения 2.8 минус время цикла сбора данных (конфигурируемый индивидуально для каждой переменной процесса). Добавление циклической записи происходит если:

- разница между реальными записями больше двух циклов сбора данных;
- для переменной не задан параметр конфигурации showStepped («показывать лесенку»).

«Вращающаяся дверь» – более сложный алгоритм сжатия. Проще говоря, значения архивируются только тогда, когда наклон кривой изменения переменной превысит некоторый (конфигурируемый) порог. Использование зоны нечувствительности сокращает последовательность значений V1, V2, V3 просто до V1 (пока все последующие Vi «достаточно близки»), тогда как «вращающаяся дверь» (при благоприятном сценарии) заменяет последнее значение новым. Предположим, последовательность V1, V2, V3 сохраняется как (V1, V3). Если новое значение V4 ложится на вектор изменения, последовательность оптимизируется до (V1, V4) и т.д.

Какой алгоритм следует выбрать? Аналоговые значения, которые изменяются относительно редко (например, полная мощность реактора или значения, рассчитанные в PlsPDM или PlsCalc как «средние значения»), лучше всего обрабатываются с использованием мертвой зоны. Быстро меняющиеся значения (особенно когда они увеличиваются относительно линейно на протяжении времени, например, интегральные значения из PlsPDM) показывают лучшее сжатие при помощи «вращающейся двери».

Резервирование и сохранение архивов

Система HIST может восстанавливать пропуск в архивировании, вызванный отказом

одного сервера и последующим переключением на резервные мощности. При запуске ПОРТАЛ на резервном узле система архивирования будет считывать все «недостающие данные» из архива другого узла перед входом в режим нормального функционирования (то есть, обработкой краткосрочной истории).

Пропуск, вызванный полным отказом архивирующих узлов ПОРТАЛ или сбоями системы ввода-вывода, может быть закрыт вставкой недостающих данных из файлов CSV (в соответствующем формате). Восстановление из файлов делается автоматически (файлы располагаются в predetermined каталоге, который регулярно сканируется на обновления).

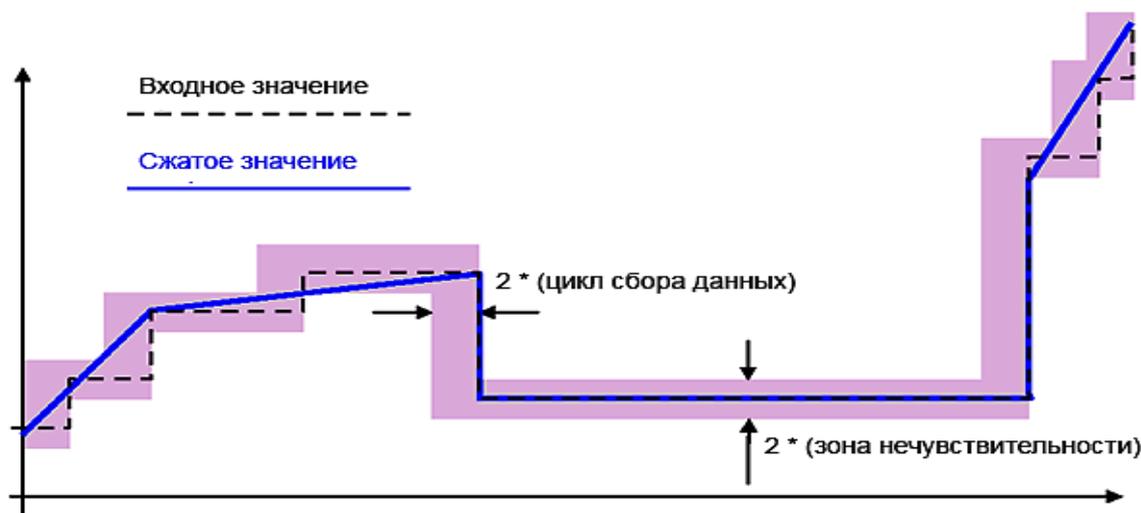


Рис. 2. Графическое представление «алгоритма зоны нечувствительности»

Функции резервирования не зависят от используемой конфигурации: общий архивный сервер для чтения и записи или отдельные серверы (один считывает, другой записывает). В последнем случае на резервированной паре узлов ПОРТАЛ запускаются 4 рабочих копии сервера архивирования (2 для чтения, 2 для записи).

Интерфейс чтения архива

Система обеспечивает два типа запросов к архиву:

1) получение «необработанных данных»:

- значения в заданной точке времени (по желанию интерполированные);
- все значения в заданном временном интервале. По отношению ко времени эти точки данных процесса не являются равноотстоящими.

2) вычисленные накопления, базирующиеся на равноотстоящих временных интервалах. Например, дневное среднее арифметическое значение, минимальное в час, ...

Двоичные и текстовые переменные

процесса могут читаться в виде необработанных данных.

Запрос необработанных данных

Если не задано иначе, для аналоговых, двоичных и текстовых переменных процесса допустимы все методы доступа, представленные в данном разделе.

Значение в момент времени

Этот метод позволяет читать переменную процесса в требуемый момент времени. Вследствие того, что (с очень высокой вероятностью) в запрошенное время не будет присутствовать никакой архивной записи, выдается более ранняя запись.

Аналоговые значения могут произвольно (и в зависимости от установки параметра конфигурации «ступенчатое отображение») интерполироваться. Для двоичных и текстовых переменных процесса можно потребовать (по желанию) выбрать ту запись, где значение (или значение ИЛИ состояние) действительно изменялось, подавляя возврат циклически

повторяемых записей. Причина: в некоторых случаях может оказаться необходимым знать, КОГДА некоторая двоичная переменная процесса изменилась из 0 в 1, а не только факт, ЧТО значение равно 1.

Поиск в архивных файлах выполняется посредством "двоичного поиска". Для аналоговых переменных процесса просматривается только поток для конкретной переменной. Для дискретных/текстовых переменных процесса (и сигнализаций) ВСЕ переменные процесса хранятся в одном сортированном потоке. Чтобы сократить времена поиска (некоторые дискретные переменные процесса могут меняться очень редко), каждая дискретная/текстовая запись циклически повторяется (параметр "минимальный интервал архивирования" в конфигурации), когда НЕТ изменений за этот интервал времени. Кроме того, в самом начале каждого (аналогового и дискретного/текстового) архивного файла заносятся значения в формате циклической записи.

Значение к моменту времени

Эти функции требуют задания интервала времени (одна граница может быть открыта), а также «направления поиска» - по возрастанию или убыванию времени. Кроме того, вы можете указать необходимость доставки циклических значений или включения предшествующего (или последующего – в случае убывания) значения на границе интервала.

Количество возвращаемых записей неизвестно, поэтому функции этого типа возвращают объект-итератор. Это позволяет приложениям-клиентам читать столько записей (за каждую итерацию), сколько они могут обработать.

Считывание нескольких переменных процесса

На графиках технологического процесса обычно изображают изменение значения нескольких (обычно не более 10-20) переменных. Они связаны либо "логически" (например, все значения числа оборотов турбины в минуту), либо "физически/топологически" (все температуры в системных блоках компьютеров в помещении JW12).

Поэтому система архивирования предлагает функции для запроса (как „в момент

времени“, так и „к моменту времени“), позволяющие задать набор требуемых переменных процесса (либо аналоговых переменных процесса, либо любой комбинации двоичных, текстовых и сигнализаций). Задание переменных может осуществляться по именам переменных, их номерам, по номеру станции, по шаблону с символами подстановки или просто “все (своего вида)”.

Функция чтения данных из двоичного раздела архива возвращает значения, которые автоматически упорядочены по времени. Функция чтения нескольких аналоговых переменных процесса “к моменту времени” позволяет пользователю задать сортировку «по времени» или сортировку «по переменным» (значения для каждой переменной сортированы по времени). Последний вид более эффективен, поскольку можно избежать глобальной сортировки.

Дополнительно к чтению значений переменной процесса (включая состояние и метку времени), можно также читать данные конфигурации переменной процесса. В частности, при доступе к записи “текущей допустимой” конфигурации может быть возвращена допустимая запись в данной точке времени, или все доступные записи конфигурации (сортированные по времени).

Существуют несколько других функций чтения, которые поддерживают доступ к данным архивного тома или активной копии, а также статистике.

Клиентская библиотека

Клиентская библиотека системы архивирования позволяет эффективное программирование распределенных приложений-клиентов. Основные функции – это локальное кэширование данных конфигурации переменной процесса (которые изменяются довольно редко) и записей для итераторов переменной процесса в конфигурируемых блоках (обычно 400-2000). Последний буфер минимизирует количество запросов на чтение к архивному серверу и таким образом снижает сетевую загрузку.

Кроме того, клиентская библиотека обеспечивает прозрачный доступ к резервированным серверам. Она автоматически осуществляет доступ к работающему серверу. Когда в рабочем режиме находятся и главный, и резервный архивный сервер, то выполняется

также балансировка нагрузки. Это позволяет (при правильном программировании) приложениям-клиентам просто продолжать работать даже в таких случаях, где произошел переход на резервные мощности.

Заключение

В качестве подведения итогов можно отметить, что разработанные принципы хранения данных процесса с высоким временным разрешением на протяжении продолжительного периода времени позволили:

- сократить объем требуемой памяти для хранения данных процесса до 5%;
- уменьшить объем хранимой информации за счет возможностей экстраполяции тенденций изменения переменных;
- хранить текстовую информацию в фактическом размере, а не максимально допустимой длины;

- осуществлять динамическую конфигурацию архива, при этом каждый вариант конфигурации можно трактовать как отдельный архив.

Литература

1. Чашин Ю.Г., Чернявских Е.С. Управление потоками данных в программно-конфигурируемых компьютерных сетях // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Экономика. Информатика. 2012. № 13 (132). С. 166-168.
2. Терехов Д.В., Сидоренко Е.В., Данилов А.Д. Тенденции развития АСУ ТП на Нововоронежской АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 66-76.
3. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterruptible condition monitoring / V. Povarov, A. Danilov, V. Burkovsky, K. Gusev // MATEC Web of Conferences 13. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018". 2018. № 2012.
4. Данилов А.Д., Пилеич А.В. Математическое обеспечение распределенных вычислений гетерогенных динамических параметров систем в режиме реального времени. Воронеж: ВГТУ, 2015. 160 с.

Поступила 24.12.2018; принята к публикации 25.01.2019

Информация об авторах

Терехов Дмитрий Владимирович – начальник ЦТАИ, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская АЭС» (396072, Россия, г. Нововоронеж, Южная пром. зона, 1), тел.+7 (920) 227-45-44, e-mail: terehovdv@nvnpp1.rosenergoatom.ru
Данилов Александр Дмитриевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел.+7 (920)-430-74-54, e-mail: danilov-ad@yandex.ru

STORAGE OF PROCESS DATA IN INFORMATION SYSTEMS OF SPECIAL PURPOSE

D.V. Terekhov¹, A.D. Danilov²

¹JSC «Concern Rosenergoatom» «Novovoronezh nuclear power plant» branch,
Novovoronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers the problem of the development of the principles of storage of process data with high temporal resolution over an extended period of time. This task was solved within the framework of the basic executing information complex PORTAL, designed to provide all the functions of monitoring the processes of operation of nuclear units, in the form of a system of archiving HIST. The primary method of archiving with this option is asynchronous archiving, which allows client applications to add information about a process variable. The structure of data processing by the archiving system is proposed. It is shown that the HIST process can perform the functions of a "single server" (excluding redundancy). In this case, the system is responsible for all read and write operations. You can also run two archive servers on the same PORTAL node. The archiving system stores the entire history of the configuration data of the process variables (that is, for each process variable there can be several "configuration sets" sorted by their period of validity). The system provides two types of requests to the archive: receiving "raw data" and calculated accumulations based on equidistant time intervals. The proposed principles of storing process data with high time resolution allow one to reduce the amount of stored information due to the possibility of extrapolation of variable trends, to store text information in the actual size, but not the maximum allowable length; perform dynamic configuration of the archive, with each configuration option can be interpreted as a separate archive. The system operates successfully at the Novovoronezh NPP

Key words: archiving system, data model, compression algorithm, reading interface

References

1. Chashin Yu.G., Chernyavskaya E.S. "Data streams in software-defined computer networks", *Bulletin of Belgorod State University. Series: Economy. Informatics (Vestnik belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Ekonomika. Informatika)*, 2012, no. 13 (132), pp. 166-168.
2. Terekhov D.V., Sidorenko E.V., Danilov A.D. "Tendencies of development of ACS TP at the Novovoronezh nuclear power plant", *News of higher educational institutions. Nuclear power (izvestiya vysshykh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika)*, 2017, no. 3, pp. 66-76.
3. Povarov V., Danilov A., Burkovsky V., Gusev K. "Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterruptible condition monitoring", *In the collection: MATEC Web of Conferences 13. Ser. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018"*, 2018, no. 2012.
4. Danilov A. D., Pileich A.V. "Software for distributed computing of heterogeneous dynamic parameters of the system in real time" ("Matematicheskoe obespechenie raspredelennykh vychisleniy geterogennykh dinamicheskikh parametrov sistem v rezhime real'nogo vremeni"), Voronezh, VSTU, 2015, 160 p.

Submitted 24.12.2019; revised 25.01.2019

Information about the authors

Dmitry V. Terekhov, Head of the Department of thermal automation and measurement, branch of JSC "Concern Rosenergoatom" "Novovoronezh nuclear power plant" (1 South prom. Zone, Novovoronezh 396072, Russia), tel. +7(920) 227-45-44, e-mail: terekhovdv@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Aleksandr D. Danilov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. +7(920)-430-74-54, e-mail: danilov-ad@yandex.ru

Радиотехника и связь

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.1.008
УДК 681.3

ПРИМЕНЕНИЕ ПРОГРАММНО-АППАРАТНЫХ СРЕДСТВ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ЦИФРОВЫХ ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ ПРИБОРОВ

Н.Н. Цыбов

Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры
им. Н. Исанова, г. Бишкек, Кыргызская республика

Аннотация: рассмотрены схемотехнические решения проектирования портативных многофункциональных высокоточных средств электроизмерений с использованием цифровых компонентов аналитической вычислительной техники, программно-аппаратные узлы которой позволяют производить математическую обработку и хранение информации. При проектировании портативных многофункциональных средств электроизмерений применение много-разрядных аналого-цифровых преобразователей (АЦП) многократного интегрирования и дорогостоящих АЦП с уравновешиванием или балансом зарядов (новое наименование АЦП сигма-дельта преобразования) нецелесообразно ввиду наличия интегральной нелинейности переходной характеристики операционного усилителя и интегратора, а также ввиду малого их быстродействия. Предлагаются схемотехнические решения, направленные на достижение точностных параметров на примерах проектирования электроизмерительных приборов, разработанных на базе вычислительных модулей без использования дорогостоящих высокоточных АЦП. Для этой цели применены следующие схемотехнические решения: использование нормирующих масштабирующих усилителей сигналов на входах АЦП; введение в устройство прецизионного интегратора с входящим в его состав аналого-цифровым преобразователем; включение входного АЦП в состав входного анализатора, а также АЦП положительной полуволны и АЦП отрицательной полуволны в состав блока анализа полувольт; организация параллельной работы трех АЦП и двух контроллеров амплитуды и длительности полувольт; введение в устройства декадных усилителей

Ключевые слова: многофункциональный, прецизионный, АЦП, интегратор, контроллер амплитуды и длительности полувольт, декадный усилитель, масштабирующий усилитель

Введение

Экспериментальные и исследовательские задачи являются неотъемлемым этапом при разработке любых электронных устройств, при создании, испытаниях и промышленном выпуске которых измерения являются неотъемлемой частью. Поэтому проектирование средств измерений, ориентированных на выполнение этих задач является весьма актуальным. Как правило, для выполнения экспериментальных и исследовательских работ необходимы средства измерений более высокого класса точности, чем для контроля производственного цикла выпускаемых изделий.

Средства измерений электрических цепей

Электроизмерения по своей сути представляют собой совокупность процессов, ориентированных на проверку соответствия заданным характеристикам всех составляющих электро-системы. Измерительные приборы представля-

ют собой технические устройства контроля характеристик исследуемой физической величины, а также формирования доступных для оператора информационных сигналов [1, 2].

Увеличение функциональности выпускаемой промышленной продукции предъявляет повышенные требования к повышению класса точности приборов и повышению их быстродействия. Одним из методов выполнения этих требований является проектирование измерительных приборов с использованием цифровых компонентов аналитической вычислительной техники, программно-аппаратные узлы которой позволяют производить математическую обработку и хранение информации. Проектирование средств измерений на базе вычислительных модулей в основном ведется с применением промышленно выпускаемых специализированных микросхем. Наибольший интерес представляет для разработчиков серия однокристалльных микросхем японской фирмы «New Japan Radio Co.Ltd.» (JRC) – микросхемы NJU9207, NJU9208, NJU 9207B. Эти микросхемы содержат все основные узлы для организации основных видов электроизмерений: анало-

го-цифровой преобразователь (АЦП); источник опорного напряжения; контроллер; генератор; детектор состояния батареи питания; драйвер LCD.

Измерительные приборы, выполненные на базе вычислительной техники, представляют собой устройства, в состав которых входят узел преобразования реального аналогового сигнала в цифровой код (аналого-цифровой преобразователь АЦП), узел обработки цифрового сигнала и реализации алгоритма измерений и узел индикации, формирующий выходные данные в удобной для контроля форме. Для любого средства измерений основополагающими параметрами являются его точность и быстродействие. Для основной массы измерительных модулей и систем метрологическая точность измерительного узла определяется точностью преобразования аналого-цифрового преобразователя.

На настоящий момент промышленность предоставила разработчикам средств измерений широкий спектр выбора АЦП различного принципа преобразования – одноктактные, многотактные, интегрирующие, конвейерные, сигма-дельта преобразование. При количестве разрядов АЦП до 14 устройства относят к среднему классу точности, а при разрядности более 14 к высокоточным. По быстродействию АЦП классифицируют как АЦП «среднего быстродействия» при скорости преобразования 5 кГц, при скорости преобразования 0.005-200 МГц – как «скоростные», и при скорости преобразования свыше 200 МГц – «сверхскоростные».

Одним из наиболее доступных методов увеличения точности преобразования является создание многоразрядного АЦП многократного интегрирования. АЦП, построенные по этому принципу, ввиду наличия интегральной нелинейности переходной характеристики операционного усилителя и интегратора, имеют существенные недостатки, для устранения которых требуется много тактов преобразования. Такого рода недостатки устранены в АЦП с уравниванием или балансом зарядов (новое наименование АЦП сигма-дельта преобразования) [3-5]. Одной из лучших промышленных моделей сигма-дельта преобразователей является 24-х разрядный АЦП AD7190 фирмы Analog Devices, имеющий среднеквадратичное значение шума 7 нВ при скорости данных от 4,7 Гц до 4,8 кГц. Но применение высокоточных АЦП осложняет их высокая стоимость и большое время преобразования (для 24-х разрядный АЦП AD7190 скорость данных 4,7 Гц...4,8 кГц). Поэтому применение высокоточных АЦП

в портативных приборах не рентабельно. Поэтому одним из способов решения этой проблемы является применение схмотехнических решений, направленных на увеличение быстродействия и точности преобразования. Приборы, выполненные на базе вышеописанных микросхем, вполне пригодны для выполнения стандартных измерений. Но для научно-исследовательской работы и экспериментальной отработки режимов работы проектируемых изделий необходимы вычислительные модули намного большей функциональности, быстродействия и точности измерений. Для этих целей, как правило, используют стационарные прецизионные измерительные средства. Прецизионные измерители в основном не многофункциональны, имеют сравнительно большие габариты и высокую цену. Большой интерес разработчиков электронных приборов привлекают цифровые мультиметры повышенной точности и функциональности нового поколения. Многофункциональность измерительных приборов наиболее актуальна при исследовательских и конструкторских работах. При разработке и экспериментальных исследованиях электронных устройств на рабочем месте инженера может понадобиться от 10 до 20 единиц контрольно-измерительной техники. При этом размеры рабочего места проектировщика ограничены возможностями инженера иметь удобный доступ к органам управления каждого применяемого прибора. В этой ситуации дальнейшее увеличение количества контрольно-измерительной техники на рабочем месте проектировщика не имеет смысла. Эта проблема легко решается при применении многофункциональных средств измерения. При использовании цифровых программных компонентов увеличение функциональности измерительной техники не является сложной задачей. Для создания новых функций, в большинстве случаев, нет необходимости создавать принципиально новые аппаратные средства. Поставленная задача решается разработкой обновленного программного пакета для той же аппаратной части.

Прокомментируем ряд схмотехнических решений, направленных на достижение точностных параметров на примерах проектирования электроизмерительных приборов, разработанных в университете строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова (КГУСТА) на базе вычислительных модулей без использования дорогостоящих высокоточных АЦП.

Мультиметр-характериограф

Мультиметр-характериограф относится к контрольно-измерительной технике и может быть использован для мониторинга и исследования временных и частотных характеристик электрических сигналов [6].

Структурная функциональная схема мультиметра-характериографа приведена на рис. 1.

Целью проектирования прибора является создание многофункционального широкополосного устройства, содержащего функции графического отображения амплитудных и временных характеристик с архивированием статистических отчетов отклонений измеряемой величины.

Мультиметр-характериограф (см. рис.1) функционирует следующим образом.

С панели управления 13 задаются пределы временных периодов (от одной секунды до недели), в которых необходимо проанализировать и сформировать статистику. В этом случае, если время подключения прибора к измеряемой

цепи превышает установленные временные пределы, то прибор в течение всего времени подключения будет заново регистрировать исследованные параметры кратно установленному временному пределу. В режиме измерений мультиметр с момента включения определяет диапазон измерений, подключая необходимый делитель напряжения или тока, тем самым предотвращая перегрузку АЦП 8. С помощью анализатора сигналов 14 определяется вид измеряемого сигнала и род измеряемого тока. Измеряемый сигнал с входного делителя 6 масштабируется с помощью узла масштабирующих усилителей 7 и подается на входы АЦП 8 и АЦП 9, предназначенных для обработки информации положительной и отрицательной полуволны. Оцифрованный сигнал с АЦП поступает в анализатор пиков тока и напряжения 10 и далее для окончательной обработки поступает в микропроцессор 11. Измеренная информация хранится в запоминающем устройстве 16 и отображается на мониторе 12.

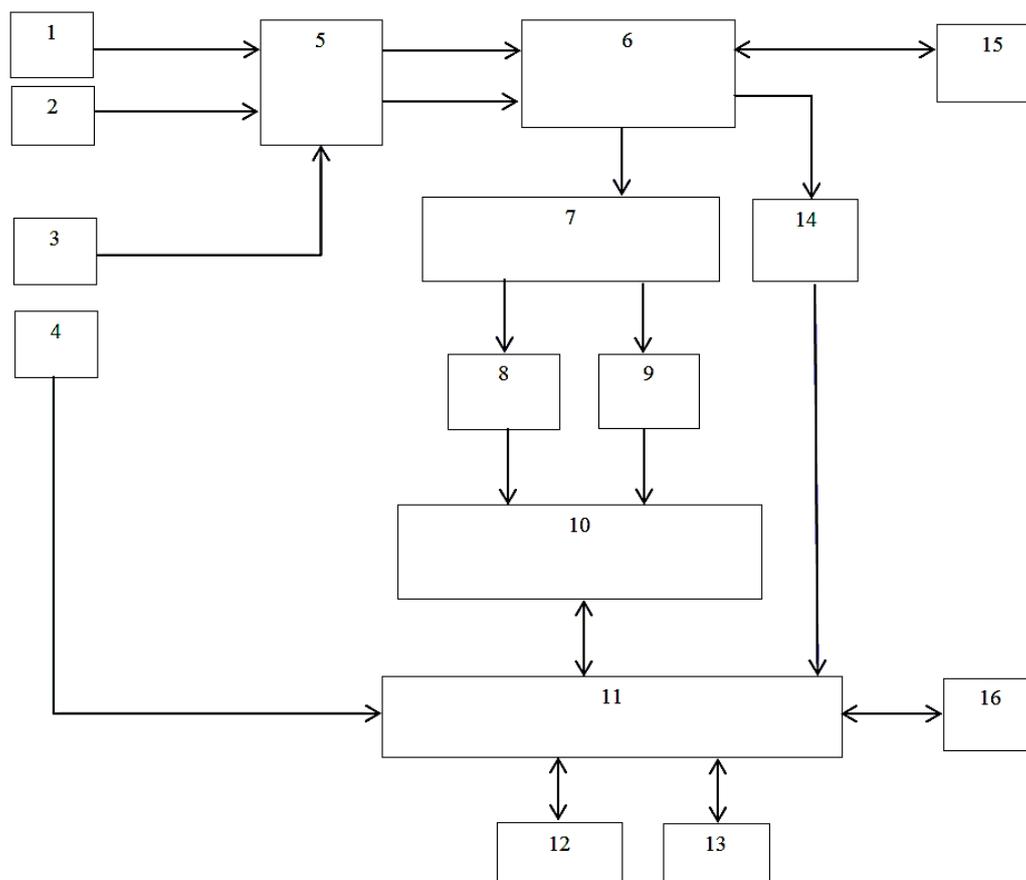


Рис. 1. Структурная функциональная схема мультиметра-характериографа: 1-4 – входные клеммы; 5– узел шунтов; 6 –узел делителей напряжения; 7– узел масштабирующих усилителей напряжения и тока; 8 – АЦП положительной полуволны; 9 – АЦП отрицательной полуволны; 10 – анализатор пиков напряжения и тока; 11 –микропроцессор; 12 – монитор; 13 – панель управления; 14 – анализатором сигналов; 15 – АЦП; 16 –запоминающее устройство

Значительное увеличение точности в разработанном приборе, в особенности при измерении малых входных величин сигналов, достигнуто за счет нормирования масштабирующими усилителями сигналов на входах АЦП.

Расширение частотного диапазона измеряемых сигналов достигнуто за счет применения трех параллельно работающих АЦП.

Реализация функции графического отображения амплитудных и временных характеристик с архивированием статистических отчетов отклонений измеряемой величины достигнута

за счет введения анализаторов пиков и запоминающего устройства.

Многофункциональный цифровой осциллограф

Многофункциональный цифровой осциллограф относится к контрольно-измерительной технике и может быть использован для контроля периодических и аperiodических сигналов различной формы [7]. Структурная функциональная схема многофункционального цифрового осциллографа приведена на рис. 2.

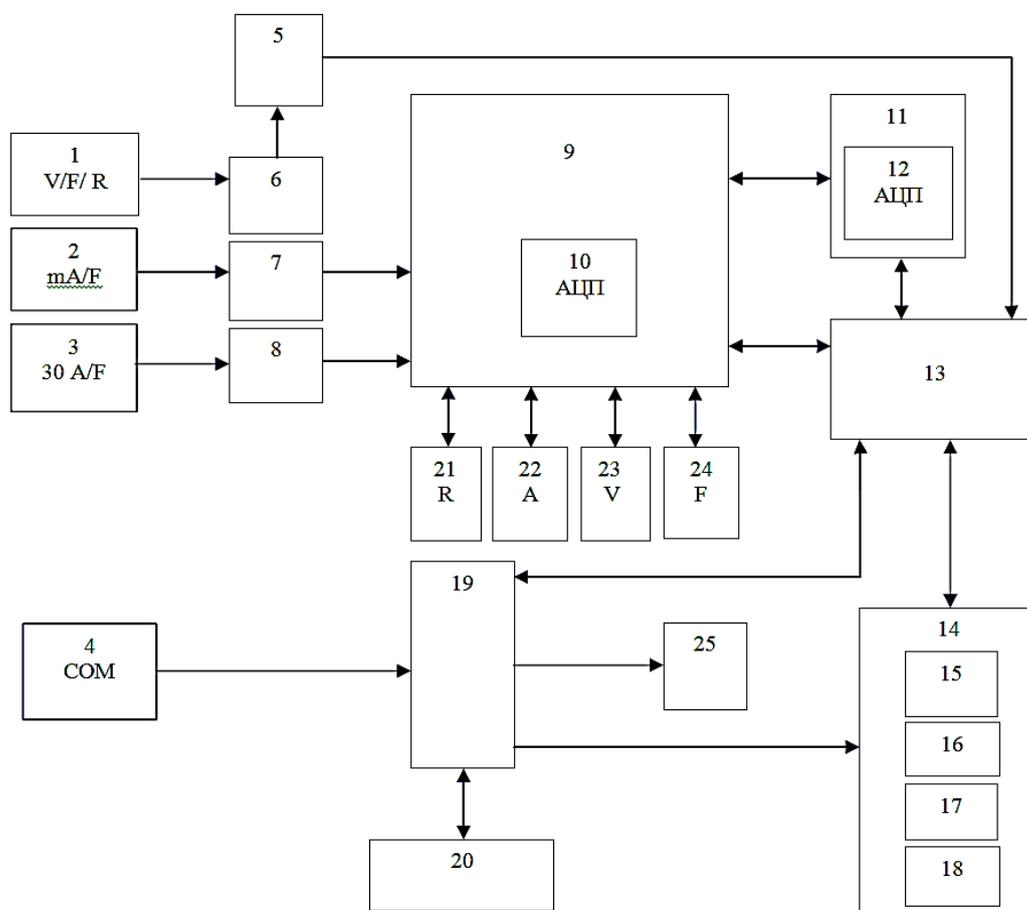


Рис. 2. Структурная функциональная схема многофункционального цифрового осциллографа: 1, 2, 3 и 4 – входные клеммы измерений; 5 – блок коммутации пределов измерений; 6 – блок делителей напряжения и калибровки; 7 и 8 – токовые шунты; 9 – входной анализатор полярности; 10 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП) входного анализатора полярности; 11 – прецизионный интегратор; 12 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП) прецизионного интегратора; 13 – микроконтроллер мультиметра; 14 – микроконтроллер осциллографа; 15 – блок масштабирования, 16 – блок запоминания и отображения, 17 – блок синхронизации и развертки, 18 – блок синхронизации аperiodических и одиночных сигналов; 19 – центральный процессор; 20 – монитор; 21, 22, 23, 24 – кнопки ручного управления для измерения сопротивления (R), тока (A), напряжения (V) и частоты (F), для включения автоматического режима измерения предусмотрена кнопка 25

Целью проектирования предлагаемого устройства является увеличение точности, расширение диапазона измерений с расширением функциональных возможностей устройства.

Многофункциональный цифровой осциллограф функционирует следующим образом.

При включении многофункционального цифрового осциллографа в целях предотвращения перегрузки по входу блок 5 коммутации

пределов измерения соединен с нижним плечом блока 6 делителей напряжения и калибровки, соответствующим максимально допустимому входному напряжению 1000 V.

Автоматический режим измерения.

В случае, если на входных клеммах 1-4 отсутствуют токи и напряжения, то входной анализатор полярности 9 включает режим измерения сопротивлений. В этом режиме в соответствии с величиной измеряемого сопротивления входной анализатор полярности 9 посредством блока 5 коммутации пределов измерения подключается к соответствующему плечу блока 6 делителей напряжения и калибровки. Полученная информация преобразуется в цифровой сигнал АЦП 10 и передается в микроконтроллер 13 мультиметра для последующей обработки. Полученная информация от микроконтроллера 13 мультиметра проходит окончательную обработку в центральном процессоре 10 и выдается на монитор 20.

В случае, если на входных клеммах 1-4 присутствует только напряжение, то входной анализатор полярности 9 включает режим измерения напряжения и определяет род измеряемого напряжения (постоянный/переменный). В случае обнаружения постоянного напряжения входной анализатор полярности 9 определяет полярность. При этом в соответствии с величиной измеряемого напряжения входной анализатор полярности 9 посредством блока 5 коммутации пределов измерения подключается к соответствующему плечу блока 6 делителей напряжения и калибровки. Полученная информация об измерении постоянного напряжения преобразуется в цифровой сигнал АЦП 10 и передается в микроконтроллер 13 мультиметра для последующей обработки. Полученная информация от микроконтроллера 13 мультиметра проходит окончательную обработку в центральном процессоре 19 и выдается на монитор 20.

В случае обнаружения переменного напряжения в соответствии с величиной измеряемого напряжения входной анализатор полярности 9 посредством блока 5 коммутации пределов измерения подключается к соответствующему плечу блока 6 делителей напряжения и калибровки. Полученная информация об измерении переменного напряжения обрабатывается прецизионным интегратором 11 и преобразуется в цифровой сигнал АЦП 12, после чего передается в микроконтроллер 13 мультиметра для последующей обработки. Полученная информация от микроконтроллера 13 мультиметра

поступает в микроконтроллер 14 осциллографа, где посредством блока 15 масштабирования, блока 16 запоминания и отображения, блока 17 синхронизации и развертки (в случае периодического сигнала) и блока 18 синхронизации аperiodических сигналов и одиночных сигналов (в случае аperiodического сигнала и сигналов с большой скважностью), проходит обработку и через центральный процессор 19 выдается на монитор 20 в виде визуальной осциллограммы измеряемого напряжения, с текстовым отображением в нижней части монитора его частоты, периода, амплитудного и действующего значения.

В случае, если на входных клеммах 1-4 присутствует только ток, то входной анализатор полярности 9 включает режим измерения тока и определяет род измеряемого тока (постоянный/переменный). Процесс обработки сигналов при измерении тока аналогичен процессу измерения напряжения за исключением того, что входной сигнал поступает на входной анализатор полярности 9 через входные клеммы 2-3 и шунты 7-8.

В случае, если на входных клеммах 1-4 присутствуют одновременно напряжение и ток, то входной анализатор полярности 9 включает одновременно режимы измерения тока и напряжения, при этом определяет род измеряемого тока (постоянный/переменный). Процесс обработки сигналов при измерении напряжения и тока аналогичен процессам отдельного измерения напряжения и тока за исключением того, что центральный процессор 19 выводит на экран монитора 20 осциллограммы тока и напряжения с учетом фазы отставания или опережения, с текстовым отображением в нижней части монитора 20 частоты, периода, амплитудного и действующего значений параметров тока и напряжения.

Ручной режим измерения.

Ручное управление режимами измерения осуществляется с помощью кнопок 21-24, при этом многофункциональный осциллограф производит измерение выбранных параметров в соответствии с выбранной кнопкой.

Разработанное устройство (см. рис. 2) содержит функции осциллографа, мультиметра, частотомера и измерителя сопротивлений. Выбор диапазона и функции измерения в устройстве происходит в ручном и автоматическом режимах. В приборе предусмотрена возможность одновременного измерения напряжения и тока исследуемого сигнала. Данный осцилло-

Z-анализатор

граф позволяет исследовать сигналы величиной от 1 микровольта до 1000 вольт. В приборе предусмотрена функция измерений параметров сигналов с большой скажностью, а также аperiodических сигналов. Повышение точности измерений в приборе достигнуто за счет введения в устройство прецизионного интегратора с входящим в его состав аналого-цифровым преобразователем. Увеличение надежности прибора достигнуто за счет снижения потребляемой мощности разработанного устройства и уменьшения числа компонентов в схеме.

Z-анализатор относится к технике электроизмерений и может быть использован для измерений частотных характеристик реактивных и активных сопротивлений многополюсников с сосредоточенными и распределенными параметрами [8].

Структурная функциональная схема Z-анализатора приведена на рис. 3.

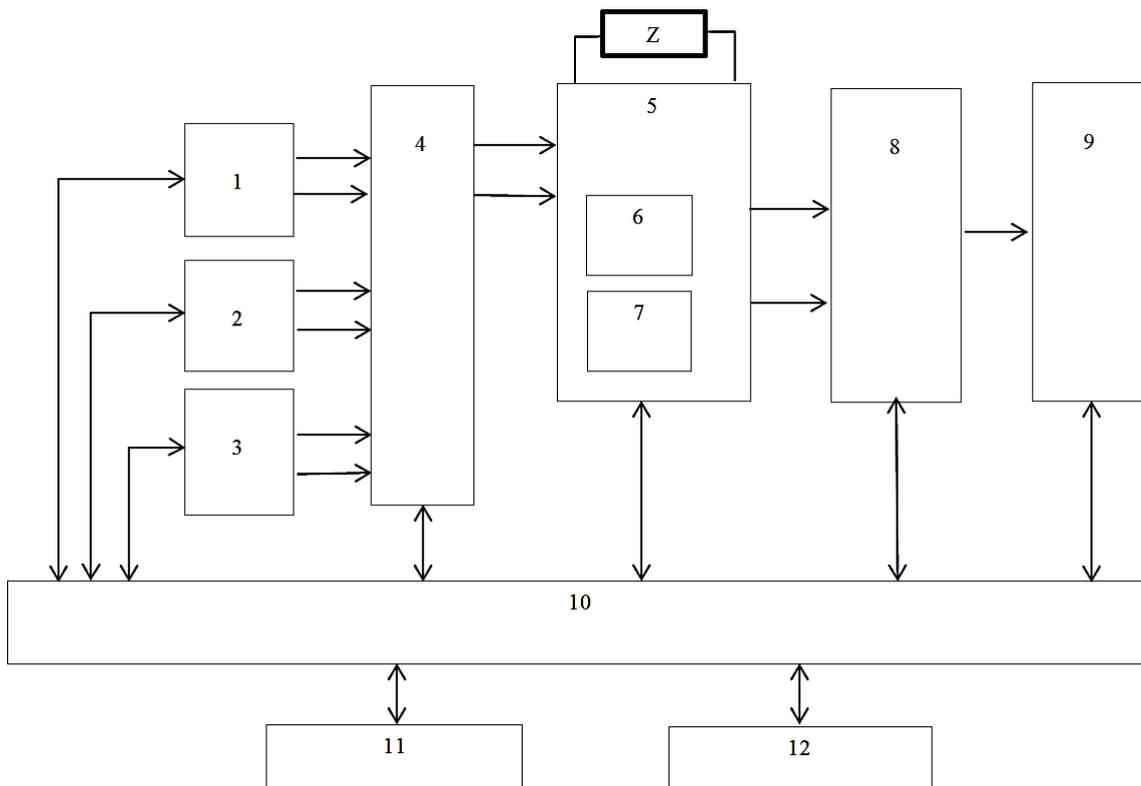


Рис. 3. Структурная функциональная схема Z-анализатора: 1 – генератор низких частот (НЧ); 2 – генератор высоких частот (ВЧ); 3 – генератор сверхвысоких частот (СВЧ); 4 – коммутатор генераторов; 5 – входной измерительный узел; 6 – масштабирующий усилитель тока; 7 – масштабирующий усилитель напряжения; 8 – коммутатор сигналов тока и напряжения; 9 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 10 – микроконтроллер; 11 – панель управления; 12 – монитор, Z – измеряемый объект

Целью проектирования Z-анализатора является создание устройства исследования частотных характеристик активных и реактивных составляющих комплексного сопротивления исследуемой цепи.

Z-анализатор составляющих комплексного сопротивления функционирует следующим образом.

С панели управления 11 задается необходимый диапазон измерения (НЧ, ВЧ, СВЧ или диапазон от НЧ до СВЧ).

В режиме измерения всего диапазона от НЧ до СВЧ по сигналу микроконтроллера 10 с

генератора НЧ 1 через коммутатор 4 подаются напряжения рабочих частот на вход входного измерительного узла 5, к которому подключен измеряемый объект Z. При этом величина рабочей частоты в соответствии с дискретностью опроса генератора НЧ 1 меняется от минимального до максимального своего значения. Генератор НЧ 1 генерирует синхронно два напряжения. С первого выхода генератора НЧ 1 поступает синусоидальное напряжение, а со второго выхода поступает прямоугольное напряжение. При этом фронт прямоугольного напряжения совпадает с моментом перехода

синусоидального напряжения через ноль. Сигналы с генератора НЧ 1 через коммутатор 4 поступают на вход измерительного узла 5. Сигнал, прошедший через измеряемый объект, преобразовывается входным измерительным узлом 5 в сигнал, пропорциональный току, протекающему через измерительный объект, и в сигнал, пропорциональный напряжению на нем. Сигналы, пропорциональные току и напряжению, через коммутатор сигналов тока и напряжения 8 преобразуются в цифровые сигналы с помощью АЦП 9 и подаются для окончательной обработки на микроконтроллер 10. По завершению обработки сигналов рабочих частот диапазона генератора НЧ 1 по команде с микроконтроллера 10 аналогичным образом происходит обработка сигналов рабочих частот генератора ВЧ 2 и генератора СВЧ 3.

Полученные результаты обработки сигналов от генераторов НЧ 1, ВЧ 2 и СВЧ 3 проходят окончательную обработку в микроконтроллере 10 и отображаются на мониторе 12. При этом Z-анализатор составляющих комплексного сопротивления отображает кривые активного, реактивного и полного комплексного сопротивления измеряемого объекта. С панели управления можно выделить любую часть из-

меренного диапазона составляющих комплексного сопротивления.

Имеющиеся в этой области промышленно выпускаемые измерители, как правило, функционируют в узком диапазоне частот или на конкретных для каждого прибора частотах. Возможность функционирования в широком диапазоне частот в данном приборе достигнута благодаря функционированию трех программно-управляемых генераторов: низкочастотного, высокочастотного и сверхвысокочастотного.

Значительное увеличение точности измерений в устройстве достигнуто благодаря функционированию совместно с АЦП масштабирующих усилителя напряжения и тока.

Многофункциональный мультиметр

Многофункциональный мультиметр (см. рис. 4) относится к контрольно-измерительной технике и может быть использован для контроля периодических и аperiodических сигналов различной формы (патент КР №213).

Структурная функциональная схема многофункционального мультиметра приведена на рис. 4.

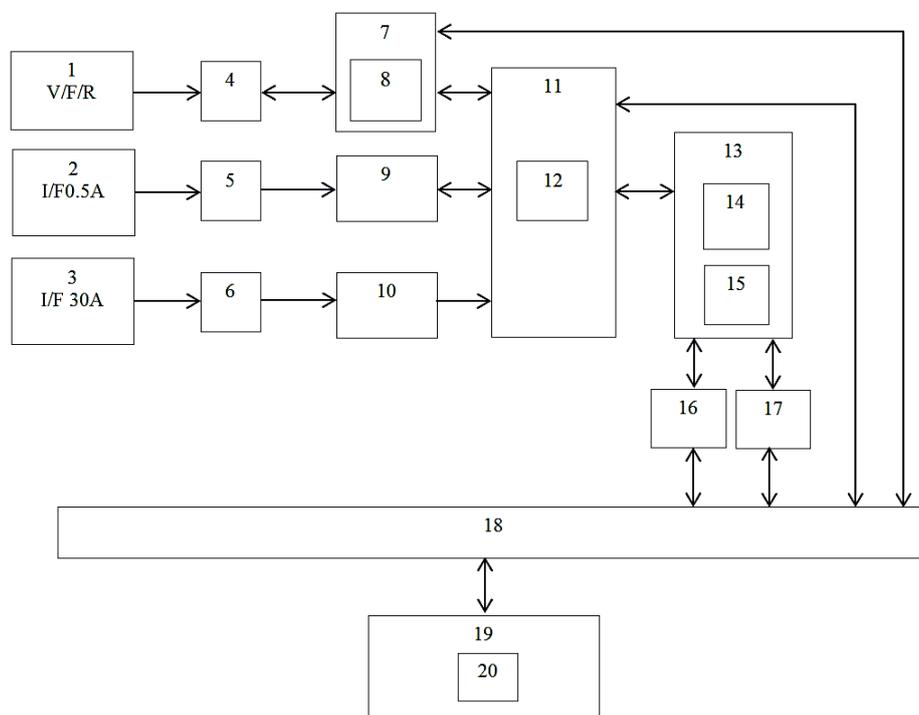


Рис. 4. Структурная функциональная схема многофункционального мультиметра: 1, 2 и 3 – входные клеммы измерений; 4 – блок делителей напряжения и калибровки; 5 и 6 – токовые шунты; 7 – блок коммутации пределов измерения; 8, 9 и 10 – первый, второй и третий декадные усилители; 11 – входной анализатор; 12 – входной АЦП; 13 – блок анализа полувольт; 14 и 15 – АЦП положительной и отрицательной полувольт; 16 – контроллер амплитуды; 17 – контроллер длительности полувольт; 18 – центральный процессор; 19 – монитор; 20 – панель управления

Целью проектирования предлагаемого устройства является расширение функциональных возможностей прибора, увеличение точности и его быстродействия.

Многофункциональный мультиметр функционирует следующим образом.

При включении мультиметр настраивается на максимально допустимое входное напряжение 1000 В посредством соединения блока 7 коммутации пределов измерения с нижним плечом блока 4 делителей напряжения и калибровки в целях предотвращения перегрузки по входу. Режим периода измерения (время, в течение которого будет обрабатываться информация и определяться усредненные значения измеряемого сигнала) автоматически устанавливается 0.1 сек. Для выбора и изменения периода измерения необходимо с панели управления 3 в ручном режиме ввести необходимое значение периода измерения из ряда 10, 1, 0.5, 0.1, 0.5 10-1, 10-2, 0.5 10-3, 10-3, 0.5 10-4, 10-4, 0.5 10-5, 10-6 сек.

В случае, если на входных клеммах 1-3 отсутствуют токи и напряжения, то входной анализатор 11 включает режим измерения сопротивлений. В этом режиме в соответствии с величиной измеряемого сопротивления входной анализатор 11 посредством блока 7 коммутации пределов измерения подключается к соответствующему плечу блока 4 делителей напряжения и калибровки. Полученная информация преобразуется в цифровой сигнал входным АЦП 12 и передается в центральный процессор 18 и далее выдается на монитор 19. В случае, если на входных клеммах 1-3 присутствует только напряжение, то входной анализатор 11 включает режим измерения напряжения и определяет род измеряемого напряжения (постоянный/переменный). В случае обнаружения постоянного напряжения входной анализатор 11 определяет полярность.

При этом в соответствии с величиной измеряемого напряжения входной анализатор 11 посредством блока 7 коммутации пределов измерения подключается к соответствующему плечу блока 4 делителей напряжения и калибровки. В случае малых значений измеряемого сигнала, с целью увеличения точности измерения входного АЦП 12, первый декадный усилитель 8 масштабирует входной сигнал, усиливая его в 10, 100 или 1000 раз. Полученная информация об измерении постоянного напряжения преобразуется в цифровой сигнал входным АЦП 12 и передается в центральный процессор

18 для последующей обработки. Полученная информация выдается на монитор 19.

В случае обнаружения переменного напряжения в соответствии с величиной измеряемого напряжения входной анализатор 11 посредством блока 7 коммутации пределов измерения подключается к соответствующему плечу блока 4 делителей напряжения и калибровки, масштабирует входной сигнал первым декадным усилителем 8 и полученную информацию передает для дальнейшей обработки в блок 13 анализа полувольт.

С целью повышения быстродействия измерений блок 13 анализа полувольт одновременно производит аналого-цифровое преобразование положительной и отрицательной полувольт с помощью АЦП 14 положительной полувольты и АЦП 15 отрицательной полувольты. Далее полученная информация обрабатывается контроллером 16 амплитуды и контроллером 17 длительности полувольт, после чего центральный процессор 18 определяет максимальные амплитудные значения отрицательной и положительной полувольт как пиковые значения с текстовым отображением информации в нижней части монитора 19. Обработав информацию контроллера 16 амплитуды, центральный процессор 18 определяет действующие и средние значения измеряемого напряжения всего сигнала и каждой полувольты в отдельности с текстовым отображением в нижней части монитора 19. Обработав информацию контроллера 17 длительности полувольт, центральный процессор 18 определяет длительность каждой полувольты измеряемого напряжения с текстовым отображением информации в нижней части монитора 19. В случае периодического сигнала определяется его частота и период с текстовым отображением информации в нижней части монитора 19. При этом на мониторе 19 выводится осциллограмма формы измеряемого сигнала. В случае аperiodического сигнала центральный процессор 18 определяет для всего сигнала и каждой полувольты в отдельности пиковое значение напряжения, среднее значение напряжения, действующее значение напряжения, длительность импульса и его осциллограмму.

В случае, если на входных клеммах 1-3 присутствует ток, то входной анализатор 11 включает режим измерения тока и определяет род измеряемого тока (постоянный/переменный). Процесс обработки сигналов при измерении тока аналогичен процессу измерения напряжения за исключением того, что

входной сигнал поступает на входной анализатор 11 через входные клеммы 2-3 и далее через шунты 5 и 6. При этом масштабирование сигналов тока производится посредством второго декадного усилителя 9 для диапазона токов до 0.5А и третьего декадного усилителя 10 для диапазона токов до 30А.

В случае, если на входных клеммах 1-3 присутствуют одновременно напряжение и ток, то входной анализатор 11 включает одновременно режимы измерения тока и напряжения, при этом определяет род измеряемого тока (постоянный/переменный). Процесс обработки сигналов при измерении напряжения и тока аналогичен процессам отдельного измерения напряжения и тока за исключением того, что центральный процессор 18 выводит на экран монитора осциллограммы тока и напряжения с учетом фазы отставания или опережения, с текстовым отображением в нижней части монитора информации всего сигнала и для каждой полувольтной частоты, периода, амплитудного, среднего, действующего значений параметров тока и напряжения, угол опережения/отставания тока от напряжения, $\cos \varphi$, активной мощности, реактивной мощности, полной мощности, а также параметры длительностей всего сигнала и каждой полувольтной.

Многофункциональный мультиметр (см. рис. 4) в автоматическом режиме определяет пределы и функции измерения. При измерениях напряжений и токов периодического сигнала на мониторе отображается его частота, период и амплитуда. При этом фиксируются пиковые отклонения измеряемых сигналов. Контроль параметров ведется для периодического сигнала с анализом отрицательной и положительной полувольтной в отдельности. При одновременном измерении и напряжения, и тока форма сигналов анализируется с учетом фазы отставания или опережения тока от напряжения, с выдачей текстовой информации для сигнала в целом и для каждой полувольтной частоты, периода, амплитуды, среднего и действующего значений параметров тока и напряжения, угол опережения/отставания тока от напряжения, $\cos \varphi$, активной мощности, реактивной мощности, полной мощности, а также временных параметров.

При контроле аperiodического сигнала на мониторе отображается форма импульса, длительность, его действующие, средние и пиковые значения.

Разработанный мультиметр является многофункциональным, так как выполняет функции вольтметра, амперметра, омметра, частотомера, анализатора полувольтной и ваттметра активной, реактивной и полной мощностей.

Включение входного АЦП в состав входного анализатора, а также АЦП положительной полувольтной и АЦП отрицательной полувольтной в состав блока анализа полувольтной позволило увеличить быстродействие мультиметра за счет параллельной работы трех АЦП и двух контроллеров амплитуды и длительности полувольтной.

Наличие трех декадных усилителей позволило увеличить точность измерений за счет того, что декадные усилители подают на вход АЦП оптимальную величину измеряемого сигнала в соответствии с весовыми единицами входного АЦП.

Трехфазный мультиметр

Трехфазный мультиметр относится к средствам оперативного контроля качества электроэнергии, ее мониторинга и учета (патент КР № 214).

Структурная функциональная схема трехфазного мультиметра приведена на рис. 5.

Целью проектирования предлагаемого устройства является создание малогабаритного прибора оперативного контроля качества электроэнергии, обладающего точностными параметрами, соответствующими характеристикам стационарных приборов.

Функционирование мультиметра можно прокомментировать следующим образом.

Питание схем управления устройством осуществляется от измеряемой сети. Мультиметр сохраняет работоспособность при функционировании одной из трех фаз.

При анализе параметров измеряемой сети величины напряжений и тока нормируются в блоках масштабирующих усилителей, а также в блоках делителей напряжения и тока. Нормирование величин сигналов тока и напряжения дает возможность АЦП производить оцифровку измеряемых сигналов, которые от АЦП подаются для последующей обработки на контроллеры анализа амплитуд и длительности. Окончательную обработку измеряемых сигналов производит центральный процессор в соответствии с требованиями к параметрам электроэнергии по ГОСТ Р 54149 – 2010.

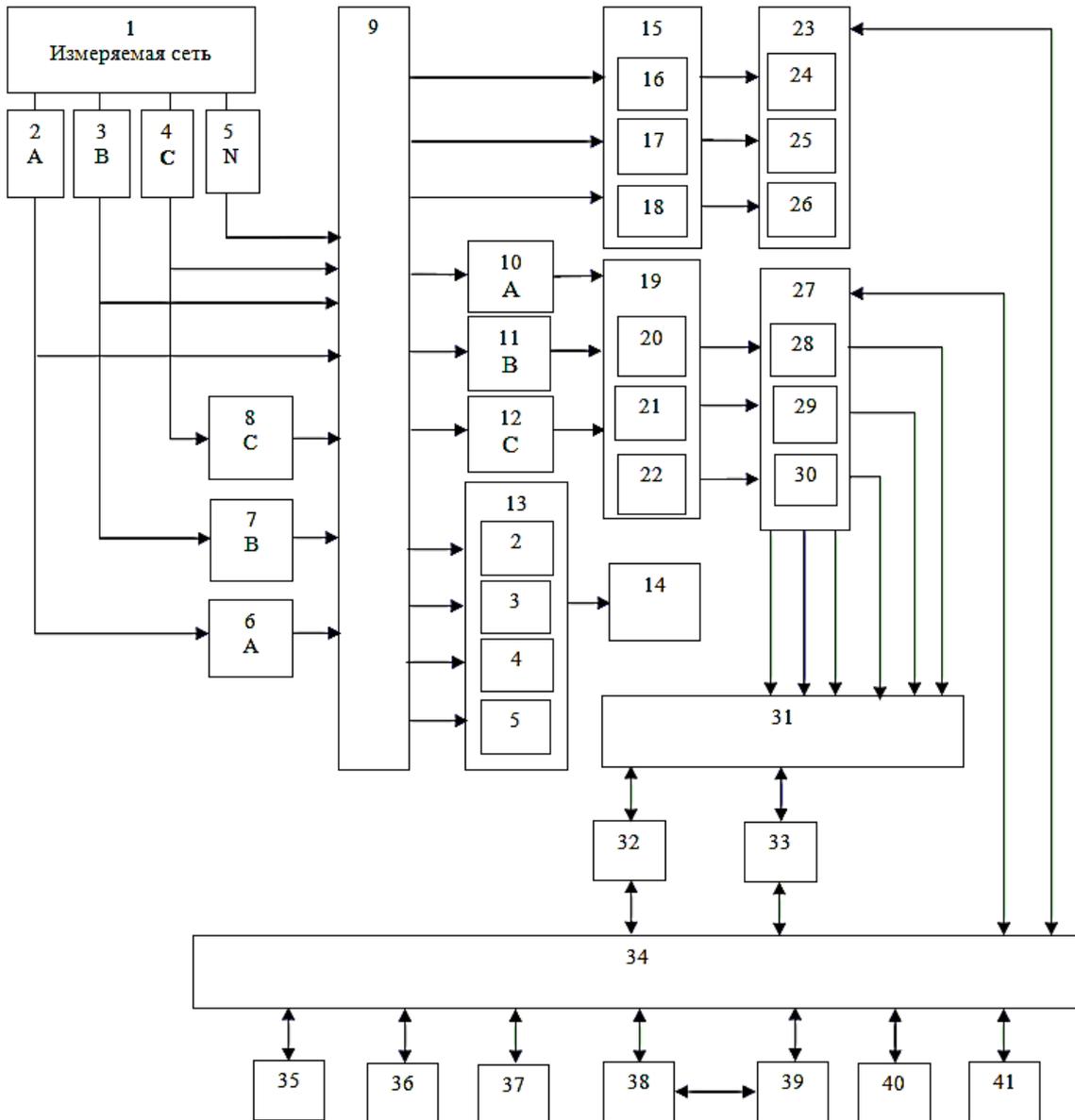


Рис. 5. Структурная функциональная схема трехфазного мультиметра: 1 – измеряемая сеть; 2, 3, 4, и 5 – фазы и нейтраль измеряемой сети; 6, 7 и 8 – три внешних трансформатора тока («измерительные клещи»); 9 – входная клеммная колодка; 10- 12 – трансформаторы тока; 13 – узел электропитания и подзарядки, работающий при питании от измерительной сети как от трех фаз, так и от одной любой фазы; 14 – аккумулятор; 15 – блок делителей сигналов напряжения, имеющий делители 16-18; 19 – блок делителей сигналов тока, имеющий делители 20-22; 23 – масштабирующий усилитель напряжения, имеющий каналы 24-26 усиления; 27 – масштабирующий усилитель тока, имеющий каналы 28-30 усиления; 31 – аналого-цифровой преобразователь (АЦП); 32 - процессор анализа амплитуд; 33 – процессор анализа длительности и частоты; 34 – центральный процессор; 35 – энергонезависимая память; 36 – регистр памяти; 37 – оперативно запоминающее устройство (ОЗУ); 38 - блок интернет связи; 39 – блок 21 дистанционного ввода; 40 – панель управления; 41 – монитор

Информация о параметрах измеряемой сети по интернет каналу передается в пункт сбора и хранения информации о параметрах сети в конкретном регионе.

При необходимости по интернет каналу или с панели управления возможно изменять коды отклонения параметров электроэнергии.

Информация о местоположении устройства хранится в энергонезависимой памяти.

Разработанный трехфазный мультиметр выполняет все виды измерений в соответствии с ГОСТ Р 54149 – 2010. В приборе предусмотрена возможность контроля параметров исследуемых электрических цепей без их отключения.

Повышение точности в разработанном мультиметре достигнуто за счет новых функций делителей сигналов тока и напряжения, также масштабирующих усилителей, усили-

вающих малые величины сигналов до величины, оптимальной для их анализа, с помощью аналогово-цифрового преобразователя.

Заключение

Проектирование измерительных приборов с использованием цифровых компонентов аналитической вычислительной техники, программно-аппаратные узлы которой позволяют производить математическую обработку и хранение информации, предоставляет возможность увеличения метрологических характеристик проектируемых средств измерения без функционального усложнения.

Как правило, при увеличении точности измерений в приборе применялся АЦП большей разрядности. Наличие программно-аппаратной части в устройстве измерений всегда предполагает наличие достаточно широкого спектра математических вычислений. Поэтому для расширения функциональных возможностей в ряде случаев необходимо не менять аппаратную часть заменить программный пакет.

Наличие вычислительных узлов в измерительном устройстве позволило значительно снизить массогабаритные параметры прибора.

Наличие программно-аппаратных составляющих в измерительном устройстве значительно упростило построение модулей формирования и хранения результатов статистического анализа.

Литература

1. Схиртладзе А.Г., Радкевич Я.М. Метрология, стандартизация и технические измерения. Старый Оскол: ТНТ, 2010. 420 с.
2. Скачко Н.Ю., Скачко Ю.В. Мобильные средства ИТ в частотно-цифровых средствах линейных измерений // Труды Российского научно-технического общества радио-

техники, электроники и связи им. А.С. Попова. 2011. № XIII-2. С. 220-223.

3. Штрапенин Г. Сигма-дельта аналого-цифровые преобразователи Texas Instruments // Компоненты и технологии. 2007. № 1.

4. Литвиненко В.П., Тогушов А.С., Левкин Н.П. Сигма-дельта АЦП // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 9. С. 129-131.

5. Жмудь В.А. О применении АЦП с сигма-дельта модуляцией в режиме коммутации // Автоматика и программная инженерия. 2016. № 3 (17). С. 16-24.

6. Патент № 2086 Кыргызская Республика, МПК G01R 15/12, G01R 19/25. Мультиметр-характериограф / Н.Н. Цыбов; Бишкек. №20170143.1; заявл. 21.12.17; опубл. 30.08.18, интеллектуалдык менчик расмий бюл. №8/ 2018. 1 с. https://drive.google.com/file/d/1USKB1Th9YhYzN8z9ytKWzGfnwZx_xIsZ/view

7. Патент № 212 Кыргызская Республика, МПК G01R 13/02. Многофункциональный цифровой осциллограф / Ж. Шаршеналиев, Н.Н. Цыбов; Бишкек. № 20160004.2; заявл. 17.02.16; опубл. 30.09.16, интеллектуалдык менчик расмий бюл. № 10/2016. 2 с. <http://patent.kg/doc/im/2016/10.pdf>

8. Патент № 2087 Кыргызская Республика, МПК G01R 27/02. Z-анализатор составляющих комплексного сопротивления / Н.Н. Цыбов; Бишкек. № 20170132.1; заявл. 06.12.17; опубл. 30.08.18, интеллектуалдык менчик расмий бюл. № 8/2018. 1 с. https://drive.google.com/file/d/1USKB1Th9YhYzN8z9ytKWzGfnwZx_xIsZ/view

9. Патент № 213 Кыргызская Республика, МПК G01R 15/12, G01R 19/25. Многофункциональный мультиметр / Н.Н. Цыбов, Ж. Шаршеналиев; Бишкек. № 20160009.2; заявл. 24.03.16; опубл. 30.09.16, интеллектуалдык менчик расмий бюл. №10/2016. 2 с. <http://patent.kg/doc/im/2016/10.pdf>

10. Патент № 214 Кыргызская Республика, МПК G01R 19/25. Трехфазный мультиметр / Н.Н. Цыбов, Ж. Шаршеналиев; Бишкек. №20160008.2; заявл. 24.03.16; опубл. 30.09.16, интеллектуалдык менчик расмий бюл. №10/2016. 2 с. <http://patent.kg/doc/im/2016/10.pdf>

11. Характеристика основных факторов риска нарушений здоровья населения, проживающего на территориях активного природопользования в Арктике / В.П. Чащин, А.Б. Гудков, О.Н. Попова, И.О. Одланд, А.А. Ковшов // Экология человека. 2014. № 1. С. 3–12.

Поступила 10.11.2018; принята к публикации 24.01.2019

Информация об авторе

Цыбов Николай Николаевич – канд. техн. наук, доцент кафедры «Информационные системы и технологии», Кыргызский государственный университет строительства, транспорта и архитектуры им. Н. Исанова (720020, Кыргызская Республика, г. Бишкек, ул. Мадыбаева, 34,б), тел. (996312)996772, (996312)360235, e-mail: Nikolay_research@mail.ru

USING SOFTWARE AND HARDWARE TOOLS IN THE DESIGN OF DIGITAL ELECTRICAL MEASURING DEVICES

N.N. Tsybov

**N. Isanov Kyrgyzstan State University of Construction, Transport and Architecture,
Bishkek, Kyrgyzstan**

Abstract: the article considers scheme-based technical solutions in designing portable multifunctional high-precision electrical measuring devices using digital components of analysis computer equipment, whose hardware and software components enable to perform the mathematical processing and storage of information. When designing portable multifunctional electrical measuring devices, the use of multi-stage ADC with multiple integration and expensive ADC with balancing or charge balance (the new name is ‘delta-sigma conversion ADCs’) is not advisable due to the integral nonlinearity of the transient peculiarity of the operational amplifier and integrator, as well as their low speed. The article proposes scheme-based technical solutions aimed at achieving accuracy parameters using the examples of designing electrical measuring instruments developed on the basis of computing modules without using expensive high-precision ADCs. The following scheme-based technical solutions are applied for this purpose: the use of normalizing scaling signal amplifiers on ADC’s inputs; inclusion of a precision integrator into the device with an analog-digital converter as its component; inclusion of the input ADC into the input analyzer’s composition, as well as positive half-wave ADC and negative half-wave ADC into the composition of the half-wave analysis block; organization of parallel operation of three ADCs and two controllers of amplitude and duration of half-waves; inclusion of decade amplifiers into the devices

Key words: multifunction, precision, ADC, integrator, amplitude and half-wave duration controller, decade amplifier, scaling amplifier

References

1. Skhirtladze A.G., Radkevich Ya. M. “Metrology, standardization and technical measurements” (“Metrologiya, standartizatsiya i tekhnicheskie izmereniya”), Staryy Oskol, TNT, 2010, 420 p.
2. Skachko N.Yu., Skachko Yu.V. “Mobile IT tools in frequency-digital linear measurement tools”, *Proc. of the Russian Scientific and Technical Society of Radio Engineering, Electronics and Communications (Trudy Rossiyskogo nauchno-tekhnicheskogo obshchestva radiotekhniki, elektroniki i svyazi im. A.S. Popova)*, 2011, no. NSh-2, pp. 220-223
3. Shtrapein G. “Sigma-delta Texas-Instruments analog-digital converters”, *Components and technologies (Komponenty i tekhnologii)*, 2007, no.1
4. Litvinenko V.P., Togushov A.S., Levkin N.P. “Sigma-delta ADC”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 9, pp. 129-131
5. Zhmud' V.A. “On the application of ADC with sigma-delta modulation in the switching mode”, *Automation and Program Engineering (Avtomatika i programnaya inzheneriya)*, 2016, no. 3 (17), pp. 16-24.
6. Tsybov N.N. Patent #2086 of Kyrgyzstan “Multimeter-characteristic tracer” (“Mul'timetr-harkteriograf”), available at: https://drive.google.com/file/d/1USKB1Th9YhYzN8z9ytKWzGfnwZx_xIsZ/view
7. Tsybov N.N., Sharshenaliev Zh. Patent #212 of Kyrgyzstan “Multifunctional digital oscilloscope” (“Mnogofunktsional'nyy tsifrovoy ostsillograf”), available at: <http://patent.kg/doc/im/2016/10.pdf>
8. Tsybov N.N. Patent #2087 of Kyrgyzstan “Z-analyzer of components of complex resistance” (“Z-analizator sostavlyayushchikh kompleksnogo soprotivleniya”), available at: https://drive.google.com/file/d/1USKB1Th9YhYzN8z9ytKWzGfnwZx_xIsZ/view
9. Tsybov N.N. Patent #213 of Kyrgyzstan “Multifunctional multi-meter” (“Mnogofunktsional'nyy mul'timetr”), available at: <http://patent.kg/doc/im/2016/10.pdf>
10. Tsybov N.N. Patent #214 of Kyrgyzstan “Three-phase multimeter” (“Tryekhfaznyy mul'timetr”), available at: <http://patent.kg/doc/im/2016/10.pdf>
11. Chashchin V.P., Gudkov A.B., Popova O.N., Odland I.O., Kovshov A.A. “Characteristics of the main risk factors for violations of the health of the population living in areas of active nature management in the Arctic”, *Human ecology (Ekologiya cheloveka)*, 2014, no. 1. pp. 3-12.

Submitted 10.11.2018; revised 24.01.2019

Information about the author

Nikolay N. Tsybov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, N. Isanov Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture, (34b Maldybaev str., Bishkek 720020, Kyrgyzstan), tel. 996772 360235, e-mail: Nikolay_research@mail.ru

КОЛЬЦЕВАЯ АНТЕННАЯ РЕШЕТКА ИЗ ПЕТЛЕВЫХ ВИБРАТОРОВ ПИСТОЛЬКОРСА С РЕЗИСТИВНЫМИ НАГРУЗКАМИ В КОНТУРАХ ПРОТЕКАНИЯ ТОКОВ

А.В. Ашихмин¹, Л.Н. Коротков², Ю.Г. Пастернак², П.В. Першин¹, Ю.А. Рембовский¹,
С.М. Федоров²

¹ЗАО «ИРКОС», г. Москва, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: предложена конструкция кольцевой антенной решетки, состоящей из петлевых вибраторов Пистолькорса с резистивными нагрузками в контурах протекания токов, предназначенная для использования в радиопеленгаторных комплексах. Антенная решетка представляет собой набор из нескольких соединенных антенн, которые работают вместе как одна антенна для передачи или приема радиоволн. Отдельные антенны (называемые элементами) обычно подключаются к одному приемнику или передатчику с помощью фидерных линий, которые подают питание элементам в конкретном фазовом соотношении. Радиоволны, излучаемые каждой отдельной антенной, комбинируются и накладываются друг на друга, складываясь вместе для усиления мощности, излучаемой в желаемых направлениях, и вычитаясь для уменьшения мощности, излучаемой в других направлениях. Аналогично, при использовании для приема отдельные радиочастотные токи от отдельных антенн объединяются в приемнике с правильным соотношением фаз для усиления сигналов, полученных от желаемых направлений, и вычитания сигналов от нежелательных направлений. Антенная решетка может обладать более высоким коэффициентом усиления, то есть более узким лучом, чем может быть у одиночного элемента. В общем, чем больше количество используемых антенных элементов, тем выше коэффициент усиления и более узкий луч. В работе приведены результаты численного исследования предложенной конструкции антенной решетки

Ключевые слова: петлевой вибратор Пистолькорса, радиопеленгация

Введение

Вслед за развитием электроники развивались и радиопеленгаторы. Ранние системы использовали механически вращающиеся антенны, которые сравнивали уровни сигнала. Современные системы используют сравнение фазовым или доплеровским методом, которые, как правило, проще автоматизировать. В настоящее время методы широкополосной передачи информации все чаще используются для беспроводной связи, а значит, спектральные компоненты могут быть сопоставлены с определенным эмиттером, только если известно направление прихода излучения. Поэтому радиопеленгация является необходимым первым шагом в детектировании радиосигналов [1, 2].

Наличие опорной мачты в радиопеленгаторных антенных решетках приводит к существенному искажению формы диаграммы направленности антенных элементов, сильно зависящему от частоты.

Проектирование антенного устройства

Для решения данной проблемы в настоящей работе предложена кольцевая антенная решетка, состоящая из петлевых вибраторов Пистолькорса с резистивными нагрузками в контурах протекания токов, рис. 1. В рассматриваемой антенной системе мачта выполняет также функцию общего проводника всех петлевых вибраторов, диаметр которого существенно превышает ширину плоских проводников петлевых вибраторов Пистолькорса, благодаря чему диаграммы направленности каждого элемента в составе решетки характеризуются стабильностью формы в полосе частот с коэффициентом перекрытия более 3.

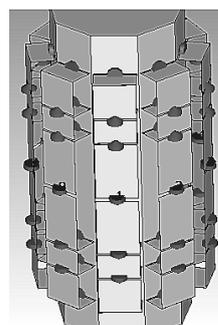


Рис. 1. Конструкция кольцевой антенной решетки, состоящей из шунтовых вибраторов Пистолькорса с резистивными нагрузками

Размеры контуров протекания токов и номиналы резисторов определялись путем оптимизации на основании численного анализа антенной системы с использованием метода Вейланда [3-7].

Антенная решетка функционирует в полосе частот от 1 до 3 ГГц. Количество вибраторов Пистолькорса, расположенных эквидистантно по азимутальной координате – 9. Диаметр окружности, на которой расположены вибраторы – 110 мм. Полная длина вибраторов – 150 мм. Длина высокочастотного (внутреннего) контура составляла 72 мм. Длина среднечастотного контура – 104 мм. Диаметр внутреннего экрана – 80 мм. Среднее значение входного сопротивления вибраторов – 100 Ом. Номиналы последовательно включаемых резисторов – 300 Ом и 200 Ом (при удалении от точек запитки антенны). Номиналы параллельно включаемых резисторов – 300 Ом, 200 Ом и 100 Ом (при удалении от точек запитки).

Номограмма Смита антенны для волнового сопротивления фидерной линии 100 Ом приведена на рис. 2; частотная зависимость КСВН – на рис. 3. Частотная зависимость полного коэффициента полезного действия антенны приведена на рис. 4.

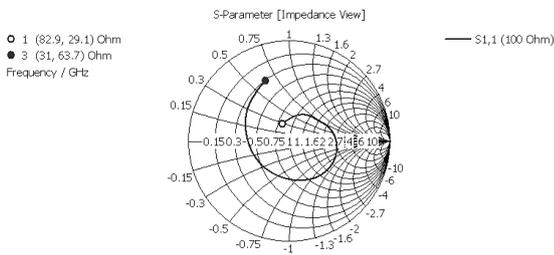


Рис. 2. Номограмма Смита вибратора Пистолькорса с резистивными нагрузками, находящегося в составе кольцевой антенной решетки

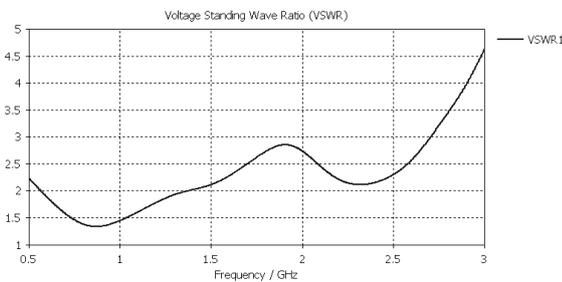


Рис. 3. КСВН на входе вибратора Пистолькорса с резистивными нагрузками, находящегося в составе кольцевой антенной решетки

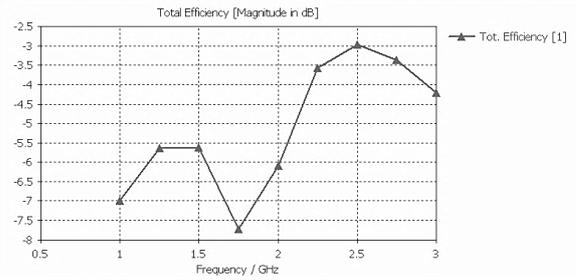


Рис. 4. КПД (в дБ) вибратора Пистолькорса с резистивными нагрузками, находящегося в составе кольцевой антенной решетки

Существенное снижение КПД (минимальное значение КПД в диапазоне 1-3 ГГц составляет приблизительно -8 дБ) антенны является платой за относительную стабильность формы диаграммы направленности, рис. 5, 6 и удовлетворительное для сверхширокополосной приемной антенны качество согласования (в полосе частот 0.5-2.6 ГГц максимальный уровень КСВН составляет 2.8). Шесть поперечных печатных плат, играющих роль шунтов, в разрывы которых включены резисторы, также выполняют функцию обеспечения механической прочности вибратора Пистолькорса.

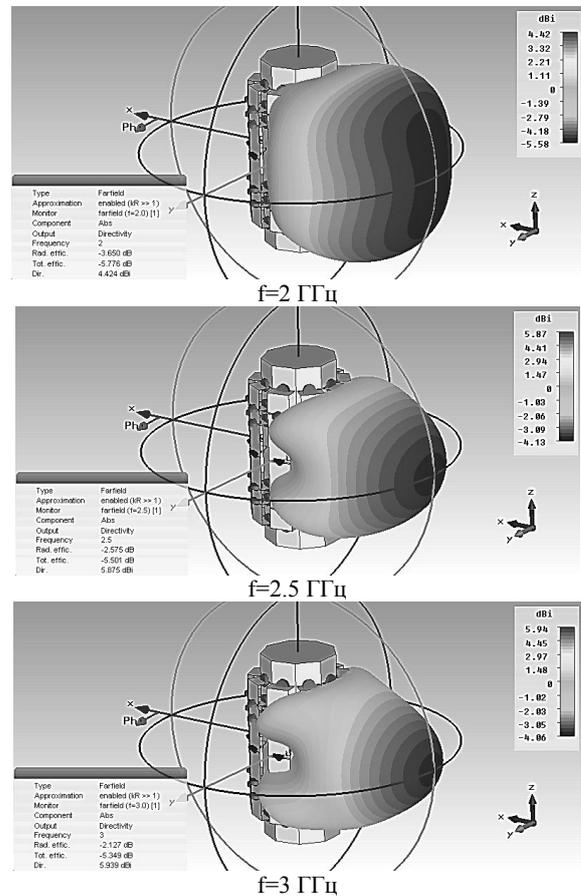


Рис. 5. ДН шунтового вибратора Пистолькорса в составе кольцевой решетки

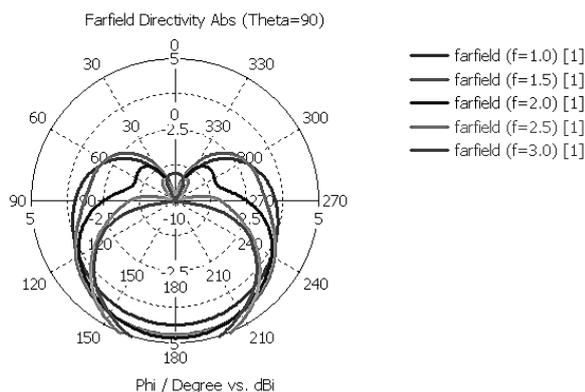


Рис. 6. Разрез в азимутальной плоскости ДН шунтового вибратора Пистолькорса в составе кольцевой решетки на частотах 1, 1.5, 2, 2.5, 3 ГГц

Выводы

Таким образом, недостатки и достоинства данного технического решения очевидны. Недостатки: существенное уменьшение КПД из-за рассогласования и потерь мощности в резисторах; увеличение уровня собственных шумов по той же причине; качество согласования оставляет желать лучшего. Достоинства: компактность, механическая прочность, удовлетворительное сохранение формы диаграммы

направленности в сверхширокой полосе частот.

Литература

1. John L. Volakis, Antenna Engineering Handbook, Fourth Edition, McGraw-Hill Education: New York, 2007, 1755 p.
2. Thomas A. Milligan, Modern Antenna Design, 2nd Edition, Wiley-IEEE Press, 2005, 632 p.
3. Weiland, T., A Discretization Method for the Solution of Maxwell's Equations for Sixcomponent Fields, Electronics and Communications AEEU, 1977, Vol. 31, No. 3, pp. 116–120.
4. M. Clemens, Weiland T., Discrete Electromagnetism with the Finite Integration Technique, Progress In Electromagnetics Research, PIER 32, 2001, pp. 65–87.
5. Пирогов А.А. Методы повышения помехозащищенности и эффективности кодирования сетей связи абонентского доступа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 162-163.
6. Разработка радиоэлектронных модулей с использованием планарных трансформаторов на основе многослойных печатных плат методом сквозного проектирования / А.А. Пирогов, А.Б. Буслаев, А.О. Дроздов, О.Ю. Макаров // Радиотехника. 2018. № 7. С. 11-15.
7. Сравнение статистических методов испытаний надёжности РЭС / А.С. Костюков, И.С. Бобылкин, Л.Н. Никитин, А.А. Пирогов // Надёжность и качество: труды международного симпозиума. 2018. Т. 2. С. 35-37.

Поступила 05.12.2018; принята к публикации 31.12.2019

Информация об авторах

Ашихмин Александр Владимирович – д-р техн. наук, главный инженер, ЗАО «ИРКОС» (129626, Россия, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: info@ircos.ru

Коротков Леонид Николаевич - д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473) 246-66-47, e-mail: myftt@yandex.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: pasternakyg@mail.ru

Першин Павел Викторович – ведущий инженер, ЗАО «Иркос» (129626, Россия, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), тел. +7(473) 2-392-300, e-mail: pershinpv@gmail.com

Рембовский Юрий Анатольевич - д-р техн. наук, директор по внешнеэкономической деятельности, ЗАО «ИРКОС» (129626, Россия, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: info@ircos.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

ANNULAR ANTENNA GRID OF PISTOLKOR LOOP VIBRATORS WITH RESISTANT LOADS IN THE CURRENT CIRCUITS

A.V. Ashihmin¹, L.N. Korotkov², Yu.G. Pasternak², P.V. Pershin¹, Yu.A. Rembovskiy¹, S.M. Fedorov²

¹JSC "IRCOS", Moscow, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: a design of an annular antenna array consisting of Pistolkor loop vibrators with resistive loads in current path loops is proposed for use in radio direction finder complexes. An antenna array is a collection of several joined antennas that work together as one antenna to transmit or receive radio waves. Separate antennas (called elements) are usually connected to one receiver or transmitter using feeder lines that feed the elements in a particular phase relationship. The radio waves emitted

by each individual antenna are combined and superimposed on each other, adding together to increase the power emitted in the desired directions, and subtracting to reduce the power emitted in other directions. Similarly, when used to receive, individual RW currents from individual antennas are combined in the receiver with the correct phase ratio to amplify signals received from the desired directions and subtract signals from unwanted directions. The antenna array may have a higher gain, that is, a narrower beam than a single element may have. In general, the greater the number of antenna elements used, the higher the gain and the narrower the beam. The paper presents the results of a numerical study of the proposed antenna array design

Key words: Pistolcors loop antenna, radio direction finding

References

1. Volakis J.L. "Antenna engineering handbook", Fourth Edition, McGraw-Hill Education, New York, 2007, 1755 p.
2. Milligan T. A. "Modern antenna design, 2nd Edition", Wiley-IEEE Press, 2005, 632 p.
3. Weiland T. "A Discretization method for the solution of maxwell's equations for sixcomponent fields", *Electronics and Communications AEEU*, 1977, vol. 31, no. 3, pp. 116–120.
4. Clemens M., Weiland T. "Discrete electromagnetism with the finite integration technique", *Progress In Electromagnetics Research, PIER* 32, 2001, pp. 65–87.
5. Pirogov A.A. "Methods to improve noise immunity and coding efficiency of subscriber access communication networks", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 1, pp. 162-163.
6. Pirogov A.A., Buslaev A.B., Drozov A.O., Makarov O.Yu. "Development of radio-electronic modules using planar transformers based on multilayer printed circuit boards using the end-to-end design method", *Radio techniques (Radiotekhnika)*, 2018, no. 7, pp. 11-15.
7. Kostyukov A.S., Bobylkin I.S., Nikitin L.N., Pirogov A.A. "Comparison of statistical methods for testing the reliability of radio electronic device", *Proc. of the International Symposium Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: trudy mezhdunarodnogo simpoziuma)*, 2018, vol. 2, pp. 35-37.

Submitted 05.12.2018; revised 31.12.2018

Information about the authors

Aleksandr V. Ashikhmin, Dr. Sc. (Technical), Chief Engineer, JSC "IRKOS" (21 Zvezdnyy bul'var, Moscow 129626, Russia), e-mail: info@ircos.ru

Leonid N. Korotkov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (473) 246-66-47, e-mail: myfft@yandex.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: pasternakyg@mail.ru

Pavel V. Pershin, Leading Engineer, JSC "IRKOS" (21 Zvezdnyy bul'var, Moscow 129626, Russia), tel. +7 (473) 2-392-300, e-mail: pershinpv@gmail.com

Yuriy A. Rembovskiy, Dr. Sc. (Technical), Director of Foreign Economic Activity, JSC "IRKOS" (21 Zvezdnyy bul'var, Moscow 129626, Russia), e-mail: info@ircos.ru

Sergey M. Fedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. +7 (473) 243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ САПР/САЕ-СИСТЕМ ДЛЯ АНАЛИЗА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИЙ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ

М.А. Ромащенко, Д.С. Сеимова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: главным этапом при конструировании электронных и электротехнических устройств является их моделирование в САПР для определения эмиссии радиочастотных помех и чувствительности к помехам, которое основывается на параметрах радиоэлектронного устройства. Использование САПР позволяет находить оптимальные технологические решения для обеспечения электромагнитной совместимости и помогает избежать дальнейших затратных доработок конструкции. С увеличением качества предтопологического и посттопологического анализа возрастает возможность формирования корректной разработки в короткие сроки. Проектируемое радиоэлектронное устройство предполагает присутствие минимизированного числа ошибок или полное их отсутствие. При разработке высококачественного радиоэлектронного оборудования необходимо обеспечение неискаженной передачи сигналов, следовательно, ни одна печатная плата не может быть изготовлена без использования специализированного программного обеспечения, облегчающего поиск помех и обеспечивающего электромагнитную совместимость. Проведен анализ наиболее распространенных САПР для исследования в области обеспечения электромагнитной совместимости и целостности сигналов в целях представления возможностей прикладных программ в данной области. Представлена возможность использования виртуального метода прототипирования для проведения интерактивного моделирования обеспечения электромагнитной совместимости

Ключевые слова: электромагнитная совместимость (ЭМС), помехоустойчивость (ПУ), моделирование электромагнитных процессов, прототипирование, радиоэлектронные средства (РЭС), САПР, электромагнитные помехи (ЭМП)

Введение

В последние годы существенно возросло значение внутрисистемной электромагнитной совместимости (ЭМС). Из-за постоянного обновления и увеличения числа радиоэлектронных средств (РЭС) растет потребность в обеспечении помехозащиты и продления срока службы изделия. Снижение качества выполнения организационно-технических операций, а тем более отказ работы устройства ввиду электромагнитной несовместимости ведут к снижению срока службы или полной неработоспособности. При разработке необходимо учитывать возможность воздействия внешних источников электромагнитных помех (ЭМП). В настоящее время уделяется недостаточно внимания методике, позволяющей оптимально и эффективно проектировать РЭС с учетом ЭМС из-за отсутствия требований в техническом задании (ТЗ) или же из-за неясности причин возникновения ЭМП. Таким образом, требуется усовершенствование существующих методов помехозащиты и необходима разработка новых подходов к оптимальному проектированию РЭС [1].

Актуальность

Совокупный подход к анализу проблемы обеспечения ЭМС разнообразных РЭС позволяет выявить источник помех, пути распространения помех, установление восприимчивости аппаратуры и, в итоге, методы помехозащиты. При анализе необходимо учитывать особенности конструкторско-технологического характера. Общепринятыми являются методы помехозащиты такие, как экранирование, фильтрация помех и рациональное выполнение монтажных соединений, цепей заземления, а также способы компоновки элементов на печатной плате (ПП) и узлов аппаратуры, обеспечивающие снижение уровней внутренних помех, однако такой подход считается уже устаревшим [2]. При разработке, модернизации или диагностировании ПП большинство рекомендаций являются противоречивыми и требуют при реализации определенного компромисса. Качественная ПП с точки зрения ЭМС не является следствием использования всех возможных рекомендаций и методов по устранению помех, это результат применения действительно необходимых решений для конкретного случая [3].

Около 70% разработок терпят неудачу при первом тестировании на ЭМС. Статистика Intertek Testing Services показывает, что больше половины программных продуктов не проходит первоначальный тест на ЭМС из-за неспособности применить принципы ЭМС, отсутствия знаний, неправильного применения правил ЭМС, непредсказуемого взаимодействия между элементами схемы, а также включенных несоответствующих модулей или узлов в изготовленное устройство [4].

В статье показана возможность использования виртуального метода прототипирования в целях создания интерактивного моделирования ЭМС. Ниже представлен краткий анализ наиболее распространенных САПР для исследования в области обеспечения ЭМС и целостности сигналов с целью представления возможностей прикладных программ в данной области.

Анализ CAD/CAE – систем для обеспечения электромагнитной совместимости

Программа ELCUT, разработанная ООО «Тор» (г. Санкт-Петербург), пока единственное в России средство, используемое для проведения анализа низкочастотных электромагнитных и температурных полей методом конечных элементов [5]. Данное ПО будет полезно для университетского исследования, в целях ознакомления с техникой моделирования поля методом конечных элементов. Последовательность анализа проблемы в конкретном ПО от разработчиков выглядит следующим образом: прорисовка геометрии макета, генерирование расчетной сетки методом конечных элементов, указание граничных условий, а также особенностей материалов, определение дискретной задачи, анализ результатов вывода, затем попутное извлечение из него локальных и интегральных инженерных параметров. Возможности такого ПО не совсем многообразны: оно позволяет производить исследование волнового сопротивления линий передачи, если заранее известна мода колебаний, вычислять потери в диэлектрике и в проводниках с учетом скин-эффекта и поверхностного эффекта; вычислять индуктивность проводников на переменном токе; вычислять матрицы частичных емкостей и частичных индуктивностей системы из нескольких проводников; оценивать тепловое состоя-

ние элементов в 2D- и 3D-моделях при задании условий конвективного теплообмена; проводить оптимизационный и статистический анализ.

Такая программа полезна лишь на заключительных этапах конструирования, она не является унифицированной и не может исследовать изделия на каждом из его жизненных циклов.

В течение последних двух десятилетий LabVIEW - полнофункциональный графический язык программирования от National Instruments - был использован миллионами инженеров и ученых для разработки сложных систем измерения, тестирования и контроля. Он устраняет множество синтаксических деталей, связанных с текстовыми языками, обеспечивая при этом обширный сбор, анализ и презентацию данных в одной среде [6].

Преимущества использования LabVIEW при проведении математического анализа обеспечения ЭМС включают:

- возможность построения точных математических моделей, описывающих различные явления и системы;
- привлекательные графические пользовательские интерфейсы (GUI), которые позволяют пользователям полностью взаимодействовать с имитируемыми явлениями;
- сокращение времени разработки и сложности;
- простое обновление с новыми требованиями и разработками;
- возможность научной визуализации, включая специализированные графики (графики Смита, Боде, полярные, 3D-графики и т. д.);
- наличие специализированных модулей и наборов инструментальных средств, таких как Control Design and Simulation Module, Simulation Interface Toolkit (соединяет пользовательские интерфейсы LabVIEW с имитационными моделями, запущенными в Simulink), инструментарий Spectral Measurements Toolkit и инструментарий модуляции, который может расширить базовые функции LabVIEW для разработки виртуальных инструментов, относящихся к темам ЭМС.

Однако использование LabVIEW для изучения конкретных концепций ЭМС требует разработки кода. Даже если на веб-сайте National Instruments имеется огромное количество примеров, только некоторые из них предназначены для изучения концепций ЭМС. Параметры компонента устанавливаются в ин-

терактивном режиме, и полученный импеданс отображаются мгновенно.

Таким образом, использование LabVIEW позволяет разрабатывать недорогие, многофункциональные средства моделирования для изучения различных концепций, связанных с ЭМС. Интерес к данной теме заключается в усовершенствовании этой программы, чтобы обеспечить более сложную и эффективную среду измерения ЭМС.

Программное обеспечение CST EMC STUDIO предназначено для анализа ЭМС и ЭМП с использованием 3D-моделирования электромагнитного поля [7]. С помощью данного ПО пользователи могут исследовать такие эффекты, как излучаемые или проводимые выбросы в устройствах радиоэлектроники, а также восприимчивость к электростатическим разрядам, ударам молнии и высокоинтенсивным излучаемым полям. ПО поставляется с универсальными 3D-модулями для представления во временной и частотной областях, а также со специализированным вычислителем, который использует матрицу линии передач (Transmission Line Matrix (TLM)), которая проводит исследование во временной области, основанное на гексагональном сеточном разбиении. Доступные вычислителю специализированные компактные модели щелей, зазоров, стыков, отверстий, а также технологии сеточного построения на базе октодеревя делают его незаменимым при решении задач обеспечения ЭМС и ПУ.

CST EMC STUDIO также включает в себя ресивер кабельного жгута, электронную автоматизацию конструирования и инструменты импорта САПР, компактные модели для макетирования вентиляционных отверстий и швов. Пользователи также могут интегрировать кабельные жгуты в сложную трехмерную модель и анализировать их с помощью двунаправленного моделирования.

В сочетании со средой CST System Assembly and Modeling (SAM) для упрощения управления имитационным проектом отдельные компоненты также могут комбинироваться для комплексного моделирования. Посредством своих специализированных рабочих процессов ЭМС данное ПО может интегрироваться в объемный спектр процессов проектирования электротехнических средств. Совокупное исследование электромагнитных конструкций во временной области предоставляет возможность учитывать электромагнитные

поля, возникающие вследствие взаимодействия с нелинейными элементами схемы. Исследование во временной области позволяет вычислять набор гармонических составляющих сигнала.

Подобная степень развития технологий моделирования данного ПО была достигнута посредством длительного усовершенствования вычислительных модулей. Большая точность результатов работы программного CST предоставляет возможность потребителям создавать имитационные макеты, интегрирующие поведение реальных РЭС, уменьшая тем самым время разработки и стоимость выпускаемой продукции.

Унифицированный подход данного ПО позволяет проводить верификацию собранных данных посредством сравнения результатов макетирования, полученных с эксплуатацией различных прикладных ПО в единой рабочей среде. Подобная перекрестная проверка повышает точность полученных результатов и помогает потребителям выявить ошибки в описании устройства или в процессе выполнения измерений.

Для эффективного моделирования требуется ПО с качественно описанной структурой. Следовательно, что имитационная модель должна описывать реальные объекты и учитывать объемный спектр действующих на них ЭМ процессов. Модульное ПО содержит весьма мощные средства построения и импорта моделей из САД систем, помогающие потребителю построить правильную имитационную модель анализируемого устройства. Однако данная программа со всеми требуемыми пакетами стоит достаточно дорого, к тому же не совсем четкая методика использования не позволяет протестировать и оценить эффективность данного ПО [8]. Рассмотрим еще один программный пакет, применяющийся для анализа ЭМС на этапе разработки.

EMCoS PCB VLab - программный продукт для предтопологической обработки и анализа сложных систем печатных плат. Он включает в себя различные наборы инструментов для визуализации и позволяет обеспечить удобную обработку данных. Подсистема RapidRLC, включенная в среду VLab EMCoS PCB, обеспечивает паразитное извлечение RLC и генерирование эквивалентной схемы для анализа паразитных эффектов на печатной плате. Сгенерированная паразитная схема мо-

жет быть использована далее при анализе моделирования системы EMC Studio [9].

Платформа EMCoS PCB VLab содержит также подсистему MTL, которая выполняет анализ целостности сигнала и оценку излучаемой эмиссии после компоновки. Наряду с автономной экстракцией паразитных наводок EMCoS PCB VLab поддерживает обмен данными с EMC Studio для интеграции в полный процесс моделирования.

Основными возможностями EMCoS PCB VLab являются извлечение паразитных RLC наводок, 3D двухполупериодный PCB анализ (электромагнитный и контурный), исследование целостности сигнала и радиационной эмиссии, 3D-визуализация в режиме реального времени, интеграция в подсистемы EMCoS, поддержка 64-битной платформы.

EMC Studio применяет вычислительные методы, такие как метод моментов, метод вспомогательных источников, методы линии передачи и сетевой анализ (SPICE/PSPICE или Dolphin-SMASH vhdI-AMS solvers) [10].

Существует еще несколько программных комплексов, анализирующих РЭС на этапе разработки, но они не отличаются высокой эффективностью, а представленные зарубежные программы имеют высокую стоимость и не совсем ясный принцип использования, помимо этого, отсутствие подробной документации и дополнительной литературы на русском языке вызывает определенные трудности для части пользователей.

Заключение

Таким образом, анализируя представленные программные продукты, можно сделать вывод о том, что проблема обеспечения ЭМС все еще не решена, т.к. существующие САПР не отличаются высокой эффективностью и производительностью. Недостаток точных алгоритмов рационального размещения электро-радиоэлементов на печатной плате с учетом обеспечения требуемого уровня ЭМС, массивность и трудоемкость математического пред-

ставления требуют применения различных САПР для эффективного и качественного конструирования электронных устройств. Требуется создать такой программный комплекс, который сможет позволить включить в процесс проектирования печатной платы анализ электромагнитной совместимости на каждом из этапов разработки, вследствие чего можно избежать крупных ошибок после выпуска в производство и повторного конструирования РЭС, а также повысить качество изготавливаемого изделия.

Литература

1. Ромашенко М.А. Методы оптимального проектирования конструкции радиоэлектронных средств с учетом электромагнитной совместимости и помехоустойчивости: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Воронеж, 2014. С. 26-30.
2. Глотов В.В., Ромашенко М.А. Использование САД-системы EMCOS PCB VLAB в задачах обеспечения ЭМС // Проблемы передачи и обработки информации в сетях и системах телекоммуникаций: материалы 18-й Междунар. науч.-техн. конф., 2015. С. 61-63.
3. Макаров О.Ю., Муратов А.В., Ромашенко М.А. Методы обеспечения внутри аппаратурной электромагнитной совместимости и помехоустойчивости в конструкциях электронных средств. Воронеж, 2013. С. 40-56.
4. <http://www.intertek.com/certification/>
5. https://elcut.ru/pack_r.htm
6. <http://www.ni.com/white-paper/53671/en/>
7. CST PCB STUDIO - анализ целостности сигналов в печатных платах. Режим доступа: http://eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-PCB-STUDIO.phtml
8. Судариков А.В., Ромашенко М.А., Муратов А.В. Анализ электромагнитных воздействий радиоэлектронных средств с помощью систем автоматизированного проектирования САД/CAE категории // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 8. С. 135-137.
9. Modeling of EMC-Filter from Würth Elektronik Design Kit. Режим доступа: <https://www.emcos.com/?application-examples=modeling-of-emc-filter-from-wurth-elektronik-design-kit>
10. Глотов В.В., Ромашенко М.А. Моделирование печатной платы для проверки на электромагнитную совместимость в EMCOS PCB VLAB // Виртуальное моделирование, прототипирование и промышленный дизайн: материалы II Междунар. науч.-практ. конф., 2016. С. 149-152.

Поступила 10.12.2018; принята к публикации 31.12.2019

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>
Сеимова Дарья Сергеевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: dashyli98@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

**MODERN CONDITION OF CAD/CAE SYSTEMS FOR THE ANALYSIS
OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN THE PROBLEMS OF OPTIMAL
DESIGN OF RADIO ELECTRONIC FACILITIES**

M.A. Romashchenko, D.S. Seimova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the main step in the design of electrical devices are CAD tools for determining the emission of radio frequency interference and sensitivity with sufficient accuracy, based on the design parameters of the radio electronic element. The use of CAD systems will provide an opportunity to use appropriate technologies for providing EMC and help avoid further costly development. With an increase in the quality of pre-topological and post-topological analysis, the probability of creating a correct development in a shorter period of time increases. Designed radio-electronic equipment assumes the presence of a minimized number of errors or their complete absence. When developing high-quality radioelectronic equipment, it became necessary to ensure undistorted signal transmission, therefore, no printed circuit board can be manufactured without the use of specialized software that facilitates the search for interference and ensures electromagnetic compatibility. The article presents an analysis of the most common CAD systems for research in the field of EMC and signal integrity in order to present the capabilities of application programs in this area. The possibility of using a virtual prototyping method to create interactive electromagnetic compatibility modeling (EMC) is illustrated

Key words: electromagnetic compatibility (EMC), noise immunity (NI), modeling of electromagnetic processes, prototyping, radio-electronic means (REM), CAD, electromagnetic interference (EMI)

References

1. Romashchenko M.A. "Methods for optimal design of radio electronic equipment with regard to electromagnetic compatibility and noise immunity. Dr. tech. sci. diss." ("Metody optimal'nogo proektirovaniya konstruktsii radioelektronnykh sredstv s uchetom elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti: avtoref. dis. d-ra tekhn. nauk."), VSTU, Voronezh, 2014, pp. 26-30.
2. Glotov V.V., Romashchenko M.A. "Using the EMCOS PCB VLAB CAD system in EMC ensuring tasks", *Proc. of the 18th International Scientific and Technical Conference "Problems of Information Transmission and Processing in Telecommunication Networks and Systems" (Problemy peredachi i obrabotki informatsii v setyakh i sistemakh telekommunikatsiy: materialy 18-y Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf)*, 2015, pp. 61-63.
3. Makarov O.Yu., Muratov A.V., Romashchenko M.A. "Methods to ensure the internal hardware electromagnetic compatibility and noise immunity in the design of electronic devices" ("Metody obespecheniya vnutri apparaturnoy elektromagnitnoy sovmestimosti i pomekhoustoychivosti v konstruktsiyakh elektronnykh sredstv"), Voronezh, 2013, pp. 40-56.
4. <http://www.intertek.com/certification/>
5. https://elcut.ru/pack_r.htm
6. <http://www.ni.com/white-paper/53671/en/>
7. http://eurointech.ru/eda/microwave_design/cst/CST-PCB-STUDIO.phtml
8. Sudarikov A.V., Romashchenko M.A., Muratov A.V. "Analysis of electromagnetic effects of radio-electronic means using computer-aided design CAD/CAE category", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 8, pp. 135-137.
9. <https://www.emcos.com/?application-examples=modeling-of-emc-filter-from-wurth-elektronik-design-kit>
10. Glotov V.V., Romashchenko M.A. "Simulation of a printed circuit board for testing for electromagnetic compatibility in EMCOS PCB VLAB", *Proc. of the II International Scientific and Practical Conference Virtual modeling, prototyping and industrial design (Virtual'noe modelirovanie, prototipirovanie i promyshlennyy dizayn: materialy II Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, 2016, pp. 149-152.

Submitted 10.12.2018; revised 31.12.2018

Information about the authors

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>

Dar'ya S. Seimova, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: dashyli98@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4946-5426>

СФЕРИЧЕСКАЯ ЛИНЗА ЛЮНЕБЕРГА НА ОСНОВЕ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ С ЭЛЕКТРИЧЕСКИ МАЛЫМИ РАССЕЙВАТЕЛЯМИ

К.А. Быков, Л.Н. Коротков, Ю.Г. Пастернак, Р.Е. Рогозин, С.М. Фёдоров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена реализация объёмной линзы Люнеберга, выполненной на диэлектрических дисках из тонкого стеклотекстолита FR-4 с напечатанной периодической структурой, представляющей собой электрические малые рассеиватели. На основе анализа открытых источников рассмотрена эквивалентная схема напечатанной периодической структуры, которая позволяет наглядно продемонстрировать реализуемую идею. Данный способ изготовления объёмной линзы Люнеберга позволит существенно снизить массу, что является актуальной проблемой на данный момент. Для воплощения предложенной идеи в работе представлена методика измерения диэлектрической проницаемости однородного искусственного диэлектрика, основанная на применении прямоугольного волновода, возбуждаемого основной модой волны типа H и заполненного измеряемой средой. Данная методика позволила синтезировать необходимый закон изменения коэффициента преломления для реализации объёмной линзы Люнеберга. Приведены полученные в ходе моделирования зависимости коэффициента преломления от размера электрического рассеивателя, а также её аппроксимация. Получены направленные характеристики данной линзы в азимутальной плоскости в диапазоне частот от 1 до 2 ГГц. Сделаны выводы о зависимости коэффициента направленного действия линзы от поворота облучателя относительно её центра в азимутальной плоскости

Ключевые слова: линза Люнеберга, коэффициент преломления, относительная диэлектрическая проницаемость, коэффициент направленного действия

Введение

Во многих отраслях человеческой деятельности широко используются направленные антенные системы. Такие антенны должны обладать широкополосностью и многофункциональностью, а также быть способными к управлению диаграммой направленности. Число конструкций антенн, удовлетворяющих указанным выше требованиям, ограничено управляемыми антенными решетками (ФАР) и зеркальными антеннами нескольких разновидностей. Среди линзовых антенн из неоднородного диэлектрика со сферической симметрией уникальными свойствами обладают сферические линзы Люнеберга, названные в честь математика Рудольфа Карла Люнеберга. В своей работе "Математическая теория оптики" он показал, что линза преобразует сферический фронт волны точечного источника в плоскую синфазную волну на теневой стороне, при этом сформированный сканирующий луч не меняет форму. Это достигается за счет определенного закона объёмного изменения коэффициента преломления $n(r)$ [1, 2]. Обладая сферической симметрией, линзы Люнеберга позволяют формировать большое

число диаграмм направленности одновременно.

В реальных условиях точная реализация требуемого закона объёмного изменения коэффициента преломления $n(r)$ в линзе Люнеберга весьма сложна. Все попытки создания ЛЛ сводились к максимальному приближению реальных характеристик к идеальному закону, что достигается различными способами. Один из самых очевидных способов технической реализации линзы – это ее разбиение на сферические слои из материалов с разными диэлектрическими проницаемостями, увеличивающиеся от внешнего радиуса сферы к центру. Например, на рис. 1 вся линза от центра до поверхности разбивается на участки равной длины, и далее по закону Люнеберга высчитывается требуемая относительная диэлектрическая проницаемость каждого участка.

Однако такой способ изготовления линзы Люнеберга имеет ряд существенных недостатков - большая масса и сложная технология производства многослойных структур, отличающихся электрофизическими характеристиками слоев. Поэтому создание компактной и облегченной конструкции линзы является актуальной задачей.

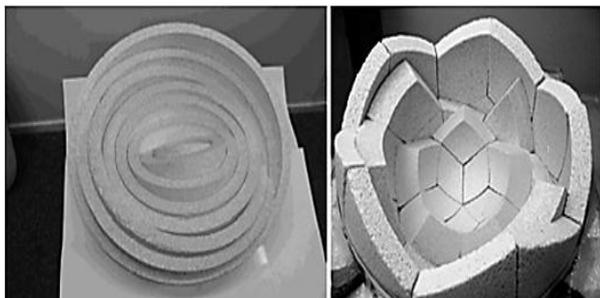


Рис. 1. Реализация линзы путем разбиения на участки равной длины

Благодаря прогрессу в области материаловедения и совершенствованию технологии производства необходимых компонентов для производства антенн, а также с появлением искусственных диэлектриков и метаматериалов, возник очередной всплеск интереса к линзе Люнеберга, о чем свидетельствует ряд публикаций о появлении различных конструкций линзы [3-7].

В данной работе рассматривается вариант реализации объемной линзы Люнеберга в частотном диапазоне 1-2 ГГц на диэлектрических дисках из тонкого (0.05 мм) стеклотекстолита FR-4, являющихся сечениями шара с напечатанной периодической решетчатой структурой в виде вертикальных проводников (на рис. 2 показан внешний вид решетчатой структуры). Такая структура поддерживает только вертикальную поляризацию [8].

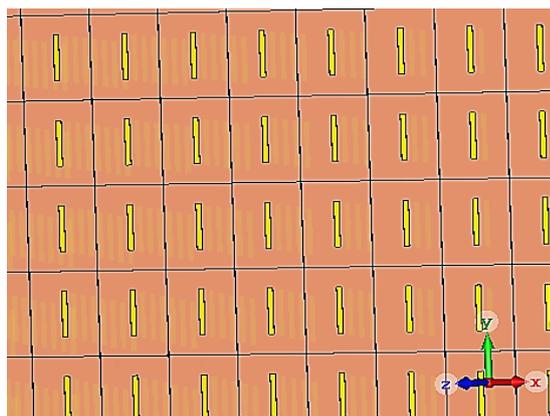


Рис. 2. Внешний вид структуры

Подобные структуры активно применяются при создании селективных поверхностей [8, 9]. Подробное описание и использование решетки из симметричных вибраторов (англ. dipole array) отображено в [8]. В [8] указано, что для избегания появления в подобных структурах побочных дифракционных макси-

мумов следует выбирать небольшой период расположения (размер с точки зрения длины волны), причем появление максимумов зависит только от периода решетки и не зависит от формы структуры. Чтобы нашу структуру можно было считать изотропной, необходимо, чтобы размер резонансных элементов был меньше одной десятой длины волны и распространение электромагнитной волны происходило вдоль оси симметрии [10]. Исходя из вышеуказанного, а также учитывая тот факт, что при частоте 1.7 ГГц длина волны составляет 17.65 см, период расположения проводников по осям x , y , z выбран 13 мм, а ширина металлической пластинки – 1 мм [11-13].

Основная идея заключается в том, что варьируя длиной металлического проводника (величиной зазора между ними), а, следовательно, изменяя параметры колебательного контура (рис. 3), можно подобрать значение $n(r)$ таким образом, что будет реализован закон изменения, необходимый для изготовления объемной линзы Люнеберга.

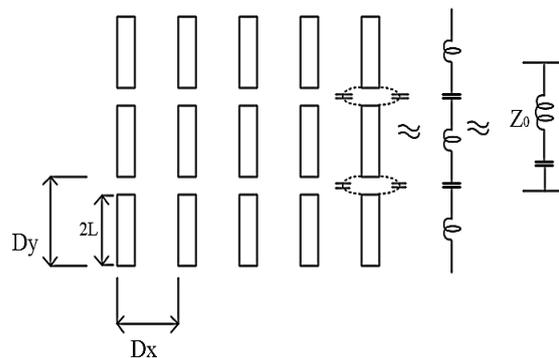


Рис. 3. Эквивалентная схема исследуемого образца

Методика измерения коэффициента преломления

Измерение коэффициента преломления производилось при помощи моделирования структуры (а в дальнейшем и самой линзы) в программном пакете CST STUDIO SUITE 2016. Для этого исследуемая структура помещается в прямоугольный волновод, возбуждаемый волной H₁₀, с размерами: длина – 195 мм, ширина – 195 мм, высота – 91 мм. Длина волновода близка к длине волны на 3 ГГц, а ширина волновода обеспечивает режим работы с волной H₁₀. На рис. 4 показан внешний вид волновода с исследуемой структурой.

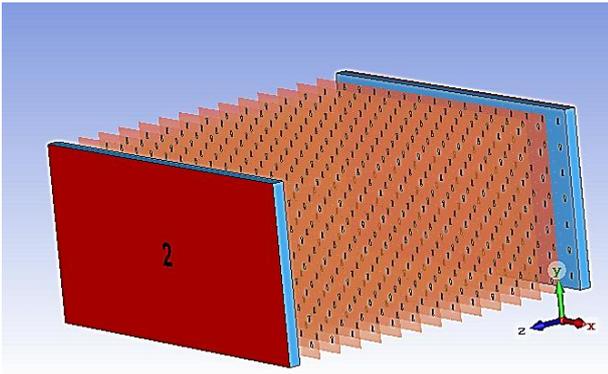


Рис. 4. Внешний вид волновода

Суть метода заключается в изменении длины металлических пластинок, нанесенных на $fr-4$, и определении для каждого из этих фазы параметра S_{21} . Поясним на конкретном примере.

Из рис.5 видно, что на частоте близкой к 1.7 ГГц фаза S_{21} обнуляется, значит, по длине волновода примерно укладывается одна длина волны.

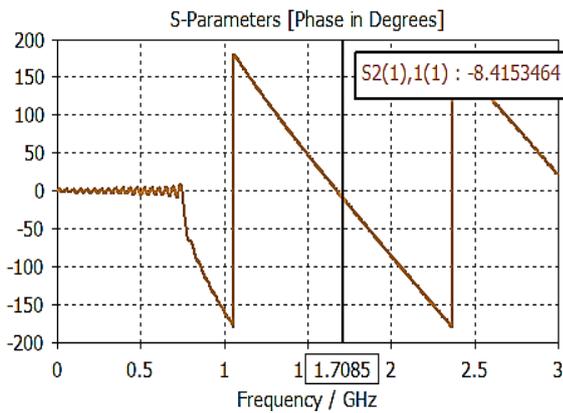


Рис. 5. Вычисленная фаза S_{21} для одной из длин металлических полосок

$$\beta \cdot L = 2 \cdot \pi + \arg(S_{21}), \quad (1)$$

$$\beta = 2 \cdot \pi / (k \cdot \lambda_B) + \arg(S_{21}), \quad (2)$$

где β – постоянная распространения, L – длина волновода, λ_B – длина волны в волноводе, k – число укладываемых длин волн по длине волновода, a – ширина волновода.

$$\lambda_B = \frac{1}{\sqrt{\epsilon - \left(\frac{\lambda}{2 \cdot a}\right)^2}}. \quad (3)$$

Подставляя (2) в (1) и выражая λ_B , а, как уже упоминалось выше, волновод можно считать заполненным однородным диэлектриком, следовательно, выразив диэлектрическую проницаемость из выражения для длины волны H_{10} для заполненного диэлектриком прямоугольного волновода (3), можно получить значение диэлектрической проницаемости, а из нее коэффициент преломления.

Таким образом, меняя величину длины полосок (зазора между ними), можно реализовать требуемый закон объёмного изменения коэффициента преломления $n(r)$ для построения объёмной линзы Люнеберга. На рис. 6 приведен полученный график зависимости коэффициента преломления от величины зазора, а также аппроксимированная зависимость (4) коэффициента преломления от величины зазора.

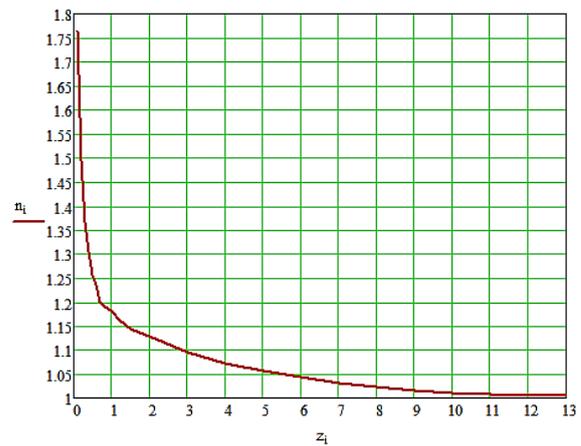


Рис. 6. График зависимости коэффициента преломления от величины зазора

$$\begin{aligned} n(z) &= 0.957867 + 0.622499 \frac{1}{z} - 0.82097 \frac{1}{z^2} \\ &+ 0.608135 \frac{1}{z^3} - 0.238754 \frac{1}{z^4} + 0.050156 \frac{1}{z^5} \\ &- 0.005235 \frac{1}{z^6} \\ &+ 0.000208 \frac{1}{z^7}. \end{aligned} \quad (4)$$

Моделирование линзы

На рис. 7 показана построенная объёмная сферическая линза радиусом 100 мм в среде CST STUDIO SUITE 2016 на основании полученной аппроксимированной зависимости (4). В качестве облучателя был выбран полуволновой вибратор с рефлектором. На рис. 8 приведены

диаграммы направленности облучателя в азимутальной плоскости.

Моделирование показало, что рабочая полоса линзы находится в пределах 1-2 ГГц по уровню боковых лепестков ниже 10 дБ. На рис. 9 приведены диаграммы направленности линзы в азимутальной плоскости.

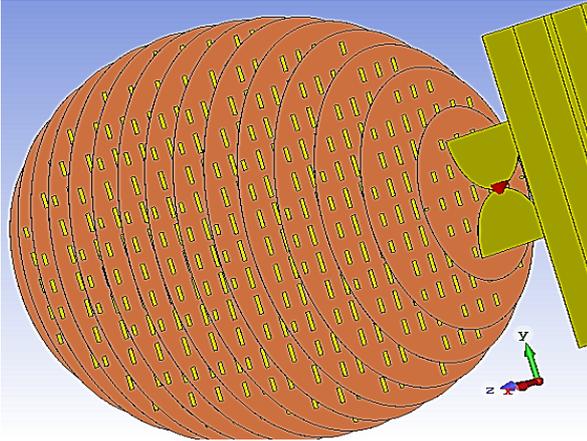


Рис. 7. Внешний вид полученной линзы с облучателем

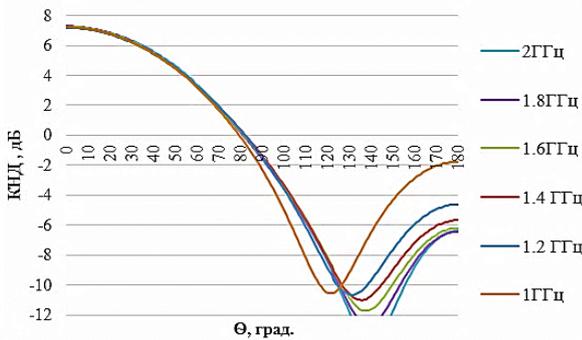


Рис. 8. Диаграммы направленности облучателя в азимутальной плоскости

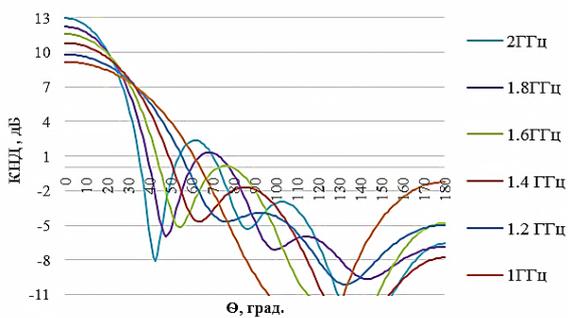


Рис. 9. Диаграммы направленности линзы в азимутальной плоскости

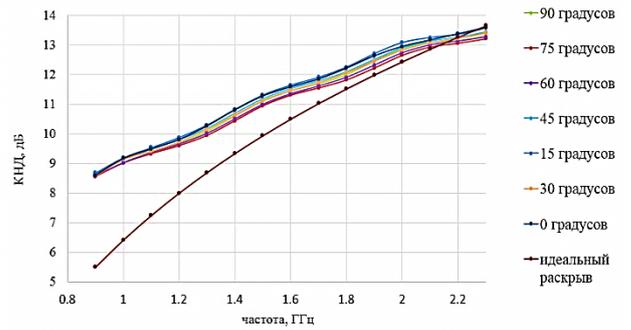


Рис. 10. Зависимость КНД от частоты при повороте облучателя в азимутальной плоскости

На рис. 10 приведен график зависимости КНД линзы от частоты при повороте облучателя относительно центра линзы в азимутальной плоскости с шагом 15 градусов.

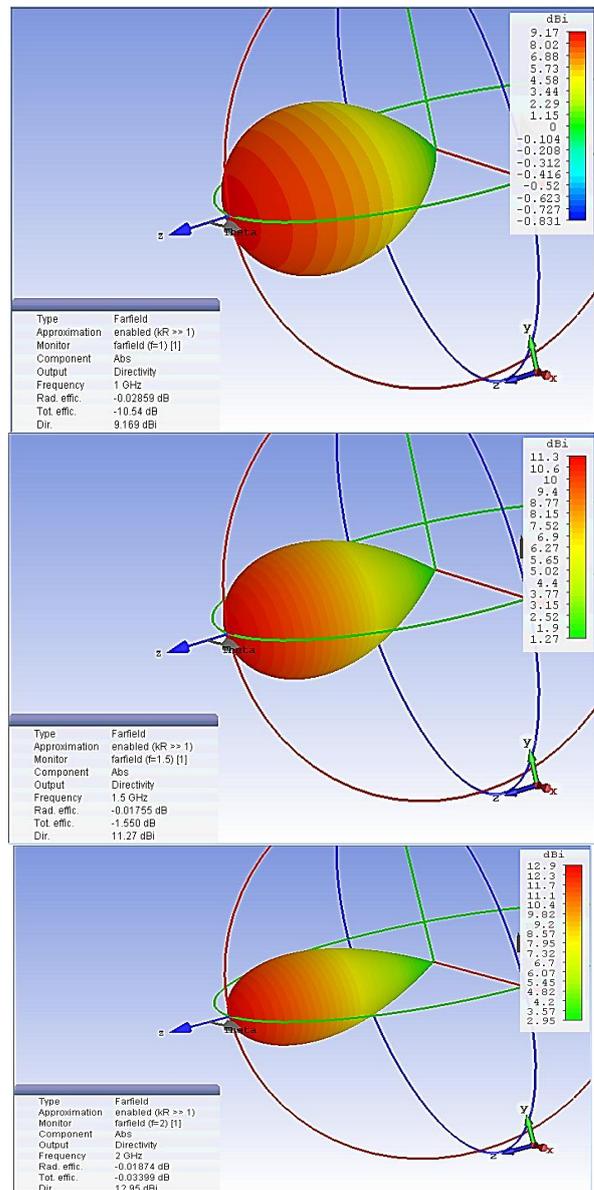


Рис. 10. Объемные диаграммы направленности линзы

Из рис. 10 видно, что КНД при разных углах поворота облучателя примерно одинаков в диапазоне частот от 1 до 2 ГГц, причем на частотах выше 2 ГГц КНД становится меньше. КНД идеального плоского круглого раскрыва диаметром 100 мм, тем самым подтверждая, что рабочий диапазон частот полученной объемной линзы Лüneберга находится в пределах от 1 до 2 ГГц.

Заключение

В настоящей статье предложена методика измерения диэлектрической проницаемости материала, а также разработана объемная линза Лüneберга, реализованная на диэлектрических дисках из тонкого стеклотекстолита FR-4 с нанесенными металлическими полосками.

Литература

1. Зелкин Е.Г., Петрова Р.А. Линзовые антенны М.: Советское радио, 1974. 280 с.
2. Luneburg R.K. Mathematical Theory of Optics. Providence, RI: Brown University Press. 1944.
3. By Hao Xin and Min Liang 3-D-Printed Microwave and THz Devices Using Polymer Jetting Techniques // Proceedings of the IEEE. 2017. Vol. 105. No 4. P. 737-755
4. Kubach A., Shoykhetbrod A., Herschel R. 3D Printed Luneburg Lens for Flexible Beam Steering at Millimeter Wave Frequencies //47th European Microwave Conference (EuMC). 2017.
5. Gitansh Gulati, Min Liang, Hao Xin A Conformal Dual-polarized All-Metal Vivaldi Array for Feeding Broad-

band Luneburg Lens // IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting. 2017.

6. Additive Manufacturing of Luneburg Lens Antennas Using Space-Filling Curves and Fused Filament Fabrication / Zachary Larimore, Sarah Jensen, Austin Good, Aric Lu, John Suarez, Mark Mirotznik // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2018. Vol. 66. No. 6. P. 2818 – 2827.

7. Broadband 3D Luneburg Lenses Based on Metamaterials of Radially Diverging Dielectric Rods / Andrey Sayanskiy, Stanislav Glybovski, Valeri Akimov, Dmitry Filonov, Pavel Belov and Igor Meshkovskiy // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2017. Vol. 16. P 1520 – 1523.

8. Benedikt A. Munk Frequency Selective Surfaces: Theory and Design, 2000. 440 p.

9. Айзенберг Г.З., Ямпольский В.Г., Терёшин О.К. Антенны ультракоротких волн. М.: Связь, 1977. Ч. 2. 288 с.

10. Caloz C. and Itoh T. Electromagnetic metamaterials: Transmission Line Theory and Microwave Applications, 2006. 352 p.

11. Пирогов А.А. Методы повышения помехозащищенности и эффективности кодирования сетей связи абонентского доступа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 1. С. 162-163.

12. Разработка радиоэлектронных модулей с использованием планарных трансформаторов на основе многослойных печатных плат методом сквозного проектирования / А.А. Пирогов, А.Б. Буслаев, А.О. Дроздов, О.Ю. Макаров // Радиотехника. 2018. № 7. С. 11-15.

13. Сравнение статистических методов испытаний надёжности РЭС / А.С. Костюков, И.С. Бобылкин, Л.Н. Никитин, А.А. Пирогов // Надёжность и качество: тр. Междунар. симпозиума. 2018. Т. 2. С. 35-37.

Поступила 05.12.2018; принята к публикации 24.01.2019

Информация об авторах

Быков Константин Александрович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: bykov.konst.al@mail.ru

Коротков Леонид Николаевич - д-р физ.-мат. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473) 246-66-47, e-mail: myfft@yandex.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: pasternakyg@mail.ru

Рогозин Руслан Евгеньевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

SPHERICAL LUNEBERG LENS ON THE BASIS OF PRINTED BOARDS WITH ELECTRICALLY SMALL DIFFUSERS

K.A. Bykov, L.N. Korotkov, Yu.G. Pasternak, R.E. Rogozin, S.M. Fyedorov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article deals with the realization of the Luneburg 3D volume lens made on dielectric disks made of FR-4 thin fiberglass with a printed periodic structure, which is an electric small diffuser. Based on the analysis of open sources, an equivalent scheme of a printed periodic structure is considered, which allows us to visually demonstrate the idea being real-

ized. This method of manufacturing the Luneberg bulk lens will significantly reduce the mass, which is an actual problem at the moment. To implement the proposed idea, the paper presents a technique for measuring the dielectric constant of a homogeneous artificial insulator based on the use of a rectangular waveguide excited by the fundamental mode of a type H wave and filled with a measured medium. This technique allowed one to synthesize the necessary law of changing the refractive index for the realization of the Luneberg bulk lens. The dependence of the refractive index on the size of the electric diffuser obtained in the course of modeling as well as its approximation is given. Directed characteristics of the obtained lens in the azimuth plane in the frequency range from 1 to 2 GHz are obtained. Conclusions are drawn about the dependence of the coefficient of the directed action of the lens on the rotation of the irradiator relative to its center in the azimuth plane

Key words: Luneberg lens, refractive index, relative permittivity, directivity factor

References

1. Zelkin E.G., Petrova R.A. "Lens antennas" ["Linzovye anteny"], Moscow, Sovetskoe radio, 1974, 280 p.
2. Luneburg R.K., "Mathematical theory of optics", Providence, RI: Brown University Press, 1944.
3. By Hao Xin, Min Liang "3D-printed microwave and THz devices using polymer jetting techniques", *Proceedings of the IEEE*, 2017, vol. 105, no 4, pp. 737-755.
4. A. Kubach A., Shoykhetbrod A., Herschel R. "3D printed Luneburg lens for flexible beam steering at millimeter wave frequencies", *47th European Microwave Conference (EuMC)*, 2017.
5. Gitansh Gulati, Min Liang, Hao Xin "A conformal dual-polarized all-metal vivaldi array for feeding broadband Luneburg lens", *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2017.
6. Larimore Z., Jensen S., Good A., Lu A., Suarez J., Mirotznik M. "additive manufacturing of Luneburg lens antennas using space-filling curves and fused filament fabrication", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2018, vol. 66, no. 6, pp. 2818-2827.
7. Sayanskiy A., Glybovski S., Akimov V., Filonov D., Belov P., Meshkovskiy I. "Broadband 3D Luneburg lenses based on met-amaterials of radially diverging dielectric rods", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2017, vol. 16, pp. 1520-1523.
8. Benedikt A. Munk "Frequency Selective Surfaces: Theory and Design", 2000, 440 p.
9. Eizenberg G.Z., Yampolsky V.G., Teryoshin O.K. "Ultra short wave antennas" ("Anteny ul'trakovotkikh voln"), Part 2, Moscow, Svyaz', 1977, 288 p.
10. Caloz C., Itoh T., "Electromagnetic metamaterials: transmission line theory and microwave applications", 2006, 352 p.
11. Pirogov A.A. "Methods to improve noise immunity and coding efficiency of subscriber access communication networks", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 1, pp. 162-163.
12. Pirogov A.A., Buslaev A.B., Drozov A.O., Makarov O.Yu. "Development of radio-electronic modules using planar transformers based on multilayer printed circuit boards using the end-to-end design method", *Radio technics (Radiotekhnika)*, 2018, no. 7, pp. 11-15.
13. Kostyukov A.S., Bobylkin I.S., Nikitin L.N., Pirogov A.A. "Comparison of statistical methods for testing the reliability of radio electronic device", *Proc. of the International Symposium Reliability and Quality (Nadezhnost' i kachestvo: tr. Mezhdunar. simpoziuma.)*, 2018, vol. 2, pp. 35-37.

Submitted 05.12.2018; revised 24.01.2019

Information about the authors

Konstantin A. Bykov, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: bykov.konst.al@mail.ru

Leonid N. Korotkov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), tel. +7 (473) 246-66-47, e-mail: myftt@yandex.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Ruslan E. Rogozin, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: ruslan-96-01-09@mail.ru

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

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.25987/VSTU.2019.15.1.012

УДК 621.9.047

ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННО-ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ ПОКРЫТИЙ НА МЕТАЛЛЫ

Е.В. Смоленцев¹, М.В. Кондратьев¹, О.Г. Меньшикова²

¹ Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия,

² Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация: рассмотрены комбинированные технологии нанесения покрытий на металлы с использованием электромагнитных полей. Рассматриваемый способ основан на сочетании тепловых воздействий за счет одновременного воздействия электроэрозионной и плазменной обработок. Это в итоге позволило уменьшить или исключить вовсе нежелательные явления, возникающие в процессе нанесения покрытий, что характерно при раздельном воздействии вышеуказанных методов обработки, а именно: ограничений по толщине напыляемого слоя, трудоемкости, износостойкости и др. На основе полученных авторами патентов на изобретения и теоретического обоснования процесса удалось создать экспериментальное оборудование, которое можно комплектовать из стандартных доступных модулей, и технологический процесс, позволяющий повысить технико-экономические показатели процессов упрочнения новых деталей или ремонта изношенных, что является актуальной задачей для многих машиностроительных предприятий России. Разработанная модель и апробация процесса экспериментально, а затем в промышленных условиях позволили сформулировать рекомендации по назначению и расчету режимов технологии комбинированного получения электроэрозионно-плазменных покрытий для процесса нанесения износостойких тонких покрытий. Проведенные авторами исследования по износостойкости покрытий, сочетающих различные металлы, углерод и окислы, подтвердили, что комбинированные покрытия позволяют во много раз повысить износостойкость деталей в узлах трения, в том числе в агрессивных средах, при более высоких контактных нагрузках, при наличии абразивных частиц, высоких температурах, характерных для резания лезвийным инструментом, где нанесение такого покрытия способно повысить стойкость на 1400 процентов

Ключевые слова: комбинированная обработка, электроэрозия, плазма, очаги схватывания, покрытия

Введение

На протяжении нескольких лет в ряде научных школ России ведутся исследования по получению покрытий с одновременным использованием электроэрозионной и плазменной обработки. Полученные результаты далеко не всегда отвечали требованиям разработчиков новой техники при изготовлении высокотехнологичной продукции машиностроения, ввиду нестабильных показателей качества поверхностного слоя, недостаточной износостойкости деталей, высокой себестоимости и трудоемкости изготовления деталей.

В Воронежском государственном техническом университете проводилась работа по созданию новых способов и основанных на них комбинированных технологических процессов при сочетании тепловых воздействий от различных видов обработки (электроэрозионной и плазменной). Это в итоге позволило уменьшить или исключить вовсе нежелательные яв-

ления, возникающие в процессе нанесения покрытий, что характерно при раздельном воздействии вышеуказанных методов обработки, а именно, ограничений по толщине напыляемого слоя, трудоемкости, износостойкости и др.

Для достижения цели, поставленной в работе, и решения задач с использованием единой базы внешних воздействий авторы разработали и исследовали модель взаимосвязи воздействий тепловых потоков в разрабатываемом комбинированном процессе, обосновали возможности совершенствования технологических процессов электроэрозионно-плазменных покрытий до показателей, закладываемых в требованиях к наукоемкой технике новых поколений. Анализ открытых источников и опыт применения комбинированных методов позволил, основываясь на существующих методологиях построения технологических процессов получения покрытий, в итоге разработать нужный механизм протекания нового запатентованного технологического процесса и провести физическое и математическое моделирование с помощью современных программных продуктов. Тем не менее, для реализации совмещения ме-

тодов обработки для определенных технических заданий проектирования комбинированных технологий необходимо доказательство особенностей одновременного воздействия на деталь с учетом достижения качества покрытий, повышения качества эксплуатационных, технологических и прочих показателей нового процесса.

Таким образом, проведенное исследование позволило расширить круг применения новых методов формообразования металлических покрытий прежде всего путем использования электроэрозионно-плазменного покрытия для разрабатываемых деталей машин, к которым предъявляются повышенные эксплуатационные требования по ресурсу работы, снижению себестоимости и трудоемкости операции покрытия, а так же износостойкости.

Обоснование проводимых исследований

Авторами был предложен и запатентован способ [1,3,4] нанесения покрытий на металлические заготовки для упрочнения режущего инструмента, деталей машин из металла и восстановления геометрии высоконагруженных изделий, преимущественно относящихся к двигателям летательных аппаратов при помощи плазмы.

На основании анализа [3] близких способов получения покрытий, в частности - ионно-плазменного напыления, при котором до нанесения покрытия заготовку нагревают, выяснилось, что к недостаткам метода можно отнести нагрев детали, который не контролируется. Это вызывает брак покрытий в форме растрескиваний, отслаиваний, прежде всего в случае покрытий с величиной коэффициента термического расширения, значительно отличающегося от того же значения материала заготовки.

Более эффективным будет способ, при котором до нанесения покрытий на начальном этапе процесса материал заготовки нагревают, а затем на него потоком плазмы наносят слой покрытия, заданного разработчиком. При этом было установлено, что нагрев детали из разных материалов реализуется в данном случае стихийно и может достичь опасной критической температуры оплавления, в результате чего невозможно наносить покрытие на деформированную потоком тепла заготовку вплоть до получения параметров, равных ширине и длине наносимого слоя в начале процесса, и не позволяет достичь требуемых показателей восста-

новления деталей. Более того, такой способ нагрева может привести к нарушению адгезии и образованию трещин на покрытии после его остывания совместно с заготовкой, при этом скорость остывания поверхности заготовки в зоне нанесения покрытия не коррелирует со скоростью охлаждения самого покрытия, что также приводит к снижению качества процесса.

С участием авторов был разработан и запатентован способ, осуществляющийся за счет того, что участок поверхности, на который будет наноситься покрытие, предварительно нагревают, при этом процесс осуществляется плазменной струей вплоть до значения температуры, при котором длина и ширина расширенного потоком тепла участка поверхности детали будут эквивалентны тем же параметрам наносимого покрытия для вышеупомянутого участка при температуре формообразования. По завершении процедуры напыления необходимого слоя напыление останавливают, измеряют температуру на поверхности покрытия и заготовки на границе напыленного слоя, после чего устраняют разницу в значениях температур за счет регулировки подачи охлаждающей среды на границу между нанесенным слоем и заготовкой до их полного остывания. Рис. 1 иллюстрирует схему реализации обработки.

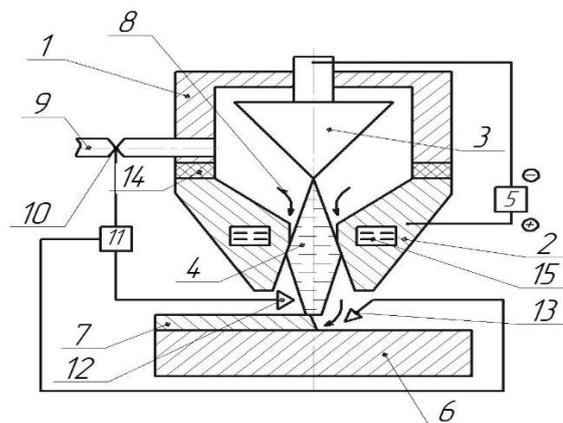


Рис. 1. Схема реализации плазменного нанесения покрытий на детали из металла 1; 2 – плазмотрон; 3 – катод; 4 – струя плазмы; 5 – источник тока; 6 – деталь; 7 – покрытие, получаемое на детали; 8 – плазмообразующий газ; 9 – трубка подачи газа; 10 – клапан; 11 – система преобразования сигнала величины нагрева; 12 – температурный датчик

Для реализации способа применяют (рис. 1) плазмотрон, включающий верхнюю и нижнюю части 1 и 2 соответственно. В верхней части 1 находится катод 3, который можно перемещать при настройке струи плазмы 4 по оси

верхней части 1. Катод 3 связан с источником тока 5, от которого идет ток на нижнюю часть 2, являющуюся анодом плазмотрона. Далее, на деталь 6 напыляется участок по поверхности покрытия 7. Описываемый процесс реализуют в среде, состоящей из плазмообразующего газа 8, подающегося в плазмотрон сквозь трубку 9 к струе плазмы 4 и к детали 6.

На следующем рис. 2 отражено изменение температуры детали (1) и покрытия (2) во время остывания при регулировании температуры.

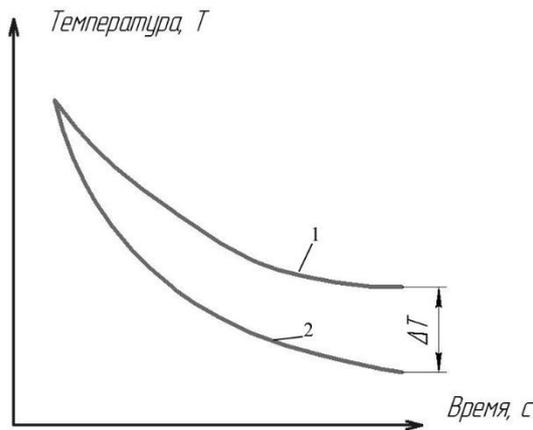


Рис. 2. Изменение температуры поверхностного слоя детали (кривая 1) и покрытия (кривая 2)

Для регулировки температуры и снижения ее перепада (рис. 2) контролируют подачу газа, для чего регулируют положение клапана 10 системой преобразования 11 сигналов величины нагрева и длительностью процесса напыления слоя наносимого покрытия 7. При этом температуру по поверхности покрытия и детали замеряют, например, безинерционным бесконтактным температурным датчиком 12. Между кривыми (рис. 2) может образовываться разница в температурах, равная ΔT .

Диэлектрическая прокладка 14 отделяет верхнюю часть 1 от нижней части 2. Для того, чтобы управлять плазменной струей 4, применяют магнитное устройство 15.

Вышеуказанный способ осуществляется следующим образом: сквозь трубку 9 (рис. 1) подается образующий плазму газ 8, а его расход контролируется клапаном 10. Как показано стрелками на рис. 1, газ поступает в зону между верхней частью 1 и нижней частью 2 плазмотрона, затем к струе плазмы 4 и потоком тепла к месту нанесения слоя покрытия 7 на деталь 6. Катод 3 устанавливают относительно нижней части 2, являющейся анодом, на расстояние, которое обеспечивает стабильность горения струи плазмы 4. С этой целью от источника то-

ка 5 на катод 3, а также нижнюю часть 2, которые разделены прокладкой 14, подается постоянный ток. Струю плазмы 4 контролируют магнитным полем от устройства 15. Температуру нагрева детали 6 до напыления слоя покрытия 7 измеряют датчиком 13, откуда сигнал поступает в систему преобразования 11.

Под воздействием струи плазмы 4 на участке напыления покрытия 7 поверхность детали 6 разогревается и под влиянием потока тепла расширяется до значения, которое имеет вдоль этого участка покрытие при температуре, при которой происходит напыление. Сигнал, свидетельствующий о достижении данной температуры от источника датчика 13, далее поступает на систему 11, от нее подается сигнал для старта процесса нанесения слоя покрытия. После нанесения заданного слоя нанесение покрытия 7 завершают, измеряют датчиком 12 значение температуры по поверхности покрытия на детали 6 и вдоль границы участка нанесенного слоя датчиком 13. Затем передают замеры в систему преобразования 11, которая сравнивает результаты измерений (рис. 1), оценивает разницу температуры ΔT , после чего на клапан 10 подается команда на снижение или увеличение потока газа 8 через трубку 9 к детали 6. Последняя без такого регулирования будет остывать медленнее, что показано на кривой 1 на рис. 2, чем покрытие (см. кривую 2). За счет возможности регулирования подачи газовой охлаждающей среды в итоге происходит остывание, устраняется разница температур ΔT и размеры покрытия становятся равными габаритам напыляемого участка поверхности заготовки до остывания ее и самого покрытия 7. За счет этого устраняются, главным образом, температурные напряжения в покрытии, вызывающие трещинообразование, а также отслаивание покрытия 7.

Практическая реализация способа

Реализация способа была рассмотрена на примере снижения трения рабочей поверхности и повышения режущих свойств спирального сверла из стали У10А диаметром 3мм ионно-плазменным напылением на установке ФПУ-114. Для этого в среде плазмообразующего газа (аргона) наносили слой, состоящий из оксида кремния толщиной 6-10 мкм. Нагревали поверхность сверла до температуры 3500 К, после чего на участок наносили необходимый слой покрытия, охлаждавшийся потоком аргона по-

сле прохождения места нанесения плазменной струей. Охлаждение проводили до температуры меньше фазовых превращений материалов детали и покрытия. По завершении остывания покрытия при его увеличении в 500 раз микротрещины обнаружены не были. Также после испытания на излом не выявлено отслаивания покрытия от поверхности детали.

В ходе дальнейших исследований под комбинированную обработку была модернизирована установка для чистового плазменного упрочнения модели ФПУ-114 (рис. 3).



Рис. 3. Установка ФПУ-114

Вышеуказанное оборудование предназначено для формообразования плазменным способом стойких к износу псевдоалмазных покрытий с толщинами на наноуровне при величине давления равному атмосферному. Итогом прохождения химических реакций реагентов и плазмы, подающихся через плазмотрон, является высококачественное износостойкое покрытие.

Данное оборудование хорошо себя зарекомендовало для процессов упрочнения при изготовлении штамповой оснастки, металлорежущего инструмента, пресс-форм, подшипников, фильер, ножей и прочих деталей, значительно повышая их эксплуатационные свойства. За счет изменений физических и механических свойств слоя поверхности, в том числе - снижения трения, устранения микродефектов, увеличения микротвердости, создания пленки, придающей стойкость к коррозии и создающей диэлектрический эффект, придания химической эрнертности покрытиям создается эффект, востребованный в промышленности.

В процессе модернизации установка была дооснащена оборудованием, позволяющим

наносить покрытия электроэрозионным способом ENPO (рис. 4).



Рис. 4. Оборудование для нанесения покрытий электроэрозионным способом ENPO

В данном приборе (рис. 4) нанесение электроэрозионного покрытия происходит за счет дискретных искровых разрядов в специальной газовой среде и при регулярном контакте электрода-инструмента с деталью, при этом осуществляется перенос и осаждение материала электрода на обрабатываемую поверхность заготовки.

На рис. 5 приведена разработанная одним из авторов экспериментальная установка, которая использовалась для реализации комбинированного покрытия применительно к деталям - телам вращения.



Рис. 5. Разработанная экспериментальная установка для нанесения покрытий

Проведенные практические и теоретические исследования по комбинированному нанесению покрытий дали возможность разработать типовую технологию для внедрения способа на производстве.

Проектирование технологического процесса комбинированного нанесения покрытий

Исходные данные для проектирования технологического процесса комбинированного электроэрозионно-плазменного нанесения покрытий включают в себя: чертеж детали с покрытием, с указанием места его расположения, требования к покрытию, имеющиеся материальная и научная базы для получения качественной детали. При этом могут быть два варианта применения данного технологического процесса:

- 1) для достижения износостойкой рабочей поверхности деталей в узлах трения;
- 2) для восстановления исходных размеров изношенных поверхностей с одновременным повышением их твердости.

Таким образом, исходные данные включают: требования по качеству поверхностного слоя обработанной заготовки, позволяющие достичь необходимых свойств изделия; проработку специфических свойств материала, из которого изготовлена деталь (удельная теплоемкость, температура плавления), и покрытий (температура плавления, жидкотекучесть и др.); состояние поверхности под покрытие для оценки возможности нанесения покрытий с применением электромагнитных полей. При этом необходимо провести анализ возможности реализации граничных условий [5]:

-обеспечение шероховатости получаемого покрытия требованиям, указанным на чертеже детали;

- позволяет ли температура плавления материала детали выполнить нанесение покрытия;
- обеспечивают ли предельные размеры формируемого покрытия условия технического задания для полного восстановления рабочих параметров детали.

На начальном этапе разработчик должен выбрать альтернативы реализации комбинации разных видов покрытий в одной обработке и провести обоснование выбора наносимых материалов для обеспечения эксплуатационных свойств изделий.

Здесь же необходимо выполнить технологический анализ нескольких вариантов нанесения покрытия и обосновать применение оптимального вида. Для этого варианта надо выполнить отработку на технологичность детали, после чего на базе проведенных ранее теоретических исследований подобрать технологические режимы, отражающие специфику вы-

шеуказанного способа [3,4]. Может оказаться так, что заданные конструктором эксплуатационные требования обуславливают необходимость создания новых комбинированных способов получения покрытий с иными свойствами. Это потребует дополнительного времени на исследования и приведет к пересмотру требований к изделию и корректировке их до существующего на данный момент уровня технологических показателей.

На этом же этапе рассчитывают и выбирают технологические режимы, допустимые для обоих составляющих комбинированного процесса нанесения покрытия. Разработанные модель и механизмы процессов, происходящих при комбинированном электроэрозионно-плазменном покрытии изделий, позволили создать методику проектирования технологии перспективных наукоемких изделий и реализовать их через инновационные способы обработки, с кратным увеличением их эксплуатационных характеристик и, прежде всего, износостойкости. При использовании данной технологии сокращается период освоения в производстве новых изделий, их себестоимость за счет сокращения в 2-3 раза числа трудоемких операций.

Выводы

В ходе проведенных работ было установлено, что процесс комбинированного электроэрозионно-плазменного нанесения покрытия при управляемом тепловом воздействии на основу и наносимый слой обеспечивает достижение требуемого для финишной обработки качества слоя поверхности без снижения толщины, что бывает при использовании промежуточной механической обработки. Это позволило создать технологический процесс, в котором формирование покрытий может быть реализовано в одной технологической операции без нарушения поверхностных высокопрочных слоев, получаемых за счет упрочнения потоком плазмы.

Также был разработан механизм комбинированного нанесения покрытия по защищенному патентом способу, что позволило создать механизмы расчета технологических режимов электроэрозионно-плазменного метода и спроектировать технологические процессы.

Разработанная модель и апробация процесса экспериментально, а затем в промышленных условиях позволила сформулировать рекомендации по назначению и расчету режимов технологии комбинированного получения элект-

троэрозионно-плазменных покрытий для процесса нанесения износостойких тонких покрытий (в скобках – в случае упрочнении деталей при восстановлении геометрии). Параметры процесса показаны в табл. 1.

Таблица 1

Параметр, Размерность	Значение
Электроэрозионная составляющая	
энергия импульса, Дж	0,1...1,0 (3...4)
напряжение на электродах, В	60...80 (100...200)
сила тока, А	1...3 (5...15)
емкость конденсатора, мкФ	0,1...0,5 (0,5...2,0)
длительность импульса, мкс	0,2...1,0 (2...20)
предельное количество слов	Не более 5
скорость перемещения электрода, мм/с	0,5...1,0 (0,2...0,5)
Плазменная составляющая	
Режим подачи плазмообразующего газа, л/мин	2...3
Напряжение, В	100...120
Режим подачи транспортирующего газа, л/мин	0,7...1,0
плотность тока, А/мм ²	100...200
частота сканирования луча, Гц	100...120 (50...60)
смещение луча относительно электрода	на величину 2-3 размеров диаметра капли от электроэрозионного покрытия
расстояние от среза сопла до покрытия, мм	11...12

Кроме того, проведенные экспериментальные и теоретические исследования достигнутого покрытия позволили выработать рекомендации по оценке экономически рациональных и обоснованных возможностей нового комбинированного процесса (табл. 2).

Таблица 2

Параметр, размерность	Значение
- толщина покрытия, мм	до 0,6
-микротвердость покрытия, МПа:	
на базе железа	до 20000
на базе хрома, чугуна, титана	до 8500
шероховатость получаемого покрытия по Ra для титана, стали, мкм	1...2,5 (2...5)
из чугуна, мкм	1...1,5 (1,5...5,0)
сплошность слоя, %	85...90 (75...85) ± 5

Проведенные авторами исследования по износостойкости покрытий, сочетающих различные металлы, углерод и окислы, подтвердили, что комбинированные покрытия позволяют во много раз повысить износостойкость деталей в узлах трения, в том числе в агрессивных средах, при более высоких контактных нагрузках, при наличии абразивных частиц, высоких температурах, характерных для резания лезвийным инструментом, где нанесение такого покрытия способно повысить стойкость на 1400 процентов.

Проведенные исследования позволили сформулировать перспективы дальнейших научных исследований по направлению создания инновационных технологий получения комбинированных электроэрозионно-плазменных покрытий, что дало возможность сформировать область оптимального применения разработанных методов и в несколько раз расширить их круг применения в машиностроении. Доказательством этому служат полученные акты внедрения в производство с достижением существенного экономического эффекта и включения результатов работы в учебные программы дисциплин по комбинированным методам обработки с наложением электромагнитных полей.

Литература

1. Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В., Смоленцев В.П. Механизм и процессы комбинированного нанесения покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 90-97.
2. Кондратьев М.В., Смоленцев Е.В., Смоленцев В.П. Процесс эрозионно-лучевого плазменного нанесения износостойких покрытий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 3. С. 107-115.
3. Патент 2343049 (РФ) Способ получения многослойного покрытия на восстанавливаемой стальной или чугунной детали / В.П. Смоленцев, А.В. Бондарь, А.Н. Некрасов, А.М. Гренькова, Е.В. Смоленцев, А.В. Лукин // Заявка 2006140558 от 10.01.2006. Оpub 16.01.2009 Бюл. изобр. № 1.
4. Патент 2619410 С23С 4/02 (РФ) Способ плазменного напыления покрытий / В.П. Смоленцев, Е.В. Смоленцев, С.В. Сафонов, М.В. Кондратьев, Е.В. Бобров // Заявлено 20.01.2015. Заявка 2015101658. Бюл. изобр. от 15.05.2017 №. 14.
5. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.

Информация об авторах

Смоленцев Евгений Владиславович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Кондратьев Михаил Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: 540520@mail.ru

Меньшикова Ольга Геннадьевна - канд. хим. наук, доцент, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50-лет Октября, 94), e-mail: menchikovaog@yandex.ru

**FEATURES OF TECHNOLOGY DEVELOPMENT OF ELECTRO-ERODE-PLASMA
APPLICATION OF METAL COATINGS**

E.V. Smolentsev¹, M.V. Kondrat'ev¹, O.G. Men'shikova²

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²South-West State University, Kursk, Russia

Abstract: the article discusses the combined technology of applying coatings on metals using electromagnetic fields. The considered method is based on a combination of thermal effects due to the simultaneous effects of electroerosive and plasma treatments. On the basis of patents for inventions obtained by the authors and theoretical substantiation of the process, it was possible to create equipment and technological process, which allows one to improve the technical and economic indicators of the processes of hardening new parts or repairing worn out ones, which is a current task for many engineering enterprises in Russia. The developed model and testing of the process experimentally, and then in industrial conditions allowed one to develop recommendations for the purpose and calculation of the technology modes of combined production of electroerosion - plasma coatings for the process of applying wear-resistant thin coatings. The authors' studies on the wear resistance of coatings that combine different metals, carbon and oxides confirmed that the combined coatings can many times increase the wear resistance of parts in friction units, including in corrosive environments, at higher contact loads, in the presence of abrasive particles, high temperatures, typical for cutting with a blade tool, where the application of such a coating can increase the resistance by 1400 percent

Key words: combined treatment, EDM, plasma, setting, coating

References

1. Kondrat'ev M.V., Smolentsev E.V., Smolentsev V.P. "Mechanism and processes of combined coating" ("Mekhanizm i protsessy kombinirovannogo nanoseniya pokrytiy"), *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 90-97.
2. Kondrat'ev M.V., Smolentsev E.V., Smolentsev V.P. "Process of erosion-beam plasma deposition of wear-resistant coatings ("Protsess erozionno-luchevogo plazmennogo nanoseniya iznosostoykikh pokrytiy"), *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 3, pp. 107-115.
3. Smolentsev V.P., Bondar' A.V., Nekrasov A.N., Gren'kova A.M., Smolentsev E.V., Lukin A.V. Patent for invention (Russian Federation) no. 2343049 "The method of obtaining a multilayer coating on the recovered steel or cast iron parts" ("Sposob polucheniya mnogosloynnogo pokrytiya na vosstanavlivayemoy stal'noy ili chugunnoy detali").
4. Smolentsev V.P., Smolentsev E.V., Safonov S.V., Kondratiev M.V., Bobrov E.V. Patent for invention (Russian Federation) no. 2619410 "The method of plasma spraying coatings" ("Sposob plazmennogo napylenii pokrytiy").
5. Smolentsev E.V. "Design of electrical and combined processing methods" ("Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki"), Moscow, Mashinostroenie, 2005, 511 p.

Submitted 29.10.2018; revised 25.01.2019

Information about the authors

Evgeniy V. Smolentsev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Mikhail V. Kondrat'ev, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: 540520@mail.ru

Ol'ga G. Men'shikova, Cand. Sc. (Chemistry), Assistant Professor, South-West State University (94 50-Let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: menchikovaog@yandex.ru

ТЕХНОЛОГИЯ КОМБИНИРОВАННОЙ ОБРАБОТКИ РАБОЧЕГО КАНАЛА В ВЫСОКОРЕСУРСНЫХ ФОРСУНКАХ ИЗ МИНЕРАЛОКЕРАМИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

С.В. Сафонов, Е.А. Салтанаева, О.В. Скрыгин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена технология изготовления рабочих каналов в форсунках для подачи топлива из минералокерамических материалов. Показано, что использование комбинированных методов обработки позволяет создавать новые виды технологичных форсунок с проточной частью, в которой реализуются ранее не достижимые требования конструкторов при проектировании высокоресурсных форсунок. Достигается высокая производственная технологичность, где путем использования совместного воздействия анодного растворения металлической вставки и импульсов ультразвукового луча в комбинированном технологическом процессе обеспечивается требуемый массовый при формировании сопла с геометрией, отвечающей эксплуатационным требованиям к современным энергетическим машинам. Приведены результаты испытаний форсунок на стандартных и специальных установках. Показано, что разработанный комбинированный процесс изготовления каналов в соплах стабильно обеспечивает заданные эксплуатационные требования к показателям качества проточной части сопла по точности и качеству поверхностного слоя. При этом применение минералокерамических форсунок обеспечивает стабильность горения топлив в пределах $\pm 5\%$, а ресурс форсунок возрастает в 2-3 раза, что полностью компенсирует дополнительные расходы на изготовление каналов, а за счет снижения эксплуатационных затрат достигается большой экономический эффект особенно в системе энергоснабжения

Ключевые слова: форсунка, минералокерамика, комбинированные методы обработки, теплостойкость, технология изготовления каналов

Введение

В агрегатах подачи рабочих горючих смесей энергетических машин (двигателей летательных аппаратов, агрегатах тепловых электрических станций) основную роль в повышении их экономичности и ресурса имеют форсунки, работающие при высоких температурах и давлениях, превышающих 20 МПа. В применяемых в настоящее время форсунках используют, как правило, металлические сопла с каналами круглого сечения, которые имеют ограниченный ресурс и в процессе эксплуатации утрачивают характеристики, первоначально заложенные в их конструкцию. Принципиально новым подходом к созданию энергосберегающих высокоресурсных энергетических систем может явиться использование для горячей части форсунок жаростойких керамик, применяемых в авиакосмической отрасли. Однако технология изготовления из них деталей достаточно сложна, слабо освоена в промышленности и требует больших затрат материальных и трудовых ресурсов. Такие технологии допустимы при производстве тепловых двигателей транспортных средств, выпускаемых в единичных количествах (например, в ракетных двигателях), но не приемлемы для серийного производства энергетических машин. Здесь требуется создание новых технологических процес-

сов для получения каналов в проточной части форсунок из керамических материалов, трудно поддающихся механической обработке, но обладающих высокими эксплуатационными характеристиками, повышающими качество энергетических систем до мирового уровня. Это является одним из магистральных направлений развития технологии комбинированных методов обработки. С этой целью при участии авторов разработаны новые способы обработки для изготовления каналов требуемого профиля в минералокерамиках, защищенные охранными документами [1], [2].

Анализ технологичности типовых конструкций форсунок

Отработку технологичности выполняют на этапах проектирования, изготовления и эксплуатации изделий. Применительно к форсункам из керамических материалов каналы могут иметь не только круглое сечение, но и переменный профиль по длине и сечению канала. Диаметр проходного сечения может изменяться от десятых долей до нескольких миллиметров. Для улучшения распыла и эффективности сжигания рабочей смеси площади сечения каждого канала могут изменять за счет изменения профиля или увеличения числа отверстий, переходя от относительно простых конструкций к достаточно сложным в изготовлении многоструйным форсункам.

На рис. 1 приведены типовые конструкции минералокерамических форсунок для подачи горючих смесей. Они могут работать в условиях больших перепадов давления, температур, воздействия химически активных газообразных жидких и твердых веществ. Геометрия каналов в минералокерамических форсунках близка к той, которая применяется для металлических изделий.

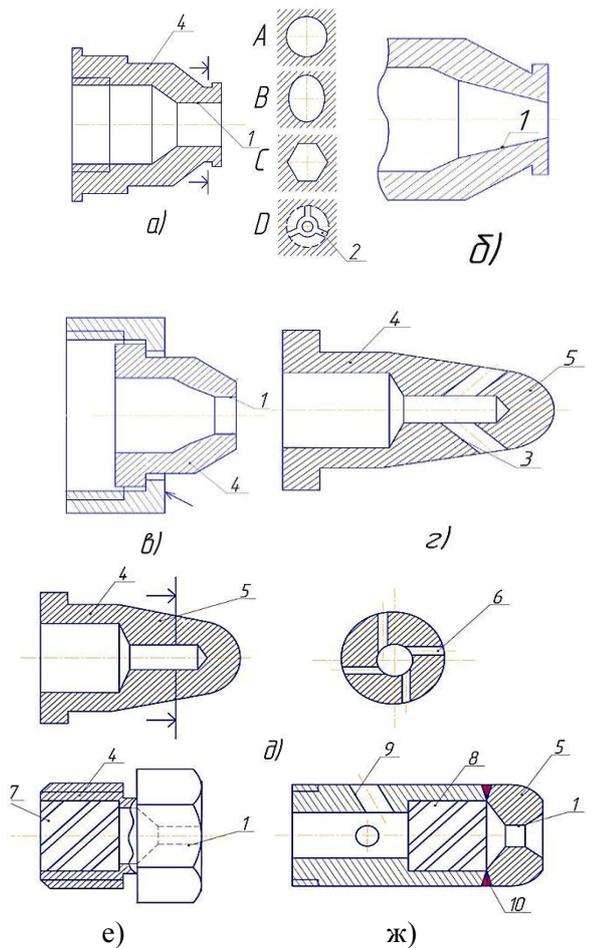


Рис. 1. Форсунки для подачи горючих смесей:
 а) цельная осевая струйная: 1 – канал сопла постоянного по длине сечения; 2 – перемычки внутри канала; 3 – место крепления форсунки при монтаже; 4 – корпус из минералокерамики. Сечения канала сопла: А – круглое; В – эллиптическое; С – многогранное; Д – с рассекателями потока (перемычками);
 б) осевая одноструйная цельная с каналом сопла (1) переменного сечения; в) сборная одноструйная разъемная;
 г) цельная многоструйная с однорядными цилиндрическими радиальными отверстиями (3) в корпусе 4 с обтекателем 5; д) цельная центробежная с тангенциальными цилиндрическими каналами 1; е) центробежная со шнековым смесителем компонентов 7;
 ж) сборная осевая одноструйная сборная неразъемная многокомпонентная со шнековым смесителем 8; 1 – канал сопла; 5 – керамический обтекатель корпуса; 9 – каналы в керамическом корпусе для подачи второго компонента горючей смеси; 10 – место соединения обтекателя 5 с корпусом форсунки

Форсунки, приведенные на рис. 1, могут иметь одно (а, б, в, е) или несколько (г, д, ж) каналов сопел. Для повышения производственной технологичности в большинстве случаев отверстия выполняют круглыми. Однако это не всегда обеспечивает выполнение эксплуатационной технологичности. С разработкой комбинированных методов обработки удалось значительно расширить технологические возможности изготовления каналов, в том числе в керамических форсунках. Появились (рис. 1, а) отверстия с некруглой формой сечения (овальной, эллипсной, многогранной).

Для улучшения эксплуатационных характеристик форсунок (распыла струи) изменяют сечение канала сопла по длине, делая его конфузурным (рис. 1, б) диффузорным или другого переменного сечения (рис. 2).

Это может значительно усложнить обработку канала, особенно в керамической форсунке, но с созданием новых способов комбинированной обработки [1], [2] появилась возможность выполнять каналы с произвольным сечением и геометрией оси (прямолинейные, изогнутые, спиральные и др.).

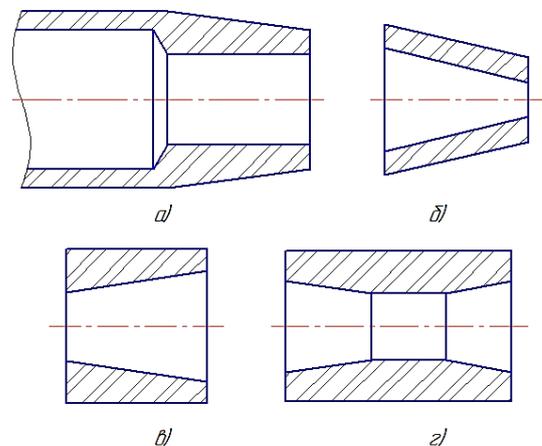


Рис. 2. Типовые сечения каналов в соплах форсунок:
 а – постоянного сечения; б, в – переменного (конфузор, диффузор) сечения; г – сопло Лаваля

Форсунки работают в условиях высоких температур, их ресурс, даже при использовании минералокерамики, ограничен. Поэтому обычно их рабочую часть (как правило из керамики) делают съемной (рис. 1, в, е) и устанавливают таким образом, чтобы можно было быстро заменить.

Многоструйные форсунки (рис. 1, г, д) расширяют эксплуатационные возможности изделий по расходу, распылу, но усложняют обработку каналов, особенно в керамических

форсунок.

Для закрутки потока горючей смеси и смешивания компонентов в форсунках (рис. 1, е, ж) используют шнековые металлические и неметаллические смесители с постоянным и переменным шагом канавок.

При отработке технологичности следует учитывать, что трудоемкость обработки керамических деталей значительно выше, чем металлических, поэтому ограничивают область применения керамики горячей зоной форсунки, выполняя смежные элементы из металла (рис. 3).

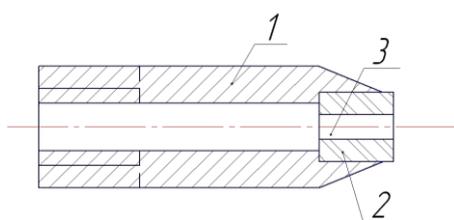


Рис. 3. Конструкция форсунки с минералокерамической втулкой: 1 – корпус форсунки из нержавеющей стали; 2 – минералокерамическая втулка; 3 – канал сопла для подачи горючей смеси

На рис. 3 показана форсунка, где корпус 1 выполнен из жаропрочного материала, а втулка 2 выполнена прессованием из порошка с каналом 3, имеющим форму сопла.

Форсунки, приведенные на рис. 1, учитывают выполнение эксплуатационных требований при использовании в тепловых двигателях и, как правило, прошли этап отработки технологичности у заказчика продукции. Реализация этих требований должна быть выполнена в процессе проектирования форсунок и отработки технологичности их конструкции, которая представлена на рис. 1. На этапе отработки осуществляется воплощение замыслов конструкторов, которые должны дать ответ на вопросы: возможно ли в принципе изготовить заданные изделия с требуемыми эксплуатационными характеристиками, имеются ли для этого эффективные способы и устройства, материальная, научная база и производственный персонал, имеются ли варианты повышения технико-экономических показателей изготовления предлагаемых конструкций. В процессе производственной отработки конструкции технологи могут опираться на достигнутый уровень совершенствования технологии или опираться на перспективные научные разработки, часть которых находится на стадии создания изобретений или экспериментальных работ.

Если для использования новых технологических приемов требуется изменение конструкции изделий, то необходимо согласование предложений технологов с конструкторами (а в ряде случаев и с заказчиками). Результатом отработки технологичности является уточнение сроков запуска в производство и затрат на технологическую подготовку производства нового изделия.

Технологические процессы, применяемые при изготовлении керамических форсунок

Для металлических деталей сборных форсунок применяют традиционные методы обработки металлическим и абразивным инструментом. Для доступных участков керамических деталей также используют металлорежущий инструмент, преимущественно из алмазного и других сверхтвердых материалов.

Проблема обработки каналов в соплах минералокерамических форсунок была решена после создания комбинированных методов обработки [патенты 1, 2] и проведения исследований в области технологии комбинированных [3, 4] и ультразвуковых [3, 5] методов обработки.

На рис. 4 приведена схема разработанного с участием авторов метода комбинированной обработки каналов в сопле путем удаления из минералокерамической втулки 6 (рис. 3), заложенной в нее перед прессованием металлической вставки 7, профиль которой отвечает требованиям заказчика и конструктора изделия. Это должно быть согласовано с технологами на стадии отработки технологичности запускаемого в производство нового изделия. С учетом технологических возможностей предложенных комбинированных способов обработки геометрия каналов может иметь любой профиль, а оси отверстий быть прямыми или криволинейными, в том числе при сочетании по длине нескольких участков, что ранее считалось неосуществимым.

На рис. 4 показана схема получения канала сопла в минералокерамической втулке 6. Профиль канала может быть задан конструктором исходя из эксплуатационных требований к форсунке и, прежде всего, к ее ресурсу и экономичности. Канал может быть круглым, овальным, крестообразным, цилиндрическим, коническим и другим (часть таких сечений приведена на рис. 2). Это традиционными методами получают на наружной поверхности металлической вставки 7, которая устанавливается во втулку 6 до начала прессования порошка и сохраняется

при прессовании и спекании. Один из концов вставки 7 выходит за пределы втулки 6 и служит для подвода тока от генератора 8 (низковольтного источника постоянного тока), обеспечивающего анодное растворение вставки 7 со стороны электрода-инструмента 4. Процесс протекает в среде электролита 9, который может прокачиваться через зазор между вставкой 7 и электродом-инструментом 4. Излучатель 3 (инструмент) удален от втулки 6 зазор между излучателем 3 и катодом 4 возрастает по мере анодного растворения вставки 7, поэтому расстояние между излучателем 3 и торцом вставки 7 возрастает на длину вставки во втулке. Продукты обработки заполняют обработанную часть канала во втулке, массовыйнос прекращается и процесс обработки затухает. Катод 4 имеет вращательное движение (рис. 5) и в момент совпадения осей отверстия 5 и вставки 7 ультразвуковой луч поступает в отверстие втулки 6, вызывает на поверхности обработки вставки активную кавитацию жидкой среды и мощный выброс из отверстия во вставку 6 продуктов обработки. Это восстанавливает массовыйнос и открывает возможность удаления вставки за счет ее анодного растворения.

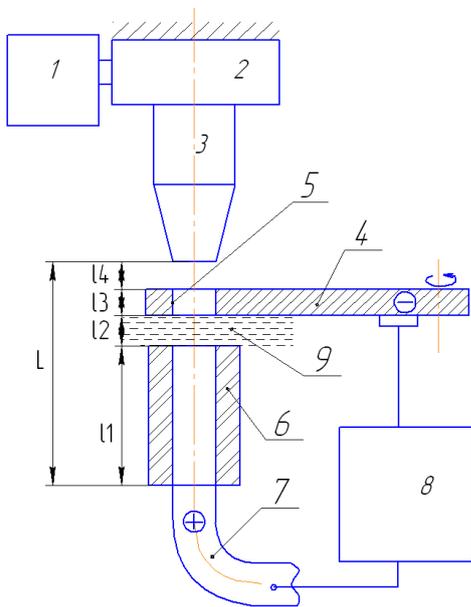


Рис. 4. Схема комбинированного удаления вставки из минералокерамической втулки:

- 1 – ультразвуковой генератор; 2 – преобразователь;
- 3 – излучатель; 4 – катод; 5 – отверстие для прохождения ультразвукового луча; 6 – минералокерамическая втулка;
- 7 – металлическая вставка; 8 – генератор тока для электрохимической обработки; 9 – электролит;
- 10-14 – участки системы, определяющие межэлектродный зазор

Показатели использования керамических форсунок

Применение керамических форсунок в агрегатах двигателей и энергетических установках [6] показало, что разработанный комбинированный процесс изготовления каналов в соплах стабильно обеспечивает заданные эксплуатационные требования к показателям качества проточной части сопла (точность не ниже 2-5 квалитета, шероховатость Ra 1,25-0,63 мкм). Для сборных форсунок допускается погрешность не более 0,03 мм. Применение минералокерамических форсунок обеспечивает стабильность горения топлив в пределах $\pm 5\%$. При этом ресурс форсунок возрастает в 2-3 раза, что полностью компенсирует дополнительные расходы на изготовление каналов, а за счет снижения эксплуатационных затрат достигается большой экономический эффект особенно в системе энергоснабжения.

Заключение

1. Разработанные способы и устройства для комбинированной обработки каналов сопел керамических форсунок решили принципиально значимую проблему эффективного использования перспективных материалов с высокой жаростойкостью и обеспечили повышение ресурса тепловых агрегатов, работающих на жидком топливе.

2. Технология комбинированного изготовления форсунок с проточной частью из минералокерамических материалов позволяет повысить технические характеристики тепловых агрегатов энергетических систем за счет резкого повышения теплонагрузки на форсунки, что улучшает теплоотдачу топлива и показатели тепловых агрегатов.

3. Достоинством предлагаемой технологии обработки проточной части форсунок из минералокерамических материалов является возможность использования для их изготовления выпускаемых промышленностью технических средств, что ускоряет систему подготовки производства и способствует быстрейшему освоению конкурентоспособной энергетической продукции.

Литература

1. А.С. № 1299719 (СССР) Способ электрохимической обработки металлических покрытий на диэлектриках / В.П. Смоленцев и др. Бюл. изобр. № 12, 1987.
2. Пат. 2216437 Российская Федерация Способ электрохимической обработки / Смоленцев В.П., Газизуллин К.М. Бюл. изобр. № 32, 2003.

3. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов; под ред. В.П. Смоленцева. М.: Высш. шк, 1983. Т. 1. 247 с.

4. Смоленцев Е.В. Проектирование электрических и комбинированных методов обработки. М.: Машиностроение, 2005. 511 с.

5. Приходько В.М. Ультразвуковая технология в

машиностроении // Научные технологии в машиностроении; под ред. А.Г. Сулова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.

6. Салтанаева Е.А., Газизуллин К.М. Изготовление отверстий в керамических форсунках системы подачи топлива энергетических установок // Проблемы энергетики. 2013. № 11-12. С. 68-76.

Поступила 03.12.2018; принята к публикации 04.02.2019

Информация об авторах

Сафонов Сергей Владимирович – д-р техн. наук, доцент, первый проректор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89192463474

Салтанаева Елена Андреевна – соискатель кафедры автоматизированного оборудования машиностроительных производств, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89033076378

Скрягин Олег Викторович – аспирант кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89601370222

TECHNOLOGY OF COMBINED PROCESSING OF THE WORKING CHANNEL IN HIGH-RESOURCE NOZZLES FROM MINERAL CERAMIC MATERIALS

S.V. Safonov, E.A. Saltanaeva, O.V. Skrygin

Voronezh State Technical University, Russia

Abstract: the paper considers the technology of manufacturing working channels in the nozzles for fuel supply from mineral ceramic materials. It is shown that the use of combined processing methods allows one to create new types of technologically advanced injectors with a flow part in which previously unattainable requirements of designers were implemented when designing high-resource injectors. High production manufacturability is achieved, where by using the combined effect of anodic dissolution of the metal insert and ultrasonic beam pulses in the combined process, the required mass transfer is achieved when the nozzle is formed with a geometry that meets the operational requirements for modern energy machines. The results of testing nozzles on standard and special installations are given. It is shown that the developed combined process of manufacturing channels in the nozzles stably ensures the specified operational requirements for the quality indicators of the nozzle flow part in terms of accuracy and quality of the surface layer. At the same time, the use of mineral ceramic nozzles ensures the stability of fuel combustion within $\pm 5\%$, and the nozzle life increases by 2-3 times, which fully compensates for the additional costs of manufacturing channels, and by reducing operating costs, a large economic effect is achieved, especially in the system power supply

Key words: nozzle, mineral ceramics, combined methods of processing, heat resistance, channel manufacturing technology

References

1. Smolentsev V.P. et al. A.C. #1299719 (USSR) "The method of electrochemical processing of metal insulator coatings" ("Sposob elektrokhimicheskoy obrabotki metallicheskikh pokrytiy na dielektrikakh"), *The Bulletin of Inventions (Byul. izobr.)*, 1987, no. 12.

2. Smolentsev V.P., Gazizullin K.M. Patent 2216437 (RF) "Method of electrochemical processing" ("Sposob elektrokhimicheskoy obrabotki"), *The Bulletin of Inventions (Byul. izobr.)*, 2003, no. 32.

3. Ed. Smolentsev V.P. "Electrophysical and electrochemical methods of processing materials" ("Elektrofizicheskie i elektrokhimicheskie metody obrabotki materialov"), Moscow, Vysshaya Shkola, 1983, 247 p.

4. Smolentsev V.P. "Design of electric and combined processing methods" ("Proektirovanie elektricheskikh i kombinirovannykh metodov obrabotki"), Moscow, Mashinostroenie, 2005, 511 p.

5. Prihod'ko V.M. "Ultrasonic technology in machine construction", in the book "Science-based technologies in machine construction" ("Naukoyemkie tekhnologii v mashino-stroyenii"), ed. A.G.Suslov, Moscow, Mashinostroenie, 2012, 528 p.

6. Saltanaeva E.A., Gazizullin K.M. "Manufacturing holes in ceramic nozzles of the fuel-supplying system of power installations", *Problems of Energetics (Problemy Energetiki)*, 2013, no. 11-12, pp. 68-76.

Submitted 03.12.2018; revised 04.02.2019

Information about the authors

Sergey V. Safonov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, First Vice-rector, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 89192463474

Elena A. Saltanaeva, Seeker, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 89033076378

Oleg V. Skrygin, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 89601370222

МЕХАНИЗМ ФОРМИРОВАНИЯ ВЫСОКОРЕСУРСНОГО ТЕРМОСТОЙКОГО ПОКРЫТИЯ

В.П. Смоленцев, А.И. Портных, Е.В. Паничев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрено применение метода атмосферного плазменного нанесения покрытий, стойких к воздействию тепловых ударов, на высокотемпературную зону блока камеры сгорания тепловых двигателей. Рассматриваемое термостойкое покрытие состоит из нескольких слоев: внутреннего металлического, контактирующего с основной детали или подложкой, и внешнего минералокерамического, включающего гранулы оксидной керамики и металлического порошка. Построены расчетные схемы для демонстрации механизма капиллярного снижения уровня подслоя при нанесении основного слоя покрытия. Установлено, что в процессе формирования внешнего слоя течение расплавленного металла подчиняется закономерностям перемещения неньютоновских жидкостей при их протекании в капиллярах, образующихся между соседними гранулами. Приведены математические зависимости изменения высоты микронеровностей поверхности в зависимости от величины наносимых подслоя и покрытия. Показано влияние таких явлений на прочность закрепления наносимых частиц в покрытии и изменение высоты микронеровностей поверхностного слоя. Приведены факторы, приводящие к снижению адгезионной прочности наносимого покрытия, а также раскрыто влияние технологических параметров процесса нанесения на стойкость покрытий при огневых испытаниях изделий с приведением зависимости, определяющей минимальную толщину подслоя

Ключевые слова: покрытие, гранулы, капиллярные явления, микронеровности, размеры гранул, стойкость, прочность закрепления гранул

Введение

Из [1] известно, что скорость струи плазмы может превышать значения от 150 до 170 м/с, а динамическая энергия обеспечивает перемещение к месту покрытия детали частиц (гранул) размерами до 200 мкм с получением плотного слоя из соседних гранул. При многослойных (в рассматриваемом случае двухслойных) покрытиях сочетание теплового режима при нанесении первого слоя и силового воздействия на него наносимых гранул поверхностных слоев позволяет получать покрытия высокой сплошности при требуемой адгезионной прочности слоев.

Схема формирования термозащитного слоя покрытия

Проведенные металлографические исследования покрытий на разных этапах их применения позволили установить динамику изменения геометрии подслоя и взаимосвязь слоев при многократных пусках двигателей. По аналогии с [2] впервые установлено, что течение расплавленного металла в период плазменного формирования подслоя и при нанесении минералокерамических гранул подчиняется закономерностям капиллярных течений неньютоновских жидкостей в пористых средах, что

вызывает снижение уровня материала подслоя, определяющего закрепление гранул в поверхностном слое. Расчетная схема нанесения слоев приведена на рис. 1.

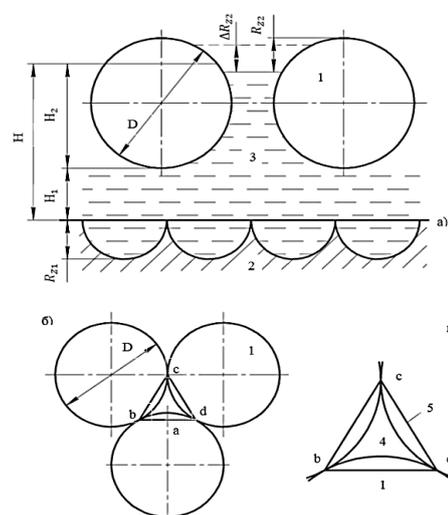


Рис. 1. Расчетная схема для построения механизма капиллярного снижения уровня подслоя при нанесении покрытия а) образование мениска между соседними гранулами; б) геометрия каналов; в) расчетное сечение канала H - общая толщина покрытия; H_1 - толщина подслоя; H_3 - высота столба подслоя в канале; R_{z1} - величина микроуглублений в подложке; R_{z2} - высота микронеровностей покрытия; ΔR_{z2} - изменение высоты неровностей из-за капиллярного снижения уровня жидкого металла; D - диаметр гранулы. 1 - гранула; 2 - подложка; 3 - материал подслоя; 4 - расчетное сечение канала

Применяемые для покрытий гранулы имеют различную форму и размеры, но для экспериментов можно подобрать некоторое количество гранул, имеющих одинаковые размеры и форму, близкую к сферической.

Из рис. 2 следует, что разрез канала имеет геометрию сопла Лавала.

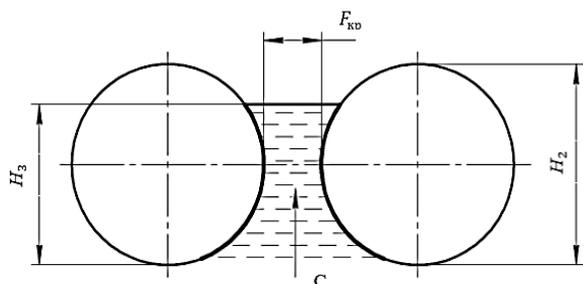


Рис. 2. Разрез канала между соседними гранулами $F_{кр}$ – площадь критического сечения, аналогичного соплу Лавала; C – вектор действия сил жидкого металла от перемещения гранул при нанесении защитного слоя

Для неньютоновских жидкостей по [2] при протекании через капилляры (аналог движения жидкости в пористой среде) в канале формируется ядро с радиусом r_0 , перемещение которого в канале при фильтрации возможно [2] только при выполнении критерия:

$$r_0 < r_{эКВ}, \quad (1)$$

где $r_{эКВ}$ – радиус, описывающий канал, эквивалентный по сечению площади критического сечения $F_{кр}$ (рис. 2).

Из рис. 1, в видно, что форма сечения канала близка к треугольнику bcd , для которого на рис. 1, б приведена расчетная схема, учитывающая сделанные допущения. Отсюда можно найти $F_{кр}$:

$$F_{кр} = \frac{D^2}{4\sqrt{3}} = 0,053D^2 \quad (2)$$

при высоте треугольника bcd :

$$ac = 1/2(\sqrt{3} - 1)D. \quad (3)$$

Тогда

$$r_{эКВ} = 0,017Dr_0 \quad (4)$$

находят по закону Дарси [2] для фильтрации жидкостей через грунт по схеме течения жидкости на рис. 2.

Как следует из [2], в губчатых средах при

течении неньютоновских жидкостей ядро канала поддерживает цилиндрическую форму с радиусом r_0 .

Если условие (1) не выполняется, то перемещение расплавленного металла нарушается и образуются пустоты типа приведенной на рис. 3, что может быть объяснено разрывом струи металла в канале вследствие его торможения в критическом сечении канала и невозможностью образовать мениск требуемой высоты.

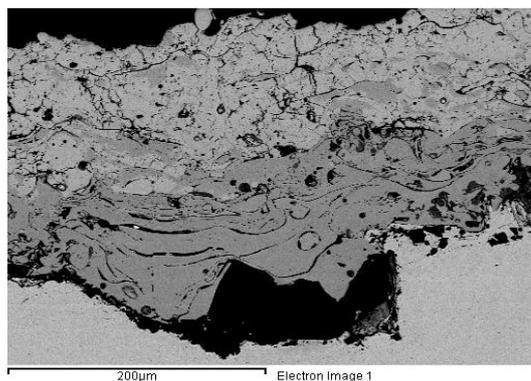


Рис. 3. Место сопряжения подслоя с подложкой

Появление приведенного на рис. 3 дефекта снижает адгезионные связи между подслоем и подложкой.

Как видно на рис. 1, а по закону Дарси [2] снижение границы мениска на величину h настолько же увеличивает высоту неровностей ΔR_{z2} покрытия.

Если принять:

$$h = \Delta R_{z2}, \quad (5)$$

то

$$\Delta R_{z2} = \frac{(H-H_1-R_{z2})F_c K_n H_2}{K_1 F_{кр}}, \quad (6)$$

где F_c – диаметр сопла плазменной установки; K_n – коэффициент плотности заполнения канала жидким металлом.

По [2]

$$K_n = (V_1 - V_2) / V_1. \quad (7)$$

Величину K_n устанавливают измерением сплошности материала покрытия на шлифах. K_1 – коэффициент фильтрации (мкм/сек), по [2] определяется экспериментально по скорости перемещения границы мениска в зависимости от свойств губчатой поверхности и жидкой среды.

С учетом допущения, что

$$H_2 = D, \quad (8)$$

формула (6) примет вид

$$\Delta R_{Z2} = \frac{4\sqrt{3}(H-H_1-R_{Z2})F_c K_n}{K_1 D}. \quad (9)$$

Обеспечение надежности закрепления гранул в поверхностном слое покрытия

Расчеты, выполненные по (9), позволяют оценить надежность закрепления гранул в поверхностном слое покрытия. Для этого необходимо выполнить требования критерия:

$$\Delta R_{Z2} < (1 - K_3)D, \quad (10)$$

где K_3 - коэффициент закрепления.

Для принятой сферической формы K_3 должен быть не менее $2/3$ диаметра гранул.

За счет эрозионного износа, в первую очередь, снижается толщина, образованная частицами порошка подслоя (слой H_1), а термостойкие гранулы (слой H_2) преимущественно выпадают из покрытия по мере износа подслоя. Это позволяет установить начальную границу заполнения металлом подслоя канала между гранулами в начале эксплуатации изделия H_3 :

$$H_3 = H - \Delta R_{Z2} - \Delta H \geq K_3 D, \quad (11)$$

где ΔH - износ покрытия после заданного количества пусков.

Из условия подобия процессов износа при

всех пусках по [3] можно найти среднюю величину износа U_{1cp} за один пуск при нормированном в задании количестве пусков N_n :

$$U_{1cp} = \frac{\Delta H}{N_n}. \quad (12)$$

Величина ΔH находится прямыми измерениями толщины покрытия перед огневыми испытаниями и после нормированного количества пусков. Отсюда находится минимальная начальная толщина H_{3min} подслоя после нанесения наружного слоя:

$$H_{3min} \geq H_1 + K_3 D + \Delta H. \quad (13)$$

Заключение

Выполнение условия (13) гарантирует (при выполнении прочих условий) отсутствие критического осыпания гранул и устраняет утрату термостойкости покрытий из-за их разрушения. Практическое использование рассмотренных покрытий подробно рассмотрено в [4].

Литература

1. Кадырметов А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2013. 260 с.
2. Рабинович Е.З. Гидравлика. М.: Госиздат, 1961. 408 с.
3. Безъязычный В.Ф. Методические подсобия в технологии машиностроения. М.: Машиностроение, 2012. 320 с.
4. Сафонов С.В. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик изделий. Воронеж: ИПЦ ВГУ, 2015. 225 с.

Поступила 28.11.2018; принята к публикации 25.01.2019

Информация об авторах

Смоленцев Владислав Павлович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89036559970

Портных Александр Иванович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89081368109

Паничев Евгений Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89081373537

MECHANISM OF FORMATION OF HIGH-LIFE HEAT-RESISTANT COATING

V.P. Smolentsev, A.I. Portnykh, E.V. Panichev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the application of the method of atmospheric plasma deposition of coatings resistant to thermal shocks to the high-temperature zone of the combustion engine block of heat engines is considered. The considered heat-resistant coating consists of several layers: internal metallic, in contact with the base part or substrate, and external mineral and ceramic, including granules of oxide ceramics and metal powder. Calculation schemes were constructed to demonstrate the mechanism of capillary reduction of the sublayer level during the application of the main coating layer. It was established that during the formation of the outer layer, the flow of molten metal obeys the laws of movement of non-Newtonian liquids as they flow in capillaries formed between adjacent granules. Mathematical dependences of the change in the height of asperities of the surface depending on the size of the applied sublayer and coating are given. The effect of such phenomena on the strength of fixing the applied particles in the coating and the change in the height of asperities of the surface layer are shown. The factors leading to a decrease in the adhesive strength of the applied coating are given, and the influence of the technological parameters of the deposition process on the durability of the coatings during firing tests of products with the reduction of the dependence determining the minimum sublayer thickness is disclosed

Key words: coating, granules, capillary phenomena, surface roughness, granule size, durability, granule fixing strength

References

1. Kadyrmetov A.M. "Management of technological providing of processes of plasma deposition of coatings in the mode of modulation of electrical parameters" ("Upravlenie tekhnologicheskim obespecheniem protsessov plazmennogo nanoseniya pokrytiy v rezhime modulyatsii elektricheskikh parametrov"), Nauchnaya kniga, 2013, 260 p.
2. Rabinovich E.Z. "Hydraulics" ("Gidravlika"), Moscow, Gosizdat, 1961, 408 p.
3. Bezhyazichnyy V.F. "Method of similarity in manufacturing engineering" ("Metodicheskie podobiya v tekhnologii mashinostroyeniya"), Moscow, Mashinostroyeniye, 2012, 320 p.
4. Safonov S.V. "Technological provision of the technical characteristics" ("Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh kharakteristik izdeliy"), Voronezh, VSU, 2015, 225 p.

Submitted 28.11.2018; revised 25.01.2019

Information about the authors

Vladislav P. Smolentsev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 89036559970

Aleksandr I. Portnykh, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 89081368109

Evgeniy V. Panichev, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 89081373537

МОДЕЛИРОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОГО ТРАКТА ТАРЕЛЬЧАТОГО СОПЛА ЖИДКОСТНОГО РАКЕТНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ОБРАТНЫМ ПОТОКОМ В КОЛЬЦЕВОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ

К.В. Косовягин, Г.И. Скоморохов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: на сегодняшний день эволюция химических ракетных двигателей практически достигла своего максимума. Это выражается в работе таких двигательных установок в условиях предельных энергетических возможностей топлива. Поиски путей по существенному повышению удельного импульса следует искать в иных областях, таких как совершенствование формы сопла в сторону снижения габаритов и массы двигателя, не только не нанося вред надлежащему расширению потока продуктов сгорания, но и делая его более независимым и эффективным. Принцип работы традиционного сопла формы Лавалья основывается на ускорении потока газа за счет преобразования геометрии в соответствии с изменяющимися физическими свойствами продуктов сгорания. Очевидно, что такой профиль – не единственное решение задачи ускорения рабочего тела. Таким образом, в настоящей работе проведены сравнительный анализ сопел жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) формы Лавалья с соплами нетрадиционной формы с внешним расширением потока и обоснование выбора топливной пары "кислород-метан" на предмет эффективности. Изложены этапы расчетного метода приближенного проектирования геометрии контура осесимметричного тарельчатого сопла с кольцевой камерой сгорания на примере расчета на базе двигателя АО КБХА РД-0162. При проектировании камеры были учтены также газодинамические особенности течения и генерируемые тепловые потоки. Была проведена отработка передовых методов проектирования на основе современных цифровых технологий, результатом которой является 3D-модель полученной камеры

Ключевые слова: кольцевая камера сгорания, тарельчатое сопло, центральное тело, газодинамика, жидкостный ракетный двигатель

Введение

С самой зари ракетной техники и до сегодняшнего дня перед конструкторами стоит задача по повышению эффективности ракетной ДУ. Однако с каждым витком развития интенсифицировать работу ЖРД становится все тяжелее. И одним из вариантов повышения удельного импульса и снижения массогабаритных характеристик является уход от традиционных сопел в сторону сопел с внешним расширением потока.

Сопло Лавалья в ЖРД предназначено только для определенного диапазона высот, так как только на нем движитель демонстрирует работу на расчетном режиме. На любом другом участке разница давлений окружающей среды и на срезе сопла создает режимы перерасширения и недорасширения газа, что провоцирует энергетические потери двигательной установки.

Двигатель же с соплом с внешним расширением работает постоянно в режиме, соответствующем максимальному удельному импульсу вследствие использования рабочим телом атмосферы как мнимой стенки сопла за счет

уравнивания давлений на срезе и окружающей среды [1].

Кроме того, применение такого сопла предоставляет опции в улучшении либо энергоэффективных, либо же массогабаритных характеристик для одной двигательной установки, т.е. происходит увеличение УИ с идентичными параметрами высоты, или уменьшение этих параметров и веса при идентичных показателях УИ.

Недостаток опытных работ и теоретических изысканий, дающих более точные результаты, а также сложная технологическая организация производственных процессов, затормаживают внедрение таких видов сопел в серийное использование двигателей. В связи с этим дальнейшие исследования в данной области являются необходимыми и актуальными.

Выбор топливной пары для проектируемой камеры

Во втором десятилетии XXI века одним из самых перспективных ракетных горючих признается метан. Это первый углеводород в ряду алканов, его формула – CH_4 . Как у топлива, у него достаточно много преимуществ.

Как по плотности, так и по эффективности, он находится между керосином и водородом. Метан же можно хранить при более высоких температурах (111,4 К), чем водород (21 К), что существенно упрощает и добычу, и хранение его в топливных системах. Также важным преимуществом метана являются его колоссальные ресурсы и относительно небольшая цена. Этот газ вполне активно испаряется, упрощая операции по освобождению от него полостей многогоразовых ЖРД. При работе на сжиженном природном газе ЖРД не испытывает тех предельных нагрузок, как при работе на водороде, что открывает возможность решения самой актуальной проблемы ЖРД – многогоразовое использование и последующее недорогое послеполетное обслуживание. Метановые ДУ недороги, просты в изготовлении и обслуживании, надежны и имеют огромный ресурс работы. В эксплуатации метан безопасен для человека и экологически «чист».

Выбор базового двигателя

В АО КБХА проводились экспериментальные работы с нетрадиционными соплами. РД-0126Э – яркий пример ЖРД, в котором была реализована кольцевая камера сгорания, интегрированная внутрь полости свободной зоны тарельчатого сопла [1]. Огненный факел по тракту устремляется из зоны горения к образованной критикой щели, попутно изменяя свое направление согласно вектору скорости ракеты. После чего поступает на сверхзвуковой участок для расширения, испытывая возмущения, согласно теории Прандтля-Майера. Кроме того, в двигателе реализован цикл с фазовым переходом: кольцевая камера двигателя обеспечивает подогрев водорода в трактах охлаждения лучше, чем у сопла Лавалья, но не при этом не допуская прогара стенок камеры.

Уровень удельного импульса РД-0126Э достигает 4670 м/с, вес двигательной установки составляет 0,24 т, габариты: длина – 1600 мм, срез сопла – 1580 мм. РД-0126 – двигатель, выполненный по классическому профилю, вырабатывает удельный импульс на 60 единиц меньше.

Стоит отметить, что в АО КБХА разрабатывались и ЖРД, использующие СПГ. Демонстрационный вариант РД0110МД был разработан и испытан с целью исследования рабочих режимов на многообещающей топливной паре жидкий кислород+СПГ.

Результаты опытных работ с СПГ послужили базисом для конструирования российских метановых двигателей для перспективных многогоразовых ракет-носителей РД-0162 и РД0162 СД.

РД-0162 демонстрирует уровень тяги 203,9 тс, земной удельный импульс 321 с (пустотный – 356 с), уровень давления в камере сгорания – 160 атм., рабочее время двигателя – 200 с, вес двигателя 2,1 т.

Таким образом, по проведению поиска и анализа разработок, подходящих для дальнейшего расчета, в качестве прототипа были выбраны основные параметры кислородно-метанового двигателя РД-0162 с соплом Лавалья производства АО КБХА.

Вводные расчетные параметры для геометрии контура

Входные характеристики для воспроизведения профиля камеры специфицированы ниже.

Таблица 1

Исходные величины для проектирования

Наименование величины	Обозначение	Значение
Диаметр ракеты, м	D_p	3
Время работы блока ступени, с	$t_{раб}$	200
Горючее	CH_4	Метан
Окислитель	O_2	Кислород
Земная тяга двигателя, тс	P_0	200
Камер в сборке двигателя	z_k	1
Давление в камере сгорания, атм	p_k	160
Давление на срезе, атм	p_a	0,5
Стандартный УИ, м/с	$I_{уд}^{ст}$	3149
Плотность ок-ля, кг/м ³	ρ_o	1144
Плотность горючего, кг/м ³	ρ_z	424
Газовая постоянная, Дж/кг·К	R	390
Стандартная температура в камере сгорания, К	$T_{ст}$	3107
Показатель адиабаты	k	1,11
Соотношение компонентов	k_m	3,4
Пустотный УИ, м/с	$I_{уд}^{\infty}$	3547
Плотность смеси, кг/м ³	ρ_m	825
Массовый расход топлива, кг/с	\dot{m}	635

Расчёт геометрии контура дозвуковой части

Дозвуковая часть камеры проектируется торообразной формы. Радиусы центрального тела и полости, образованной от вращения контура камеры сгорания вокруг него, выбираются из конструктивных соображений.

Последующие же в данной работе величины рассчитаны по эмпирическим формулам [3]. Вычисления представлены в табл. 2.

Таблица 2

Профиль камеры сгорания

Характеристика	Обозначение	Значение
Радиус критики, мм	$R_{кр}$	150
Расчетный коэф.	K_0	0,63
Диаметр цилиндра без ЦТ, мм	D_k	552
Длина входного участка, мм	$L_{вх}$	338
Длина смесительной головки, мм	L_2	138
Длина цилиндрического участка, мм	$L_{ц}$	690

Профилирование сверхзвуковой части

Несмотря на внешние визуальные различия, способ ускорения потока продуктов сгорания абсолютно ничем не отличается от способа, реализуемого соплом Лавала. Разгон газа происходит за счет геометрического расширения профиля в зоне сверхзвуковых скоростей (рис.1).

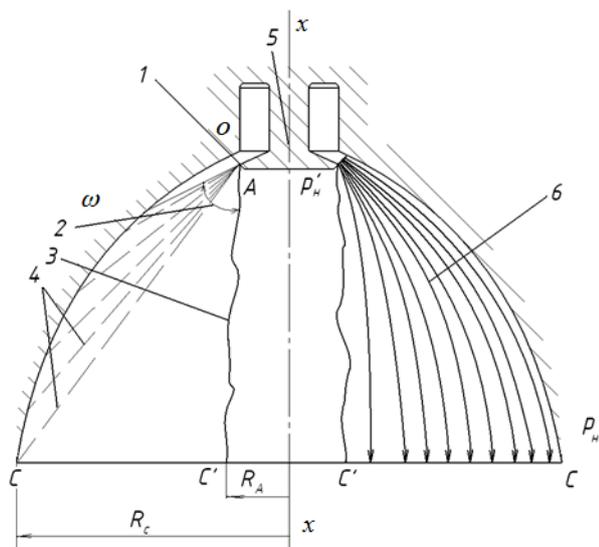


Рис. 1. Схема течения ПС в тарельчатом сопле

Критическое сечение сопла с центральным телом имеет форму кольца, так что поток газа начинает расширяться в кольцевом зазоре OA (1), образованном контуром центрального тела (5) и наружным контуром. В кольцевых соплах, как и в обычных, формирование потока (6) определяется контуром стенок сопла. В отличие от обычных сверхзвуковых сопел, в которых поток формируется стенками, в соплах с центральным телом расширение потока не ограничено полностью твердыми стенками. В соплах с полным и частичным внешним расширением внешняя граница струи является свободной поверхностью (3). В тарельчатых соплах свободной поверхностью является внутренняя поверхность струи [1].

Примем для расширения потока в тарельчатом сопле допущение о плоском течении газа Прандтля-Майера [3].

Это течение возникает при обтекании кромки сверхзвуковым потоком. Оно сопровождается ускорением и поворотом потока (2) за счет бесконечного числа скачков разрежения (4).

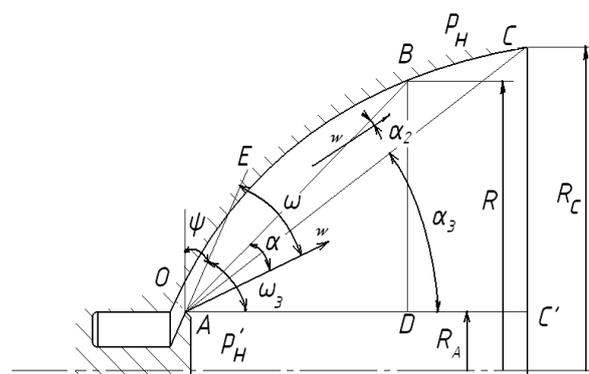


Рис. 2. Расчет контура тарельчатого сопла

Рассмотрим рис. 2. Газ, обтекая кромку A , испытывает возмущения. Для произвольной точки B контура сопла площадь сечения потока со скоростью w определится как проекция боковой поверхности усеченного конуса, образованного вращением отрезка $AB=L$ вокруг оси, на поверхность, нормальную к направлению скорости потока w :

$$f = \pi L(R + R_A) \sin \alpha = \frac{\pi(R^2 - R_A^2)}{M \cos[\alpha - (\omega + \varphi)]}; \quad (1)$$

$$L = \frac{R - R_A}{\cos[\alpha - (\omega + \varphi)]} = \frac{R_A}{\cos[\alpha - (\omega + \varphi)]}.$$

$$\cdot \left\{ \sqrt{1 + \frac{fM}{\pi R_A^2} \cos[\alpha - (\omega + \varphi)]} - 1 \right\}; \quad (2)$$

$$\bar{L} = \frac{L}{R_A}. \quad (3)$$

Таким образом, получаем

$$R = R_A \sqrt{1 + \frac{fM}{\pi R_A^2} \cos[\alpha - (\omega + \varphi)]}. \quad (4)$$

Находим число Маха потока $M_a=3,5$ и соотношение площади среза сопла и площади критики $f_a/f_{kp}=8,8$ по эмпирическим зависимостям [3].

Находим площадь среза сопла $f'_a=0,53 \text{ м}^2$ с помощью второй зависимости и из него – радиус сопла, имеющий значение $R'_a=410 \text{ мм}$.

Обозначим радиус центрального тела от оси до кромки A как R_A , а радиус контура на срезе сопла как R_C .

Тогда геометрически вычислив, получим $f_a=1,61 \text{ м}^2$ и, следовательно, $R_a=720 \text{ мм}$. Радиус полости задаем как $R_B=138 \text{ мм}$.

Из эмпирических зависимостей [3] угол наклона наружной кромки к оси сопла $\omega_3=80,9^\circ$, а также $\psi=9,1^\circ$.

Внешний контур тарельчатого сопла определяется из ряда эмпирических зависимостей [3]. Для этого были рассчитаны для всех значений числа Маха по сечениям величины, составляющие базу для построения газодинамического профиля сверхзвуковой части. Таким образом, по полученным данным уже возможно определить газодинамический профиль сверхзвуковой части КС.

По рассчитанным «вручную» величинам была составлена таблица координат контура проектируемого сопла.

Координаты сведены в табл. 3.

Таблица 3

Координаты точек профиля

L, м	R, м
0	0,138
0,025	0,528
0,062	0,588
0,105	0,633
0,152	0,67
0,219	0,711
0,303	0,758
0,406	0,808
0,542	0,863
0,868	0,987
1,355	1,14

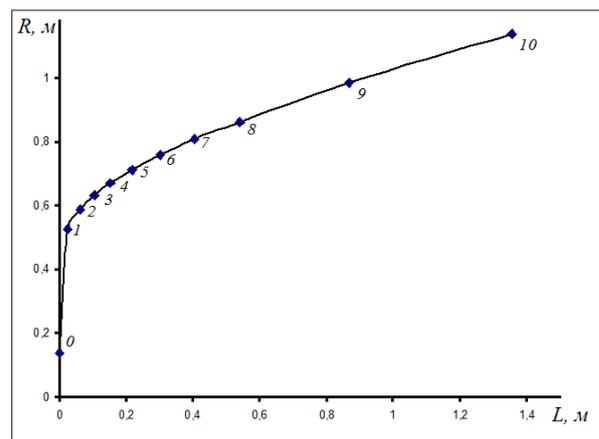


Рис. 3. Профилирование тарельчатого сопла

Таким образом, согласно табл. 3, изображим на рис. 3 график, представляющий контур сверхзвуковой части сопла.

Формирование геометрии газодинамического контура камеры двигателя

Геометрия настоящей КС ЖРД генерируется аналогично классическому профилю путем интеграции двух ранее полученных частей. В предыдущем пункте была спрофилирована форма закритической зоны. В критическом сечении она спаривается с камерой сгорания, спроектированной в пункте «Расчёт геометрии контура дозвуковой части».

На рис. 4 представлен полный газодинамический профиль всей проектируемой камеры.

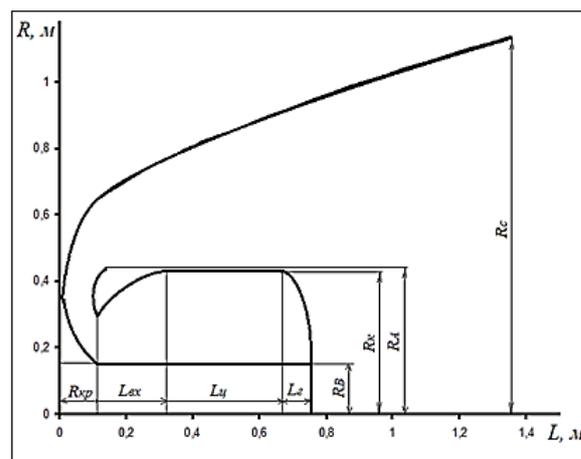


Рис. 4. Газодинамический профиль КС

Расчет тепловых потоков, образующихся по длине сопла

Организация охлаждения в камере ЖРД значительно усложняется по сравнению с системами охлаждения других тепловых машин. Данный факт обусловлен конкретными особенностями теплообмена в ракетных ДУ, таких как условия высоких температур (3000 – 4000 К), давлений (до 250 атм) и высокого уровня радиации.

В общем случае теплоток, распространяющийся от газа к стенке, образован двумя потоками. Конвективным тепловым потоком и лучистым тепловым потоком. Таким образом, согласно базовым постулатам теории теплообмена, суммарный удельный тепловой поток через стенку сопла описывается через следующее уравнение:

$$q_{\Sigma} = q_k + q_l. \tag{5}$$

В настоящей работе было произведено аппроксимированное вычисление распределения удельных тепловых потоков по длине всего профиля сопла.

Расчетный метод основывался на экстраполяции теплоток с образцового двигателя на проектируемый двигатель [2].

Математические модели экстраполяции базируются на отождествлении двух геометрически аналогичных профилей, но габариты которых, давление для них, а также компоненты и их пропорции могут разниться.

Таким образом, конвективные тепловые потоки были определены для каждого из участков соответственно, т.е. для сечений, при которых выражение $R / R_{кр}$ для каждой геометрий идентичное. Математическая модель экстраполяции конвективных тепловых потоков образцового двигателя на проектируемый, где параметры с нижним индексом «о» – характеристики, соответствующие образцовому, имеет вид:

$$\frac{q_k}{q_{k.o}} = \left(\frac{P_k}{P_{k.o}} \right)^{0,87} \cdot \left(\frac{R_{кр.o}}{R_{кр}} \right)^{0,13} \cdot \frac{S}{S_o}, \tag{6}$$

где величина S – термодинамическая функция.

Математическая модель распространения лучистого теплового потока q_l вытекает из его соответствия удельному конвективному q_k .

Расчет величин q_l на каждом участке профиля производится с использованием эмпирических зависимостей [2].

Подобно тому образу, по которому были произведены предыдущие вычисления конвективного теплоток, был произведен расчет лучистого теплового пока.

На рис. 5 представлен график распространения суммарного теплового потока по длине камеры.

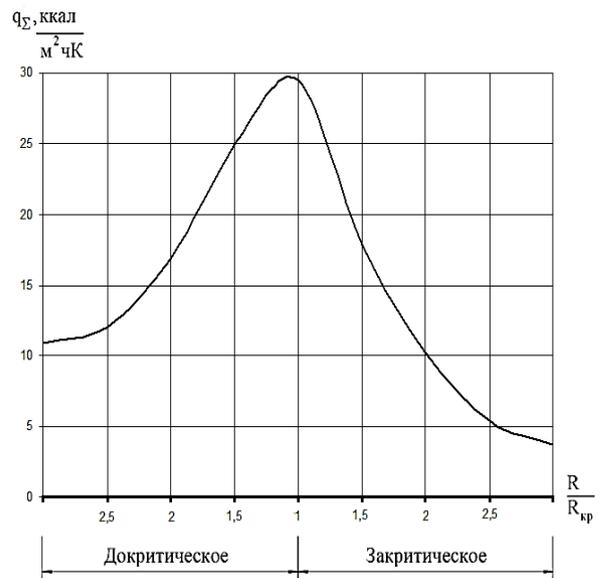


Рис. 5. Суммарный тепловой поток по длине камеры

Проектирование габаритов каналов охлаждения

В производстве жидкостных ракетных двигателей крайняя высота межрубашечного канала принимается не менее 1,5мм. Согласно жестким критериям материалов стенок камеры сгорания и сопла, наибольшая высота, оставляемая для зазора на подачу охладителя, может достигать 8мм.

Высота межрубашечных полостей по длине сопла вычисляется по следующей эмпирической математической модели из методики, описанной в [2]:

$$\delta_{mp} = \frac{(\dot{m}_{ox})^{0,8}}{2\pi R^{0,8} \cdot \Phi \cdot \tau}, \tag{7}$$

где τ – ресурс обработки блока ступени в составе РН, с;

Φ – универсальная характеристика на каждом из участков профиля спроектированного сопла двигателя:

$$\Phi' = K \cdot q_{\Sigma}, \frac{\text{ккал}}{\text{м}^2 \cdot \text{чК}}; \quad (8)$$

$$\Phi = 1,163 \cdot \Phi', \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \text{К}}, \quad (9)$$

где K – комплексный коэффициент из справочных материалов, характеризующий теплофизическую природу рабочего тела, для СПГ он составляет $K = 1,27$.

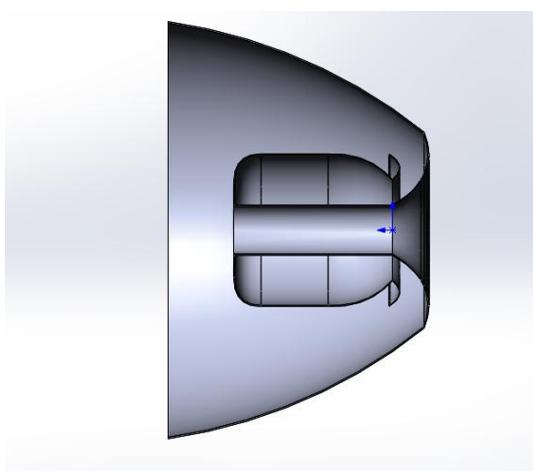


Рис. 6. Вид сбоку в разрезе

Во второй половине второй декады двадцать первого столетия современные аддитивные технологии постепенно заканчивают стадию экспериментальной отработки и начинают вводиться в серийное производство.

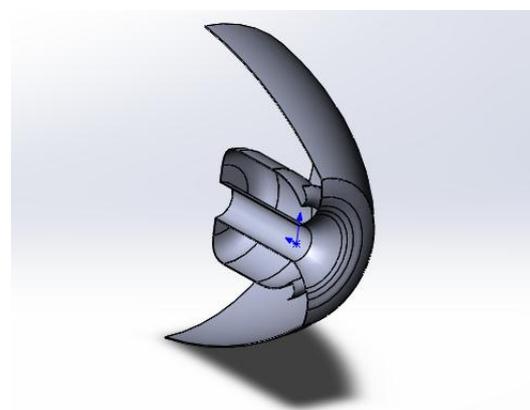


Рис. 7. Изометрия в разрезе

Они основываются на 3D-моделировании, 3D-печати, 3D-сканировании. Уже сегодня в космос выводят полезную нагрузку РН с «напечатанными» камерами («Electron» от частной компании RocketLab).

Таким образом, в завершение расчета была построена в САД-системе SolidWorks 2016 3D-модель спроектированной камеры по всем полученным данным в настоящем расчете (рис. 6, 7).

Заключение

В данной статье был представлен сравнительный анализ существующих форм сопел ЖРД. Также приведено обоснование использования метана как топлива для космических ракет. Работа, представленная в статье, заключалась в отработке расчетного метода моделирования газодинамического тракта тарельчатого сопла. В ходе проектирования камеры были приняты во внимание такие аспекты работы ЖРД, как газодинамические особенности течения и генерируемые тепловые потоки. Был представлен контур всей камеры, а также 3D-модель с учетом межрубашечных зазоров в общем виде.

Отсутствие серийного производства ЖРД с нетрадиционными трактами обусловлено недостатком исследований в области обеспечения стабильности охлаждения стенок, их прочности, а также устойчивости работы двигателя такого рода в целом. Данные запросы подкрепляют актуальность настоящей работы, а также обуславливают дальнейшие исследования.

Литература

1. Горохов В.Д. Исследование возможности создания камеры ЖРД с кольцевым критическим сечением, расположенным в сверхзвуковом сопле // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2009. Т.5. № 1. С. 36.
2. Гуртовой А.А., Скоморохов Г.И., Шматов Д.П. Расчет и конструирование агрегатов ЖРД: учеб. пособие [Электронный ресурс]. Электрон. текстовые и граф. данные (1,67 Мб). Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2016. 166 с.
3. Добровольский М.В. Жидкостные ракетные двигатели. Основы проектирования: учебник для вузов / Под ред. Д.А. Ягодникова. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2005. 488 с.

Информация об авторах

Косовягин Константин Владимирович – студент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 8-906-680-32-90, e-mail: kosovyagin@bk.ru

Скоморохов Геннадий Иванович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: gisk46@mail.ru

**DESIGN OF THE GAS DYNAMIC TRACT OF THE DISC NOZZLE
OF A LIQUID ROCKET ENGINE WITH REVERSE FLOW IN AN ANNULAR
COMBUSTION CHAMBER**

K.V. Kosovyagin, G.I. Skomorohov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: to date, the evolution of chemical rocket engines has almost reached its maximum. This is reflected in the operation of such propulsion systems under the conditions of the limiting energy possibilities of the fuel. The ways to significantly increase the specific impulse should be sought in other areas, such as improving the shape of the nozzle to reduce the size and weight of the engine, not only without harming the proper expansion of the flow of combustion products, but also making it more independent and effective. The principle of operation of a traditional Laval nozzle is based on the acceleration of the gas flow due to the transformation of the geometry in accordance with the changing physical properties of the combustion products. Obviously, such a profile is not the only solution to the problem of accelerating the working body. Thus, in the present work, a comparative analysis of Laval form liquid-propellant rocket engine (LRE) nozzles with non-conventional nozzles with external flow expansion and justification of the choice of the oxygen-methane fuel pair for efficiency were carried out. The stages of the computational method for the approximate design of the geometry of the contour of an axisymmetric dish-shaped nozzle with an annular combustion chamber are set forth on the example of a calculation based on the engine of JSC KBHA RD-0162. When designing the chamber, gas-dynamic features of the flow and the generated heat flows were also taken into account. The development of advanced design methods based on modern digital technologies was carried out, the result of which is a 3D model of the resulting camera

Key words: annular combustion chamber, disc nozzle, central body, gas dynamics, liquid-propellant rocket engine

References

1. Gorohov V.D. “Research of the possibility of the creation LRE camera with recirculating critical section, located in supersonic nozzle”, *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, vol. 5, no. 1, pp. 36.
2. Gurtovoy A.A., Skomorokhov G.I., Shmatov D.P. “Calculation and design of liquid propellant rocket engine elements. Manual” (“Raschet i konstruirovaniye agregatov ZHRD: ucheb. posobie”), [Electronic source], Voronezh State Technical University, 2016, 166 p.
3. Dobrovolskiy M.V. “Liquid propellant rocket engines. Design basis textbook” (“Zhidkostnyye raketnye dvigateli. Osnovy proektirovaniya: uchebnik dlya vuzov”), Bauman Moscow State Technical University, 2005, 488 p.

Submitted 17.12.2018; revised 25.01.2019

Information about the authors

Konstantin V. Kosovyagin, Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel.: 8-906-680-32-90, e-mail: kosovyagin@bk.ru

Gennadiy I. Skomorohov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), e-mail: gisk46@mail.ru

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЙ ВЫБОР И ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕМЕНТОВ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ГИБКОГО АВТОМАТИЗИРОВАННОГО ПРОИЗВОДСТВА

Дж.Ф. Мамедов¹, Г.С. Абдуллаев¹, Ш.Т. Мамедова¹, Б.А. Валиева¹, О.И. Попова²

¹Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит, Азербайджан

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: на основе анализа программных продуктов для создания базы данных определены их основные функции для проектирования, структурирования технических показателей с целью их дальнейшего эффективного поиска и выбора активных элементов автоматизации сложной технической системы – гибкого автоматизированного производства (ГАП). На примере гибкого автоматизированного производства машиностроительного предприятия с использованием системы управления базами данных (СУБД) реализован процесс мобильного поиска и выбора нестандартных элементов системы управления и промышленного робота гибкого автоматизированного участка для раздувания каналов плоских заготовок. Даны этапы практической реализации вопросов по разработке базы данных нестандартных элементов управления и электроснабжения гибкого автоматизированного участка ГАП и созданию поисковых запросов из готовой базы данных. Разработаны базы данных нестандартных элементов системы управления ГАП, которые осуществляются на основе готовых технических показателей и полученных расчетных параметров посредством математических и алгоритмических методов. Разработана база данных для поиска и выбора типов датчиков системы управления гибкого автоматизированного производства, которые включены в подсистему автоматизированного проектирования нестандартных элементов системы управления ГАП

Ключевые слова: гибкое автоматизированное производство, датчик, система управления, база данных

Введение

На этапе эскизного проектирования системы управления гибкого автоматизированного производства (ГАП), работа проектировщика связана с решением задач формирования необходимого состава основного технологического оборудования и производственных модулей, выбора их компоновочной структуры, стандартных и нестандартных элементов системы управления и электроснабжения, планирования последовательности технологических операций в производственных модулях, распределения основного технологического оборудования между обслуживающими роботами и построения программно-алгоритмического обеспечения [1, 2]. Анализ работ по автоматизации процессов выбора и проектирования элементов системы управления [3] показал, что для эффективности решения данной проблемы требуется применение специальных программных средств интеллектуального назначения.

Постановка задачи

В работе рассматривается вопрос создания алгоритмического и программного обеспече-

ния для эффективного выбора элементов системы управления ГАП с целью их дальнейшего моделирования и построения реального проекта автоматизированной схемы. Объектом исследования является ГАП в области машиностроения, где основным принципом при составлении плана расположения оборудования является обеспечение прямого движения заготовки в процессе их изготовления в соответствии с технологическим процессом. Металлорежущие, шлифовальные станки, гидравлические прессы и другие устройства, являющиеся основными оборудованьями в гибких автоматизированных участках (ГАУ₁, ГАУ₂, ..., ГАУ_n), расположены по ходу технологического процесса, т.е. в порядке выполнения технологических операций в ГАП (рис. 1).

Промышленные роботы, выполняющие обслуживающие операции, устанавливаются между технологическими оборудованьями в гибких автоматизированных участках ГАП.

Представленные размеры в ГАУ_i (на примере ГАУ₆) соответствуют стандартам, хранящимся в базе данных (рис. 1): s_{mo_i} – поперечная длина i -го оборудования; b_{max} – максимальное расстояние безопасного перемещения между оборудованьями и стенами участка; c – расстояние от фронтальной стены ГАП до центральной оси каждого участка.

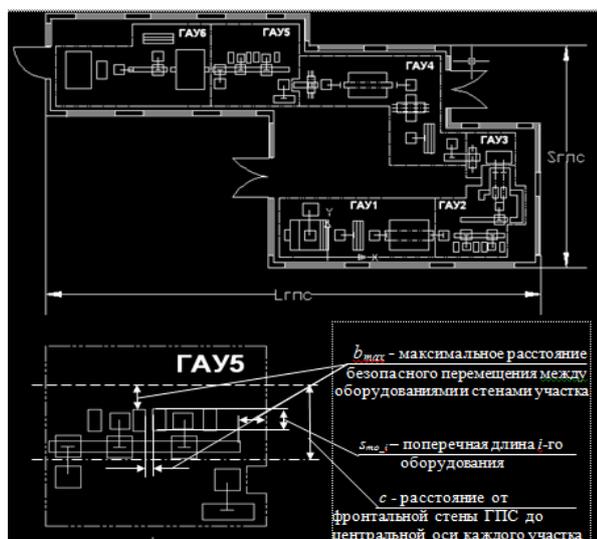


Рис. 1. Компоновочная схема гибкой производственной системы (ГПС) машиностроительного предприятия

Стандартные размеры между оборудованием и безопасные расстояния между оборудованием и стенами, пролетами цеха выбираются на основе условий. Задавая выше представленные стандартные размеры в виде переменных b_{max} , a_{ij} с помощью программной процедуры «Записи – Фильтр» на экран выводятся необходимые для эскизного чертежа компоновки ГАУ_{*i*}. Для запроса по стандартным размерам в разделе «Запросы» задаются требуемые условия выбора соответствующих нормативных размеров компоновочного размещения оборудования в ГАУ_{*i*} ГАП.

Проектировщик, выполняющий работы на базе разработанного проектно-управляемого интерфейса и готовой операционной системы с расширенными возможностями взаимодействия с офисными, служебными, специальными конструкторскими, математическими программными средствами, на базе локальной и глобальной компьютерной сети, одновременно осуществляет проектные процедуры по разработке информационного обеспечения автоматизированного проектирования, выбора и управления данной информацией.

Рассмотрим этапы практической реализации вопросов по разработке базы данных нестандартных элементов управления и электрооборудования ГАУ_{*i*} ГАП и созданию поисковых запросов из готовой базы данных. Разработка базы данных нестандартных элементов сенсорной системы управления ГАП и операции поиска, выбора выполняются с помощью программной системы Microsoft Access. Типы нестандартных элементов системы управления

ГАП, предварительно определенные проектировщиком, в режиме конструктора вводятся в ячейки таблицы базы данных. Окончательная табличная форма базы данных всех типов нестандартных элементов системы управления (датчики, система технического зрения (СТЗ), чувствительный элемент) и промышленных роботов (захватное устройство (ЗУ)) ГАП представлена на рис. 2.

Определенные исследованием типы нестандартных элементов участков ГПС представляются нижеследующим образом: захватные устройства механического, магнитного и вакуумного типа (ЗУ мех_типа, ЗУ магн_типа, ЗУ вак_типа) для захвата малогабаритных и крупногабаритных плоских заготовок, монтируемые на руках промышленного робота, применяются на всех ГАУ_{*i*} ГАП; позиционирующий манипулятор (Поз_манип) для позиционирования плоских заготовок, устанавливаемых на автоматической транспортной системе ГАУ₂ и ГАУ₅; бесконтактный манометр (Беск_моном) для измерения давления воды в гидравлическом прессе ГАУ₅; чувствительный элемент (Чувств_элемент) для измерения относительно больших деформаций, возникающих при движении руки промышленного робота соответственно на участках ГАУ₁, ГАУ₃, ГАУ₄, ГАУ₆; тепловые датчики (Тепл_датч), устанавливаемые на нагревательных производственных модулях участков ГАУ₁, ГАУ₄, ГАУ₆; СТЗ для определения дефектов на поверхности заготовок [4], устанавливаемая над автоматической транспортной системой ГАУ₅; система технического контроля (СТК) для контроля за качеством конечной продукции, устанавливаемая над автоматической транспортной системой ГАУ₆ перед упаковкой продукции в готовые тары; датчики индуктивные, электромагнитные и оптические (Датч_индукт, Датч_электр, Датч_оптич) для фиксирования положений технологического оборудования и перемещения промышленных роботов.

Код	НЭ ГАУ1	НЭ ГАУ2	НЭ ГАУ3	НЭ ГАУ4	НЭ ГАУ5	НЭ ГАУ6
1	ЗУ мех_типа	ЗУ магн_типа	ЗУ мех_типа	ЗУ вак_типа	ЗУ магн_типа	ЗУ магн_типа
2		Поз_манип			Поз_манип	
3					Беск_моном	
4	Чувств_элемент		Чувств_элемент	Чувств_элемент		Чувств_элемент
5	Тепл_датч			Тепл_датч		Тепл_датч
6					СТЗ	СТК
7	Датч_индукт	Датч_электр	Датч_электр	Датч_индукт	Датч_электр	Датч_оптич

Рис. 2. База данных элементов системы управления ГАП

Для определения типов нестандартных элементов системы управления ГАУ_i ГАП осуществляются запросы в готовую базу данных. Для этого на экране в поисковом окне отдельно вводится параметр запроса (НЭ_ГАП). Далее, вводя значение параметра (НЭ_ГАУ_i), из базы данных для ГАУ_i выбираются соответствующие типы нестандартных элементов. Поиск нестандартных элементов для других участков ГАП осуществляется аналогичным образом.

Создание базы данных нестандартных элементов системы управления ГАП осуществляется на основе приобретения готовых технических показателей и полученных расчетных параметров посредством математических и алгоритмических методов, которые включены в подсистему автоматизированного проектирования нестандартных элементов ГАП.

Технические характеристики захватных устройств промышленных роботов, позиционирующих манипуляторов, специальных датчиков, систем технического зрения и контроля ГПС, вводятся в базу данных, которая разрабатывается на базе программной системы. Подсистема базы данных нестандартных элементов системы управления создается и редактируется через панель управления и соответственно команды меню интерфейса комплексной системы автоматизированного проектирования ГАП (рис. 3).

Поиск нестандартных элементов из базы данных осуществляется на основе их основных параметров: грузоподъемность захватного устройства; чувствительность, быстродействие и погрешность позиционирования датчиков [5]. При выборе захватного устройства учитывается специфика технологических операций технологического оборудования и промышленных роботов во всех участках ГАУ_i ГАП. Если учитывать, что в ГАУ₁ для загрузки и разгрузки крупногабаритных алюминиевых заготовок требуются захватные устройства с грузоподъемностью от 5 до 10 кг, то при выборе задаются соответствующие условия и выбираются ЗУ механического типа.

Заданные операторы выбираются из каталога «Операторы» или с помощью пиктограмм на панели управления и вставляются в окно построителя выражений. Далее сохраненное сравнительное или логическое выражение позволяет выбрать все типы захватных устройств и вывести их список в табличной форме.

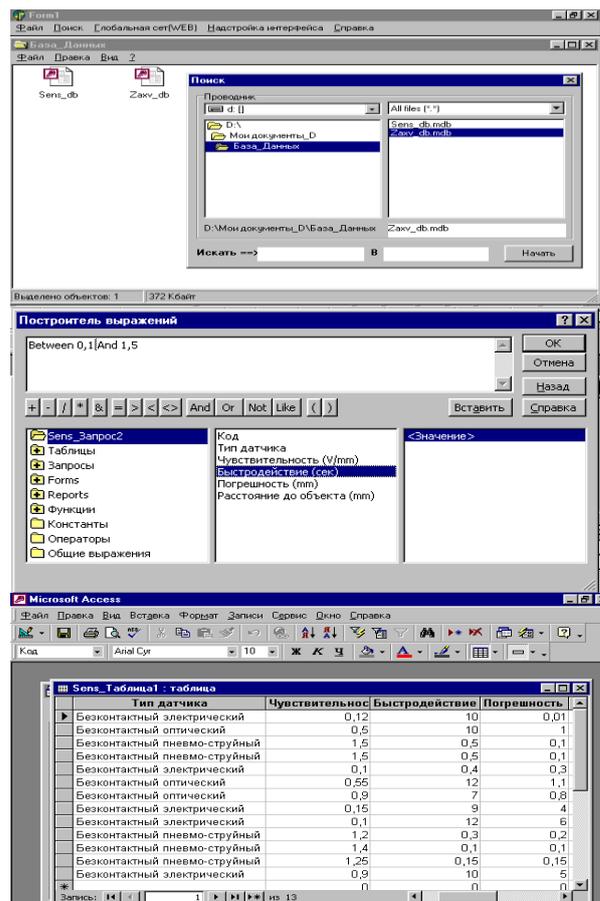


Рис. 3. Программные модули БД и выбора типов датчиков

Список типов датчиков выбирается аналогичным образом в соответствии с требованиями производства и составленными условиями выражениями в системе Access. Если учесть, что при поиске информационных элементов системы управления ГАП, т.е. датчиков для фиксирования позиций перемещения руки промышленного робота, захватного устройства промышленного робота требуются высокие технические показатели по быстродействию и погрешности позиционирования, то, составляя условия с логическими и сравнительными операторами, из базы данных выбираются соответствующие датчики.

Заключение

Таким образом, можно сделать следующие выводы:

1. На основе анализа программных продуктов по созданию базы данных определены их основные функции для проектирования, структурирования технических показателей с целью их дальнейшего эффективного поиска и выбора.

2. На примере ГАП машиностроительного предприятия с применением СУБД осуществляется мобильный поиск и выбор нестандартных элементов системы управления и промышленного робота гибкого автоматизированного участка для раздувки каналов плоских заготовок.

Литература

1. Андреев Г.А., Новиков В.Н., Схиртладзе А.Г. Проектирование технологической оснастки машиностроительного производства. М.: Высшая школа, 1999. 415 с.
2. Проектирование автоматизированных участков и цехов / Ю.М. Соломенцев, В.П. Вороненко, В.А. Егоров,

М.Г. Косов; под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высшая школа, 2000. 271 с.

3. Мамедов Дж.Ф. Проектирование интеллектуального информационного обеспечения системы управления и регулирования холодильных установок // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2002. № 12. С. 19-22.

4. Мамедов Дж.Ф., Халилов С.А., Талыбов Н.Г. Разработка системы технического зрения промышленного робота в условиях ГПС // Актуальные проблемы твердотельной электроники и микроэлектроники: труды девятой междунар. науч.-техн. конф. Дивноморское, 2004. Ч. 2. С. 77-80.

5. Мамедов Ф.И., Дадашева Р.Б., Мамедов Дж.Ф. Двухмерный индуктивный датчик для одновременного измерения двух технологических параметров // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2001. № 5. С. 54-55.

Поступила 07.12.2018; принята к публикации 04.02.2019

Информация об авторах

Мамедов Джаваншир Фирудин оглу – д-р техн. наук, профессор, Сумгаитский государственный университет (Az5004, Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал, ул. Бакинская, 1), e-mail: savan62@mail.ru

Абдуллаев Гурбан Садых оглу – канд. техн. наук, доцент, Сумгаитский государственный университет (Az5004, Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал, ул. Бакинская, 1), e-mail: savan62@mail.ru

Мамедова Шафагат Телман гызы – ассистент, Сумгаитский государственный университет (Az5004, Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал, ул. Бакинская, 1), e-mail: savan62@mail.ru

Валиева Бановша Аслан гызы – лаборант, Сумгаитский государственный университет (Az5004, Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал, ул. Бакинская, 1), e-mail: savan62@mail.ru

Попова Ольга Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: olga_10_popova@mail.ru

AUTOMATION CHOOSING AND DESIGN OF THE CONTROL SYSTEM ELEMENTS OF FLEXIBLE AUTOMATION MANUFACTURE

J.F. Mamedov¹, Q.S. Abdullaev¹, Sh.T. Mamedova¹, B.A. Valieva¹, O.I. Popova²

¹Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: based on the analysis of software products for the creation of a database, their main functions for designing, structuring technical indicators with the aim of their further effective search and selection are determined. On the example of the automation manufacture of a machine-building enterprise with the use of a DBMS, a mobile search and selection of non-standard elements of control system and industrial robot of a flexible automated cell for blowing up channels of flat blanks are performed. The stages of practical implementation of problems on the development of database of non-standard controls and power supply of flexible automation manufacture and the creation of search queries from a ready-made database are given. The databases of non-standard elements of the flexible automation manufacture control system have been developed which are carried out on the basis of ready-made technical indicators and the calculated parameters obtained by means of mathematical and algorithmic methods. A database has been developed for searching and selecting types of sensors for a flexible automation manufacture control system, which are included in the subsystem for automated design of non-standard elements of flexible automation manufacture control system

Key words: flexible automation manufacture, sensor, control system, data base

References

1. Andreev G.A., Novikov V.N., Skhirtladze A.G. "Design of technological equipment of machine-building production" ("Proektirovanie tekhnologicheskoy osnastki mashinostroitel'nogo proizvodstva"), Moscow, Vysshaya shkola, 1999, 415 p.
2. Solomentsev Yu.M., Voronenko V.P., Egorov V.A., Kosov M.G. "Design of automated sites and shops" ("Proektirovaniye avtomatizirovannykh uchastkov i tsekhov"), Moscow, Vysshaya shkola, 2000, 271 p.
3. Mamedov J.F. "Design of intelligent information support of the system of control and regulation of refrigeration units", *Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics (Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika)*, 2002, no. 12, pp. 19-22.

4. Mamedov J.F., Khalilov S.A., Talybov N.G. "The development of a vision system of an industrial robot in terms of GPS", *Proc. of the 9th international scientific and technical conference "Actual problems of solid-state electronics and microelectronics" (Aktual'nye problemy tverdotel'noy elektroniki i mikroelektroniki: trudy devyatoy mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, part 2, Divnomorskoe, Russia, 2004, pp. 77-80.

5. Mamedov F.I., Dadasheva R.B., Mamedov J.F. "Two-dimensional inductive sensor for simultaneous measurement of two technological parameters", *Devices and Systems. Management, Control, Diagnostics (Pribory i sistemy. Upravlenie, kontrol', diagnostika)*, 2001, no. 5, p. 54-55.

Submitted 07.12.2018; revised 04.02.2019

Information about the authors

Javanshir Firudin oglu Mamedov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Sumgait State University (43d district, Bakinskaya str., Sumgait city Az5004, Azerbaijan), e-mail: cavan62@mail.ru

Qurban oglu sadykh Abdullaev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Sumgait State University (43d district, Bakinskaya str., Sumgait city Az5004, Azerbaijan), e-mail: cavan62@mail.ru

Shafagat Telman gyzy Mamedova, Assistant, Sumgait State University (43d district, Bakinskaya str., Sumgait city Az5004, Azerbaijan), e-mail: cavan62@mail.ru

Banovsha Aslan gyzy Valieva, Technician, Sumgait State University (43d district, Bakinskaya str., Sumgait city Az5004, Azerbaijan), e-mail: cavan62@mail.ru

Ol'ga I. Popova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: olga_10_popova@mail.ru

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ ПЛАЗМЕННОГО НАНЕСЕНИЯ МНОГОСЛОЙНЫХ ТЕРМОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ

А.И. Портных, В.П. Смоленцев, Е.В. Паничев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрены условия применения термозащитных многослойных покрытий, наносимых способом атмосферного плазменного напыления. Приведены схема, методы расчетов и выбора технологических режимов нанесения покрытий, назначаемых с учетом эксплуатационных требований, где принимаются во внимание условия работы деталей с термозащитным покрытием, наносимым на высокотемпературные зоны двигателей летательных аппаратов. Рассмотрены покрытия, состоящие из нескольких слоев, сочетание которых обеспечивает высокую адгезионную прочность и эрозионную стойкость покрываемой поверхности изделия. Показаны назначение и влияние металлического подслоя на формирование основного покрытия, а также зависимости для определения его минимальной величины, обеспечивающей получение максимальных эксплуатационных характеристик покрытия. На основании приведенных математических зависимостей обоснован выбор режимных показателей перемещения сопла плазматрона, рационального расхода порошковых материалов, оптимальных размеров применяемых гранул и энергетических параметров напыления, а также величины припуска на полировку переходных участков покрытия. При разработке режимов впервые учтены особенности течения расплавленного металла подслоя покрытия на формирование технологических показателей процесса нанесения двухслойного покрытия, наружный слой которого содержит минералокерамические гранулы на основе оксидной керамики

Ключевые слова: технологические режимы, плазменное нанесение, термозащитные покрытия, гранулы, слой, капиллярность

Введение

Проведенный нами анализ показал, что для нанесения покрытий с термозащитным слоем из минералокерамических гранул наибольшие преимущества имеет плазменный метод. Технология нанесения защитных покрытий применительно к ремонту техники исследовалась в [1]. Однако при нанесении многослойных покрытий, работающих в условиях многократных тепловых ударов, требуется разработка и назначение технологических режимов с учетом выполнения эксплуатационных требований, главными из которых являются поддержание термостойкости покрытия при нахождении в зоне горения топлива с температурой 2200-2300 К, эрозионная стойкость и диффузионная прочность покрытия в условиях контактирования со струей факела пламени, содержащего агрессивные компоненты. Особенностью построения методик расчета технологических режимов является учет взаимосвязи между всеми этапами обработки плазменным методом и разработка новых покрытий и полировки поверхности минералокерамических гранул, позволяющих достичь требуемых эксплуатационных показателей де-

талей высокотемпературной зоны жидкостных ракетных двигателей.

Структура слоев покрытий с минералокерамическими гранулами

На рис. 1 показаны основные элементы многослойных покрытий.

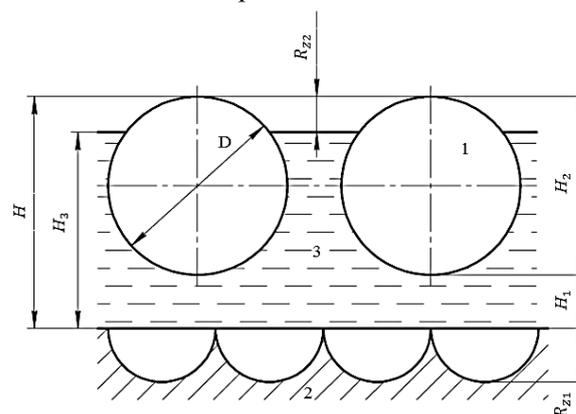


Рис. 1. Схема размещения слоев в покрытии

H - общая толщина покрытия;

H_1 - толщина подслоя;

H_3 - высота столба подслоя в канале;

R_{21} - величина микроуглублений в подложке;

R_{22} - высота микронеровностей покрытия;

D - диаметр гранулы.

1 - гранула; 2 - подложка; 3 - материал подслоя

При расчете режимов обработки сделан ряд допущений. Так, принято, что все минералокерамические гранулы имеют сферическую форму с постоянным диаметром D .

Реальные порошки, используемые для нанесения покрытий, имеют частицы, соизмеримые с толщиной наружного слоя (H_2 на рис. 1). Измерения показали, что сечение гранул изменяется от нескольких десятков до нескольких сотен микрон. Для получения достоверных результатов при оценке адекватности моделей использовались специально отобранные гранулы, у которых геометрия близка к сферической, а размеры изменяются в пределах 5%.

При расчете режимов учитывается, что толщина подслоя (H_1) в покрытии (H) снижается из-за перемещения части материала подслоя 3 в пространство между гранулами 1 до образования столба H_3 (рис. 1). Как показано в [1], подача металлических частиц (до 20 % к объему материала наружного слоя покрытия) может компенсировать выгорание материала подслоя в дуге плазмы.

Для создания требуемой адгезии подслоя с подложкой 2 (рис. 1) на ее поверхности создают искусственную шероховатость R_{z1} , а шероховатость покрытия R_{z2} зависит от положения в покрытии гранул 1 и при принятых допущениях оценивается как выступание их вершин ($H - H_3$).

Технологические режимы нанесения покрытий

Для получения качественного покрытия (рис. 1) необходимо назначить рациональные режимы на всех этапах выполнения операций нанесения и полировки покрытий, главными из которых являются:

- подготовка поверхности под покрытие, где требуется создать искусственную шероховатость R_{z1} . В настоящее время это выполняют пескоструйным методом, где используют режимы: материал абразива карбид кремния марки 54С с зернистостью F 20; расстояние от среза сопла до обрабатываемой поверхности 80 - 90 мм; угол атаки струи 50 - 70°; давление подачи воздуха с абразивом 0,5-0,6 МПа; подача детали относительно сопла 50-60 мм/мин.;

- нанесение подслоя: термореагирующий порошок ПТ-Ю10Н, выпускаемый по ТУ 14-1-3926-85, и ранее применяемый стандартный

порошок ПХ20Н80 56-26, выпускаемый по ГОСТ 13084-88. С учетом исследований [1], сила тока дуги плазматрона выбирается в пределах 340 - 360 А, напряжение 38 - 42 В, скорость перемещения вдоль зоны покрытия детали относительно сопла плазматрона 4,0 - 4,5 мм/об. Минимальная толщина подслоя 60 - 70 мкм.

Из рис. 1 видно, что для обеспечения работоспособности всех слоев покрытия должно выполняться условие:

$$H_{1\min} = H - D > R_{z1} . \quad (1)$$

Основным назначением подслоя является закрепление в нем гранул покрытия, поэтому его минимальная толщина не может быть менее высоты неровностей подложки. Для повышения адгезионной прочности покрытия желательно иметь минимальный подслоя. Однако полное его исключение невозможно, поскольку часть гранул может располагаться над выступами подложки и для их закрепления необходимо обеспечить заполнение материалом подслоя пространства между гранулами на высоту K_3D , где K_3 - коэффициент закрепления гранулы в покрытии. По [2] при изготовлении абразивного инструмента коэффициент закрепления не может быть меньше 2/3.

Тогда минимальная высота подслоя с учетом закрепления гранул составит:

$$H_{3\min} = H - R_{z2} + R_{z1} - H_1. \quad (2)$$

$H_{3\min}$ зависит от интенсивности капиллярного эффекта, вызывающего снижение уровня подслоя в каналах между гранулами. Поэтому величину $H_{3\min}$ оценивают через измерения H и R_{z2} .

При отработке режимов установлено, что для получения подслоя с толщиной 70-100 мкм расход порошка должен находиться в диапазоне от 35 до 45 г/мин. При нанесении покрытия расстояние от среза сопла до напыляемой поверхности назначается 80 - 90 мм. Тогда скорость напыления составляет от 400 до 460 мм²/мин.

Далее необходимо рассчитать или назначить режимы нанесения защитного (наружного) слоя, содержащего минералокерамические гранулы, а в некоторых случаях компоненты первого слоя (нихром и др.), содержание которых может достигать 20% и более. Расход ма-

материала подслоя W_{II} находится с учетом потерь на выгорание и рассеивание частиц. По [1] такие потери могут составлять до 30 - 40 % и более. Они оцениваются коэффициентом потерь K_n .

Тогда:

$$W_n = \frac{K_n \alpha H_{10}^2 F_c \gamma_n^2}{c(t_{nl} + \Delta t_{nl}) \gamma_c}, \quad (3)$$

где γ_c - сплошность материала подслоя перед его применением;

K_n - коэффициент, учитывающий пополнение объема подслоя за счет дополнительной подачи материала подслоя при нанесении наружного слоя. Такой компонент компенсирует потери материала подслоя за счет выгорания и других факторов.

С учетом этого расход материала W_n , наносимого на наружный слой покрытия, может быть оценен через расход материала подслоя W_{II} :

$$W_H \geq W_n \frac{\gamma_H H_2}{\gamma_n H_1}, \quad (4)$$

где H_1 - толщина подслоя в покрытии после нанесения наружного (защитного) слоя толщиной H_2 ;

γ_n - средняя плотность материала наружного слоя.

При нанесении наружного слоя необходимо обосновать размеры гранул, которые изменяются в широких пределах. Измерения показали, что этот диапазон составляет от нескольких микрон до 220 мкм. Сепарация покрытий перед нанесением слоев позволяет сузить диапазон изменения размеров до 10 - 20%.

Из [2] принято, что коэффициент закрепления K_3 зависит от диаметра гранул и не может быть меньше 0,6 - 0,7 их величины. Тогда выступающая часть гранул формирует высоту неровностей R_{z2} и по этим измерениям можно выявить рекомендуемый диаметр гранул D , который находят с учетом динамики эрозионного износа поверхностного слоя:

$$D = \frac{R_{z2}}{(1-K_3) + I_1 N}, \quad (5)$$

где I_1 - средний эрозионный износ покрытия после одного пуска;

N - нормированное количество пусков за период эксплуатации двигателей.

Выполненные расчеты и проведенные эксперименты позволили рекомендовать следующие режимы нанесения поверхностного слоя: сила тока дуги плазмотрона 380 - 420 А, напряжение 70 - 75 В, скорость перемещения сопла вдоль зоны покрытия 4,0 - 4,5 мм/оборот, материал гранул - минералокерамика из диоксида циркония с диаметром гранул эквивалентным 120 - 150 мкм.

Для снижения скорости износа покрытия при эксплуатации переходные участки полируют абразивным материалом, достигая снижения шероховатости R_a на этих участках до 2,5 мкм и ниже.

Гранулы имеют значительный разброс размеров, поэтому расчет припуска Z выполняют для наиболее крупных гранул, определяющих шероховатость поверхности после полировки:

$$Z = (1 - K_3) D - I_1 N. \quad (6)$$

На рис. 2 показано изменение высоты неровностей (R_a) от величины снятого припуска (Z).

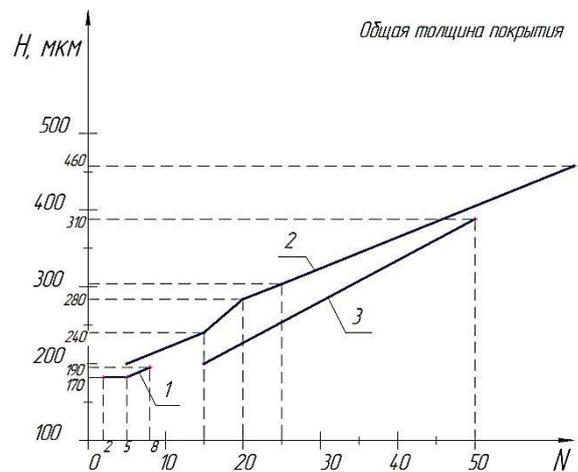


Рис. 2. Выбор припуска под полировку
1 - высота неровностей, требуемая на переходных участках покрытий;
2 - изменение высоты микронеровностей в зависимости от величины снятого припуска

Из рис. 2 следует, что для условий проведения экспериментов (зависимость 2 на рис. 2) заданная высота неровностей достигается при удалении слоя не менее 8 - 10 мкм. Увеличение припуска обеспечивает получение переходных участков с требуемой шероховатостью, но снижает эксплуатационные показатели покрытия. Поэтому рекомендуется назначать припуск под полировку в пределах 10 - 15 мкм.

Заключение

Разработанные технологические режимы и рекомендации по их использованию подтверждены при экспериментальной проверке результатов на образцах деталей и в процессе огневых испытаний на макетах камер сгорания ракетных двигателей, что дает основания рекомендовать их к использованию при проектировании технологических процессов плазменного нанесения многослойных термозащитных покрытий.

Литература

1. Кадырметов А.М. Управление технологическим обеспечением процессов плазменного нанесения покрытий в режиме модуляции электрических параметров. Воронеж: ИПЦ «Научная книга», 2013. 260 с.
2. Шумячер В.М., Славин А.В., Крюков С.А. Основы создания высокоэффективных абразивных инструментов. Волгоград: ВолГАСУ, 2015. 134 с.
3. Исаченко В.П., Осипова В.А., Сухомел А.С. Теплопередача. М.: Энергия, 1969. 440 с.

Поступила 28.11.2018; принята к публикации 04.02.2019

Сведения об авторах

Портных Александр Иванович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89081368109
Смоленцев Владислав Павлович – д-р техн. наук, профессор кафедры технологии машиностроения Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89036559970
Паничев Евгений Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), тел. 89081373537

PROCESS CONDITIONS FOR PLASMA LAYING OF MULTILAYER PROTECTIVE COATINGS

A.I. Portnykh, V.P. Smolentsev, E.V. Panichev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the conditions for the use of thermal protective multilayer coatings applied by atmospheric plasma spraying are considered. The scheme, methods of calculation and selection of technological modes of applying coatings, assigned according to operational requirements, are given, where the working conditions of parts with a thermal protective coating applied to high-temperature zones of aircraft engines are taken into account. The coatings consisting of several layers, the combination of which provides high adhesive strength and erosion resistance of the coated surface of the product, are considered. The purpose and effect of the metal underlayer on the formation of the main coating, as well as dependencies to determine its minimum value, ensuring the maximum performance of the coating, are shown. Based on the above mathematical dependencies, the choice of regime parameters for the movement of the plasma torch nozzle, the rational consumption of powder materials, the optimal size of the used granules and the energy parameters of spraying, as well as the amount of allowance for polishing the transitional areas of the coating is justified. When developing modes for the first time, features of the flow of molten metal of the coating sublayer were taken into account for the formation of technological indicators of the process of applying a two-layer coating, the outer layer of which contains mineral-ceramic granules based on oxide ceramics

Key words: technological modes, plasma coating, heat coatings, granules, layers, capillarity

References

1. Kadyrmetov A.M. “Management of technological control of processes of plasma laying of coatings in the mode of modulation of electrical parameters” (“Upravlenie tekhnologicheskim obespecheniem protsessov plazmennogo naneseniya pokrytiy v rezhime modulyatsii elektricheskikh parametrov”), Voronezh, nauchnaya kniga, 2013, 260 p.
2. Shumacher V.M., Slavin A.V., Kryukov S.A. “Bases of creation of highly effective abrasive instruments” (“Osnovy sozdaniya vysokoeffektivnykh abrazivnykh instrumentov”), Volgograd, VolGASU, 2015, 134 p.
3. Isachenko V.P., Osipova V.A., Sukhomel A.S. “Heat transfer” (“Teploperedacha”), Moscow, Energiya, 1969, 440 p.

Submitted 28.11.2018; revised 04.02.2019

Information about the authors

Aleksandr I. Portnykh, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 89081368109
Vladislav P. Smolentsev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 89036559970
Evgeniy V. Panichev, Graduate Student, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh 394026, Russia), tel. 89081373537

ФОРМООБРАЗОВАНИЕ ПАНЕЛЕЙ КРЫЛА ДАЛЬНЕМАГИСТРАЛЬНОГО САМОЛЕТА

Д.С. Гребенников¹, В.И. Максименков²

¹ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлен анализ конструктивных особенностей основных типов длинномерных панелей крыла современных самолетов, оказывающих влияние на трудоемкость формообразования. Описана природа возникновения эффекта упругого пружинения, негативно влияющего на трудоемкость процессов формообразования и их точность. Рассмотрены основные методы формообразования панелей одинарной и двойной кривизны, такие как свободная гибка на прессовом оборудовании, гибка–прокатка на валковых машинах и дробеударное формообразование, выявлены их основные достоинства и недостатки. Разработан метод, предусматривающий локальный нагрев участка панели перед гибкой на прессовом оборудовании, позволяющий сократить трудоемкость процесса гибки за счет значительного снижения величины упругого пружинения, что влечет за собой сокращение доводочных работ. Рассмотрено с точки зрения энергетической эффективности существующее оборудование для нагрева длинномерных панелей. Разработана установка для нагрева заготовки инфракрасным излучением, оснащенная в качестве нагревательных элементов кварцевыми лампами. Проведен анализ эффективности предложенного метода, показавший значительное сокращение влияния эффекта упругого восстановления на процесс гибки заготовки с помощью пресса

Ключевые слова: панель, формообразование, пружинение, гибка, нагрев

Введение

В конструкции крыла средне- и дальнемагистральных самолетов находят применение длинномерные панели. По сравнению с листовыми обшивками они обеспечивают снижение трудоемкости сборки крыла за счет сокращения количества стыков, а также повышение точности аэродинамической поверхности крыла. Однако следует отметить, что вопросы совершенствования технологии изготовления длинномерных панелей с высокой точностью требуют проведения дополнительных исследований.

Постановка задачи

Анализ технологии изготовления длинномерных панелей и разработка метода формообразования панелей, обеспечивающего повышение точности элементов аэродинамической поверхности, снижение трудоемкости их изготовления.

Конструктивные особенности панелей

В зависимости от типа конструкции панели крыла делятся на монолитно-сборные (а) и монолитные (б), рис. 1.

В монолитных панелях обшивка выполнена как единое целое с элементами силового набора, они изготавливаются фрезерованием из плит, прессованием, прокаткой, горячей штамповкой и литьем. Монолитные панели имеют ряд преимуществ перед монолитно-сборными: меньшее количество сборочных деталей, повышенная герметичность и жесткость крыльев, улучшение качества поверхности и усталостных свойств конструкции за счет отсутствия отверстий [1].

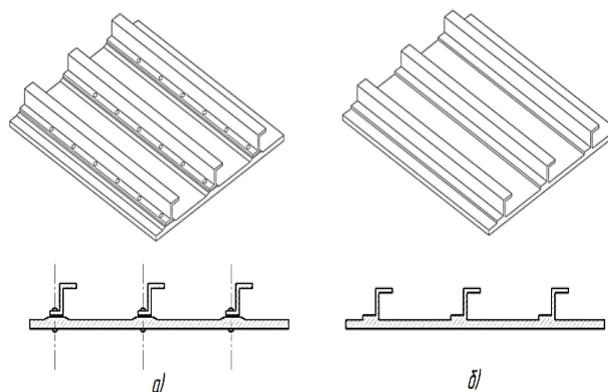


Рис. 1. Классификация панелей

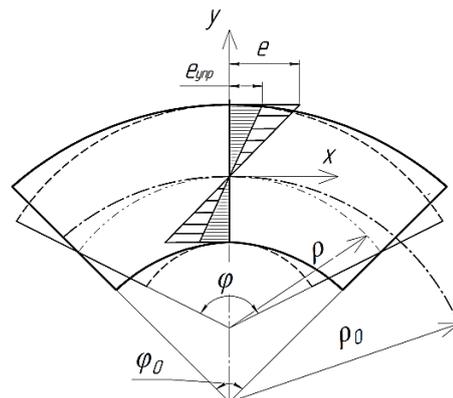
К недостаткам монолитных панелей следует отнести малый коэффициент использования материала и высокая трудоемкость при изготовлении, сложность технологического процесса формообразования.

Монолитно-сборные – это панели, к обшивкам которых заклепками или точечной сваркой крепят элементы силового набора: стрингеры, ребра жесткости, стыковочные профили. В качестве элементов силового набора используются гнутые профили из листового материала и получаемые методом прессования и прокатки. Обшивки таких панелей представляют собой детали с гладкой наружной поверхностью и внутренним набором, представляющим собой усиления под продольные и поперечные элементы каркаса, карманы, люки. Толщина обшивки чаще всего переменна и меняется от долей миллиметра до 30 миллиметров и более. Длина панелей может достигать 20 м и более, ширина до 2 м.

Заготовками для изготовления обшивок и монолитных панелей являются плиты, полученные прокаткой. Основным видом механической обработки при изготовлении обшивок является фрезерование торцовыми, концевыми и специальными фрезами. Режимы резания выбирают исходя из материала заготовки. Под действием изгибающего момента, возникающего в полете, верхние панели крыла нагружены циклическими сжимающими усилиями, а нижние – растягивающими. В связи с этим для верхних сжатых панелей используются высокопрочные материалы, хорошо работающие на сжатие, наиболее распространенным из которых является В950чТ2. Для нижних панелей применяются материалы, имеющие высокие усталостные характеристики, такие как Д16Т.

Анализ напряженно-деформированного состояния панелей при формообразовании

На рис. 2 представлена схема деформаций заготовки во время формообразования. Как известно, при данном типе нагружения, внутренние слои подвергаются сжатию, наружные – растяжению [2]. В связи с тем, что панели крыла имеют большие радиусы кривизны, порядка 3000 – 5000 мм, деформации, возникающие в заготовке, невелики и имеют значительные упругие составляющие.



e – деформации панели;
e_{упр} – упругие составляющие деформаций;
 φ , ρ – угол изгиба и радиус кривизны панели под нагрузкой;
 φ_0 , ρ_0 – остаточные угол и радиус после снятия нагрузки.

Рис. 2. Схема деформаций при изгибе

В результате возникшие упругие напряжения приводят к частичному возврату заготовки к исходной форме после разгрузки. Этот процесс называется пружинением и является основной проблемой при обеспечении точности кривизны полотна панелей.

Следует сказать, что большинство классических теорий, учитывающих пружинение, относится к однородному по толщине материалу. В связи с чем использование их для конструкций с переменной толщиной не приемлемо, так как это приводит к неточности в расчете.

Для сечений с переменной толщиной весьма сложной задачей является определение положения нейтрального слоя, который смещается при нагружении в сторону сжатой зоны. Имеющиеся в настоящее время численные программные методы обладают существенными ограничениями. Либо метод применим для численного расчета в области упругих или упруго-пластических деформаций, либо для численного расчета в области пластических деформаций, что ограничивает возможность численного расчета пружинения при малых углах, где присутствуют все три области [3]. Поэтому процесс формообразования панелей крыла часто включает в себя доводку контура, наиболее трудоемкий и длительный этап.

Технологии формообразования панелей

Основным методом формообразования панелей одинарной кривизны является открытая гибка, рис. 3.

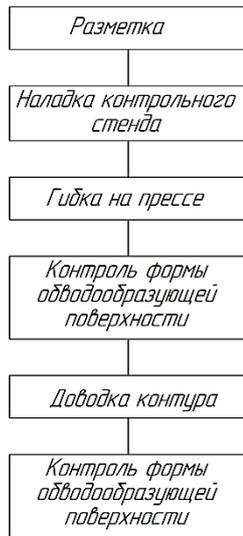


Рис. 3. Схема технологического процесса гибки панелей на прессе

Гибка может осуществляться на прессовом оборудовании, например СПП–250М. Пресс оснащен системой ЧПУ с гидравлической следящей системой, обеспечивающей позиционирование главного ползуна с погрешностью не более 0,1 мм. Придание нужной формы происходит путем плавного многократного нажатия на панель в местах утолщений с постепенной доводкой контура и может осуществляться в автоматическом и ручном режиме. Подобное оборудование для последовательного формообразования панелей по управляющей программе выпускается и за рубежом такими фирмами, как «Verson – LCM», «Hammerly», «Sheridan – Grey». После предварительной гибки панель укладывается на стенд с шаблонами по контрольным сечениям, рис. 4.

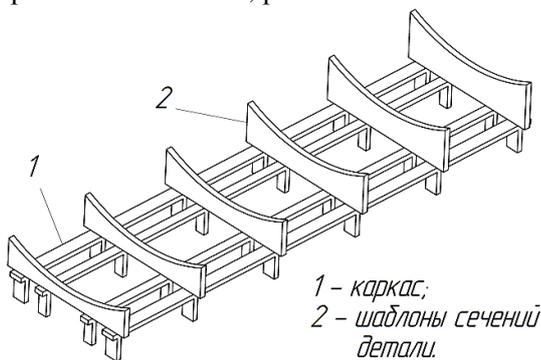


Рис. 4. Схема контрольного стенда

На панели выявляются не прилегающие к шаблонам места, после чего она опять возвращается на пресс, где происходит повторная гибка, эти операции повторяются несколько раз. Основные недостатки свободной гибки:

большая трудоемкость и длительность процесса формообразования, отсутствие стабильности, связанное с эффектом пружинения, потребность в высокой квалификации персонала.

Для формообразования панелей двойной кривизны используют комбинированные методы, включающие получение продольной кривизны путем гибки на прессе или гибки–прокатки на валковой машине и получение поперечной кривизны с помощью дробеударного формообразования (ДУФ).

Формообразование панелей с помощью гибки–прокатки на валковых листогибочных машинах отличается от гибки на прессе более высокой производительностью, повысить которую также позволяет внедрение валковых машин, оснащенных ЧПУ, обеспечивающих высокую точность позиционирования нажимного вала и ликвидирующих необходимость остановок для замера кривизны и корректировки положения нажимного вала. К недостаткам можно отнести ограничения по габаритам заготовки до 15 метров, сложности при обработке монолитных панелей с мощными подкрепляющими элементами. Кроме того, детали, полученные с помощью данного метода, также подвержены упругому восстановлению исходной формы, что приводит к потребности в доводочных работах с помощью дробеударного формообразования.

Дробеударное формообразование осуществляется путем соударения потока дроби с обрабатываемой поверхностью детали, установленной против потока дроби, исходящего из соплового аппарата [4]. В результате силового воздействия деформирующей среды на поверхности панели образуются лунки и происходит продольное удлинение поверхностного слоя, возникающие при этом остаточные сжимающие напряжения в поверхностном слое приводят к деформации заготовки, рис. 5.

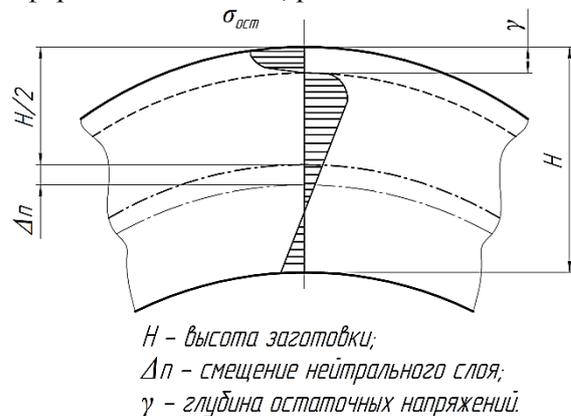


Рис. 5. Схема напряженно-деформированного состояния при ДУФ

К технологическим преимуществам метода ДУФ можно отнести: отсутствие ограничений по габаритам заготовок, высокая точность, полное отсутствие эффекта частичного упругого восстановления исходной формы, поверхностное упрочнение детали, улучшающие ресурсные характеристики.

Применение ДУФ в качестве основной технологической операции возможно только для деталей типа монолитных ребристых панелей, при направлении ребер жесткости, совпадающем с линиейгиба, когда жесткость ребрения значительно больше жесткости полотна. В других случаях образование поперечной кривизны детали сопровождается возникновением таких нежелательных деформаций, как искривление детали в продольном направлении и крутка сечений [5]. При больших толщинах возможно появление трещин, поэтому утолщения панелей перед дробеударной обработкой подгибают на гибочных прессах.

В итоге можно сказать, что свободная гибка, несмотря на ее недостатки, является наиболее универсальным и распространенным в производстве способом формообразования панелей. Она применяется и как самостоятельный процесс для получения панелей одинарной кривизны, и как предварительный для подгибки мест усиления перед дробеударным формообразованием панелей двойной кривизны. Основное достоинство – это возможность обработки крупногабаритных заготовок, кроме того для гибки панелей, имеющих усиления толщиной 30 миллиметров и более, прессовый метод является единственным возможным.

Предлагаемый метод формообразования панелей

Для повышения производительности, точности и стабильности процесса свободной гибки предлагается проводить предварительный локальный нагрев деформируемой области заготовки на прессе непосредственно перед формообразованием, с помощью нагревательной установки с инфракрасными излучателями, рис. 6. Рост температуры заготовки влечет за собой повышение ее пластичности, что позволит сократить упругие составляющие деформаций, а следовательно, снизить величину пружинения.

Инструкция ВИАМ 1021 предусматривает локальный нагрев заготовок из материалов В95, В95оч, В95пч, В93, но не предусматривает способ нагрева.

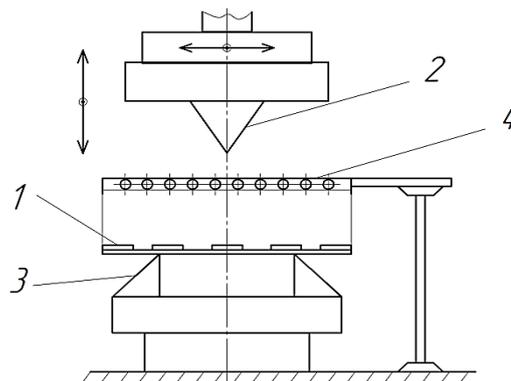


Рис. 6. Нагрев панели перед гибкой
1 – панель; 2 – пуансон; 3 – опоры; 4 – установка для нагрева

Существует метод, который предусматривает (ПИ 1.2.255-83) локальный нагрев части панели в печи камерного типа, после чего панель перемещается на пресс, где происходит гибка нагретого участка. Данный процесс сопровождается большими потерями энергии во время нагрева, так как конструкция печи не позволяет полностью изолировать теплоноситель, а именно горячий воздух, от окружающей среды. Температура падает также при транспортировке от печи к прессу и во время формообразования, ввиду чего процесс обладает низкой стабильностью. Поэтому данная технология в настоящее время не применяется.

Сущность обогрева излучением, и одновременно его преимущество, заключается в передаче тепловой энергии от источника излучения непосредственно нагреваемому объекту без участия теплоносителя (воздуха) и, как следствие, потерь на нагрев окружающей среды.

Разработана установка, где нагрев заготовки осуществляется с помощью кварцевых ламп. Этот тип излучателей имеет самый низкий показатель времени разогрева до рабочей температуры, поэтому лучше подходит для часто прерываемых процессов нагрева. Энергетические возможности установки позволяют осуществлять формообразование заготовок из алюминиевых, титановых сплавов и нержавеющей сталей. Недостаток установки в том, что применяемые нагревательные элементы требуют охлаждения в процессе эксплуатации и необходимо организовать подвод проточной воды, что ограничивает передвижение установки по цеху. Одно из направлений исследований по устранению недостатков метода формообразования с локальным нагревом – это создание новых оригинальных средств нагрева заготовок.

Для анализа влияния температуры на упругое пружинение заготовки после формообразования было проведено моделирование процессов гибки на опорах с помощью программного комплекса. Модель заготовки шириной 1500 мм и толщиной 4 мм из материала В950чТ2 была деформирована до радиуса 3000 мм, а затем разгружена при температуре материала 20 °С и 150 °С.

В итоге при температуре 150 °С величина пружинения заготовки оказалась значительно ниже, чем при температуре 20 °С. Полученные результаты носят ориентировочный характер ввиду ранее указанных ограничений, для получения более точных результатов планируется проведение комплекса натурных испытаний.

Заключение

1. В ходе анализа технологического процесса формообразования длинномерных панелей крыла самолета установлено, что одним из основных факторов, негативно влияющих на трудоемкость и длительность процесса, является упругое пружинение заготовки после разгрузки.

2. Разработан метод формообразования с предварительным локальным нагревом панели,

позволяющий, как показало компьютерное моделирование, снизить величину пружинения. Данный метод позволит сократить объем доводочных работ, за счет чего снижается трудоемкость и длительность процесса формообразования длинномерных панелей, а как следствие, и их себестоимость.

Литература

1. Абибов А.Л., Бирюков Н.М., Бойцов В.В. Технология самолетостроения. М.: Машиностроение, 1982. 551 с.
2. Безухов Н.И. Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1968. 512 с.
3. Сапрыкин Б. Ю. Анализ способов расчета пружинения листовых материалов // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. № 2. С. 133–139.
4. РТМ 1171-69. Дробеударное формообразование обшивок одинарной кривизны из монолитных ребристых панелей. М.: НИИАТ, 1969. 32 с.
5. Пашков А.Е., Малашенко А.Ю. Об автоматизации процесса гибки–прокатки деталей типа обшивок крыла в комбинированном процессе формообразования // Вестник ИрГТУ. 2011. № 11. С. 37-42.
6. Технология изготовления окантовок фонаря кабины среднемагистрального самолета АН-148 / В.И. Максименков, А.А. Коротков, А.С. Джибилов, М.В. Молод, В.И. Федосеев // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 12.2. С. 97-99.

Поступила 29.10.2018; принята к публикации 04.02.2019

Информация об авторах

Гребенников Дмитрий Сергеевич – инженер-технолог, ПАО «Воронежское акционерное самолетостроительное общество» (394029, Россия, г. Воронеж, ул. Циолковского, 27), e-mail: grebennikov_dmitrij@mail.ru

Максименков Владимир Иванович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

SHAPING WING PANELS OF A LONG-HAUL AIRCRAFT

D.S. Grebennikov¹, V.I. Maksimenkov²

¹**Voronezh Aircraft Company, Voronezh, Russia**

²**Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia**

Abstract: the analysis of the design features of the main types of long wing panels of modern aircraft, affecting the complexity of shaping, is presented. The nature of the elastic springback effect, which negatively affects the labor intensity of the shaping processes and their accuracy, is described. The main methods of forming single and double curvature panels are considered, such as free bending on press equipment, bending, rolling on roller machines and shot hammering, their main advantages and disadvantages are revealed. A method has been developed that provides for local heating of a section of the panel before bending on press equipment, which allows reducing the laboriousness of the bending process due to a significant decrease in the value of elastic springing, which entails a reduction in finishing work. The existing equipment for heating long panels is considered from the point of view of energy efficiency of. An installation for heating the workpiece with infrared radiation, equipped with quartz lamps as heating elements, has been developed. The analysis of the effectiveness of the proposed method was carried out, which showed a significant reduction in the effect of elastic recovery on the process of bending the workpiece using a press

Key words: panel, shaping, springback, bending, heating

References

1. Abibov A.L., Biryukov N.M., Boytsov V.V. "Technology of aircraft construction" ("Tekhnologiya samoletostroeniya"), Moscow, Mashinostroenie, 1982, 551 p.
2. Bezukhov N.I. "Fundamentals of the theory of elasticity, plasticity and creep" ("Osnovy teorii uprugosti, plastichnosti i polzuchesti"), Moscow, Vysshaya shkola, 1968, 512 p.
3. Saprykin B.Yu. "Analysis of methods for calculating the springing of sheet materials", *News of Moscow State Technical University MAMI (Izvestiya Moskovskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta MAMI)*, 2013, no. 2, pp. 133-139.
4. RTM 1171-69 "Shot impact forming of single curvature skins from monolithic ribbed panels" ("Drobeudarnoe formoobrazovaniye obshivok odinarnoy krivizny iz monolitnykh rebristykh paneley"), Moscow, NIIAT, 1969, 32 p.
5. Pashkov A.E., Malashchenko A.Yu. "On automation of the process of bending-rolling parts of the type of wing skins in the combined process of forming", *Bulletin of ISTU (Vestnik IrGTU)*, 2011, no. 11, pp. 37-42.
6. Maksimenkov V.I., Korotkov A.A., Dzhibilov A.S., Molod M.V., Fedoseev V.I. "Manufacturing techniques for the edging of the lantern of the cabin of the medium-haul AN-148", *The Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 12.2, pp. 97-99.

Submitted 29.10.2018; revised 04.02.2019

Information about the authors

Dmitriy S. Grebennikov, Industrial Engineer, Voronezh Aircraft Company (27 Tsiolkovskogo str., Voronezh 394029, Russia), e-mail: grebennikov_dmitrij@mail.ru

Vladimir I. Maksimenkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: maksimenkov.v.i@mail.ru

АНАЛИЗ СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ ФИНИШНЫХ МЕТОДОВ ОБРАБОТКИ В СРЕДЕ СВОБОДНЫХ АБРАЗИВОВ ДЕТАЛЕЙ, ИМЕЮЩИХ МАЛЫЕ ПАЗЫ И ОТВЕРСТИЯ

М.А. Тамаркин¹, Е.В. Смоленцев², Е.Н. Колганова¹

¹Донской государственный технический университет, г. Ростов-на Дону, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: обосновывается актуальность исследований отделочно-зачистной обработки малоразмерных деталей радиоэлектронной аппаратуры. Приводятся данные о сложных технологических задачах такой обработки. Представлен обзор способов съема заусенцев и скругления острых кромок деталей в среде свободных абразивов. Показано, что виброабразивная обработка является наиболее эффективным методом удаления заусенцев у малоразмерных деталей со сложноступенными поверхностями и имеет ряд преимуществ перед прочими способами, так как обработка подобных деталей представляет собой сложную задачу в связи с затруднением доступа рабочей среды и загибанием заусенцев внутрь пазов и отверстий. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований вибрационной обработки деталей с малыми пазами и отверстиями в различных средах, в том числе и органических, в виде зависимостей времени съема заусенца от механических свойств обрабатываемого материала, толщины заусенца у основания и характеристик рабочей среды. Проведенные эксперименты подтвердили возможность исследования обработки в средах органического происхождения с применением смешанных гранул разного размера с небольшим удельным весом. Ставятся задачи исследования по повышению эффективности вибрационной обработки малоразмерных деталей, имеющих пазы и отверстия

Ключевые слова: вибрационная обработка, среда органического происхождения, шероховатость, микронеровность поверхности, заусенцы, скругление кромок

Введение

С развитием машиностроения все более возрастает сложность машин и приборов. В настоящее время миниатюризация деталей и изделий в различных отраслях техники, и особенно в приборостроении, выдвигает актуальную проблему повышения и обеспечения их надежности, долговечности и качества.

Современные методы компоновки и продолжающееся усложнение радиоэлектронной аппаратуры (РЭА), уменьшение материалоемкости и потребления энергии этой аппаратурой являются важнейшим фактором, ведущим по пути уменьшения диаметральных и линейных размеров комплектующих. В конструкцию современных приборов входят группы высокоточных деталей, надежность которых в большей степени определяет долговечность работы всего прибора. Существенное количество подобного рода деталей обладают сложной формой, миниатюрными размерами, ограниченной жесткостью, пазами и отверстиями сложной конфигурации в труднодоступных местах, а также высокими требованиями к параметрам качества поверхности и поверхностного слоя.

Одной из основных причин выхода из строя приборов РЭА являются дефекты изготовления деталей, образующиеся в результате формообразования их поверхностей. Заусенцы затрудняют сборку изделий, приводят к повреждению сопрягаемых поверхностей и проводов и в конечном итоге к нарушению эксплуатационных характеристик прибора. Острые кромки деталей РЭА являются концентраторами напряжений и способствуют разрушению самих деталей и контактирующих поверхностей. Согласно международному и отраслевым стандартам [1, 2] все заготовки должны быть очищены от окалины, заусенцы удалены, острые кромки притуплены. Недостаточная подготовка поверхности деталей перед нанесением покрытия (заусенцы, острая кромка, наличие загрязнений) приводит к ухудшению адгезии, образованию наростов на поверхности деталей.

Постановка задачи и её особенности

Высокопроизводительная обработка деталей с труднодоступным расположением поверхностей является сложной технологической задачей [3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10]. Процесс скругления кромок и съема заусенцев на заготовках с труднодоступными поверхностями представля-

ет определенные трудности вследствие большого многообразия форм контуров, необходимости удаления материала на небольших участках, не затрагивая при этом основной его части, и др.

Особые трудности вызывает обработка сложнопрофильных внутренних поверхностей малого диаметра и размера, так как от размеров обрабатываемых деталей и труднодоступности снимаемых заусенцев зависит доступ абразивных частиц технологической среды к различным участкам поверхностей и соответственная интенсивность обработки. У малоразмерных деталей, имеющих малые глухие карманы, отверстия, пазы и углубления, интенсивность обработки низкая, возникает необходимость более тщательного подбора размера и формы частиц технологических сред. Удаление заусенцев и обработка подобных деталей отлична от обработки легкодоступных поверхностей своей резко обозначенной не стационарностью, уровень которой, в свою очередь, оказывает значительное влияние на определение необходимых режимов процессов обработки и выбор оборудования. В связи с этим выбору технологии обработки и необходимого оборудования должен предостоять детальный анализ закономерностей, характерных процессу обработки сложно доступных пазов и отверстий деталей.

Одними из главных задач современного приборостроения являются повышение производительности труда и качества приборов РЭА, снижение трудоемкости и себестоимости выпускаемой продукции. Одним из путей реализации данных задач в машино- и приборостроении является интенсификация существующих методов слесарной обработки деталей за счёт их автоматизации. Автоматизация слесарных операций является довольно сложной проблемой. В настоящий момент большое число слесарных операций остается неавтоматизированными.

На решение данных задач направлено внедрение методов обработки абразивными гранулами для таких операций, как съём заусенцев и скругление острых кромок для деталей практически любых форм и размеров. Одним из методов отделочной обработки заготовок является абразивная обработка. Однако более распространённые методы обработки закреплённым абразивом, такие как шлифование, хонингование, притирка, доводка и др., применимы, в основном, для отделочных операций простых по форме деталей, в то время как об-

работка в среде свободного абразива (вибрационная обработка (ВиО), центробежно-ротационная обработка (ЦРО), турбоабразивная обработка (ТАО), струйноабразивная обработка (САО) и другие) позволяет повысить производительность по сравнению с ручной и даёт возможность при минимальных затратах обрабатывать детали практически любой формы и размеров. Тем не менее широкое внедрение и дальнейшее совершенствование данных методов и их интенсификация сдерживаются недостаточной их изученностью и отсутствием способов для обработки отдельных типов деталей, в результате чего ряд из перечисленных выше операций выполняется вручную или малопродуктивными средствами. Например, обработка труднодоступных участков деталей, зачистка маложестких деталей и поверхностей, повреждение которых при взаимном столкновении в процессе обработки недопустимо, скругление острых кромок и зачистка поверхностей на мелкоразмерных деталях с малыми пазами и отверстиями.

Обзор финишных методов обработки в среде свободных абразивов

Съём заусенцев в труднодоступных местах детали и скругление острых кромок детали с помощью свободных абразивных частиц может производиться нижеперечисленными способами.

1. Обработка сложных фасонных поверхностей и отверстий деталей осуществляется воздушно-абразивными или воздушно-жидкостно-абразивными струями [11]. При обработке отверстий в струйном аппарате щелевидные сопла располагаются веером. Абразивная среда поступает в струйный аппарат, частицы с помощью энергии сжатого воздуха движутся со скоростью 100–200 м/с и рассеиваются в виде струи. Такие струйные аппараты применяют лишь при самых тонких доводочных операциях, где поверхность соприкосновения струи с атмосферным воздухом относительно велика, вследствие чего кинетическая энергия абразивной частицы уменьшается и съём металла сокращается. Струя абразивных частиц, соударяясь с поверхностями детали, обрабатывает их. К главным технологическим факторам, влияющим на результаты обработки, относят давление сжатого воздуха, зернистость и тип абразивного материала, угол соударения струи, а также время обработки.

2. Для проведения отделочно-зачистных работ также применяют ударную обработку, такие методы, как дробеструйный, гидropескоструйный и гидрокавитационный. Известны также дробеметный, гидрокавитационно-абразивный, пескоструйный, пневмодробеструйный, пневмошариковый и пневмопластмощариковый методы обработки [12]. Ударные методы широко распространены в промышленности. Они применяются для зачистки и упрочнения заготовок средних и больших размеров. Ударные методы эффективны при упрочняющих и иных методах отделочно-зачистной обработки, но не могут применяться при обработке деталей из мягких материалов и маложестких деталей, имеющих малые размеры.

3. При обработке внутренних поверхностей детали на порцию абразивного материала воздействуют встречно направленными спиралевидными потоками сжатого воздуха, в результате чего абразивный материал начинает вращаться и образует кольцо, которым ведется струйная обработка. Сжатый воздух направляется спиралевидно вдоль обрабатываемых поверхностей в одну сторону и одновременно с этим изменяется противоположно по фазе интенсивности потока энергоносителя [13]. В зависимости от выбора рабочей среды (стальные шарики, абразивные частицы и т.п.) обеспечивается либо очистка и полировка, либо упрочнение обрабатываемой поверхности детали.

4. Известен способ, когда для съема заусенцев у малоразмерных деталей в качестве технологической среды применяют кристаллы льда [14]. Данный процесс ведется с применением ультразвуковых волн. В качестве технологической среды применяются кристаллы льда, непрерывно подающиеся с технологической жидкостью в течение всей обработки, размер кристаллов льда применяется равным 0,08-0,18 мм. Также температура технологической жидкости, например воды, поддерживается в диапазоне (+1...+3) °С.

Кристаллы льда образуются путем распыления струи воды потоком воздуха в объеме морозильной камеры. Данный процесс предназначен для использования в отделочных операциях мелкогабаритных деталей машин и приборов, производимых преимущественно из легких сплавов и полимеров, имеющих низкий предел прочности и модуль упругости. Установлено, что при использовании кристаллов льда, соответствующими размеру зерен абразива, происходит достаточно интенсивное разрушение за-

усенцев, но не удается полностью их устранить и сформировать достаточный радиус скругления кромок (0,05 и 0,1 мм соответственно). В случае применения более крупных кристаллов эффект по скруглению кромок еще меньше (0,03 и 0,1 мм). Видимо, это связано с исходной округлой формой кристаллов и их таянием, вследствие чего они не обладают достаточно острыми вершинами и кромками, характерными для абразивных частиц, и не способны эффективно резать обрабатываемый материал. В случае применения мелких кристаллов уменьшение заусенцев проходит малоинтенсивно, а скругление кромок не происходит вовсе. Это связано с таянием мелких частиц льда в воде, что резко снижает их концентрацию и не может достаточно эффективно восполняться подачей новых частиц. Также наиболее близким является способ кавитационно-абразивного удаления заусенцев, основанный на эффектах повышения эрозионных и кавитационных активностей акустического поля, при котором детали помещаются в технологическую жидкость, содержащую определенную концентрацию твердых частиц абразива, в объеме которой возбуждают ультразвуковые колебания [15].

5. Также для удаления заусенцев и скругления кромок применяется анодно-абразивный способ, обработка ведется в среде электролита и абразивного наполнителя, которые находятся во вращающемся цилиндрическом барабане, где также размещен электрод. При этом барабан и электрод подключены к разноименным полюсам источника технологического напряжения, отличающегося тем, что обработку осуществляют с использованием электрода, выполненного в виде отражателя в виде криволинейной формы [16]. При вращении с заданной частотой барабана возникающие центробежные силы прижимают обрабатываемые детали, абразивный наполнитель и электролит к перфорированной обечайке, которые с большой скоростью перемещаются к отражателю. Данный способ обладает рядом недостатков: конструктивная сложность установки, обработка не токопроводящих материалов невозможна.

6. В обрабатываемое отверстие детали помещают гранулы между двумя уплотнителями, образуя таким образом рабочую камеру, посредством уплотнителей рабочую среду сжимают (1-2 МПа). После этого её перемещают вдоль оси канала обрабатываемой поверхности, вместе с этим технологической среде сообщают амплитудные колебания и силовые

импульсы [17], что дает возможность обрабатывать детали переменного сечения по длине, а также имеющие форму эллипса в поперечном сечении.

7. Известен способ центробежной обработки внутренних поверхностей мелкогабаритных деталей в контейнерах с планетарным вращением, в частности, для полирования стенок каналов втулок, колец, труб [18]. Для данной обработки применяют контейнер, которому сообщается планетарное вращение вокруг параллельных осей в противоположных направлениях. Технологическая среда загружается внутрь канала обрабатываемых деталей, закрываемых с одной стороны технологической заглушкой. Перед обработкой детали устанавливаются радиально в посадочные гнезда контейнера с жесткой фиксацией и наклоном к оси собственного вращения контейнера, обеспечивая циклическое осевое перемещение рабочей среды вдоль обрабатываемых поверхностей канала.

8. Через каналы в детали возвратно-поступательным движением многократно прокачивают абразивную массу под давлением 1,5-15 МПа [19, 20, 21]. С целью повышения качества обработки направляющий элемент берут с отверстиями, плавно расширяющимися от торцовых поверхностей.

9. Известен способ, когда для отделочной обработки отверстий деталей, в них помещают абразивную среду [22], подаваемую на обрабатываемые поверхности с помощью специального приспособления. Данное устройство находится на конце вала, который совершает вращательное движение. Кроме лопаток, расположенных по периферии, устройство имеет параллельную ось вращения. Во время вращения устройства периферийные лопатки подбирают абразивные зерна, лежащие на дне обрабатываемого отверстия, и подбрасывают их к верхней части полости. После соударения с ней, абразивная смесь падает частично на лопатки, которые меняют направление их движения к боковым стенкам.

10. Для обработки внутренних поверхностей и съема заусенцев применяют струйно-абразивную обработку. Технологическая схема процесса на основе вихревого закручивания потока суспензии позволяет увеличить тангенциальные составляющие скорости движения струи, что даёт возможность повысить производительность процесса [23].

11. Также известен способ, когда отверстие обрабатываемой заготовки заполняется жидкостью, имеющей свойство затвердевать в магнитном поле. После этого жидкость отводят вместе со стружкой в сборник стружки, после чего воздействие магнитного поля прекращается [24].

12. Для удаления заусенцев в отверстиях используют процесс магнитоабразивной обработки, при котором в зазор, образованный между отверстием и индуктором размещают ферроабразивный порошок. Устройство магнитоабразивной обработки приводят во вращение вокруг собственной оси и в планетарное движение. Индуктору также придается осевое колебательное движение [25].

13. Для обработки сложно доступных поверхностей заготовок применяется процесс вибрационной обработки. Абразивные частицы совершают колебательное движение в вибрирующей среде одновременно с обрабатываемыми деталями [26, 27, 28].

14. Центробежно-ротационная отделочно-зачистная обработка отверстий (ЦРО), основанная на формировании тороидального потока абразивных частиц. Технологическая среда вместе с обрабатываемыми заготовками совершает спиралевидное движение. Характерной чертой ЦРО является то, что частям технологической массы рабочего резервуара, которая контактирует с вращающимся дном, сообщается дополнительное движение частиц относительно заготовок путем периодического реверсивного движения дна станка в течение цикла обработки [29].

Благодаря высокой производительности и обширным технологическим возможностям методов обработки в среде свободных абразивов, а также и возможности автоматизации процесса обработки деталей сложных конфигураций из различных материалов при проведении отделочно-зачистных операций их ставят в число наиболее используемых способов финишной обработки деталей. Однако по-прежнему существует необходимость продолжать всесторонние исследования, способствующие широкому внедрению данных процессов в производство. Наиболее перспективной технологией отделочной обработки деталей с малыми внутренними сложнопрофильными поверхностями является вибрационная обработка в среде свободного абразива, которая позволяет обеспечивать необходимую эффективную скорость перемещения абразивной среды для тел с

малой массой и низкой жесткостью. В настоящее время проведён большой объём работ в области обработки заготовок сложной формы в среде свободных абразивов [3, 4, 8, 27]. В течение последних лет многие из этих способов были подробно исследованы. Однако обработка деталей, имеющих малые пазы и отверстия с труднодоступным расположением заусенцев значительно усложнена и исследована недостаточно полно. Нельзя не заметить, что основной причиной, затрудняющей широкое использование данного процесса, является отсутствие актуальной и достоверной информации по режимам обработки подобных деталей с помощью абразивных рабочих сред. Малые размеры и загибание заусенцев внутрь пазов и отверстий также являются серьезной помехой для получения требуемых относительных скоростей рабочих тел технологической среды в процессе обработки. Следует добавить, что в настоящий момент не описана математическая модель технологии, позволяющая определить параметры процесса взаимодействия рабочего тела с поверхностью отверстия, если последнее имеет размеры, сопоставимые с размерами элементов среды.

Следует отметить, что такие детали широко распространены в различных отраслях промышленности, особенно на радиотехнических предприятиях, поэтому успешные результаты данной работы будут иметь важное научное и прикладное значение. Предлагаемая тема исследований является актуальной и обладает научной новизной, т.к. вопросы отделочно-зачистной обработки малых пазов и отверстий деталей до сих пор не решены.

Экспериментальное определение времени удаления заусенца

С целью получения сравнительной оценки технологической эффективности вибрационной обработки в среде свободных абразивов нами были проведены экспериментальные исследования, которые состояли в обработке заготовок деталей - представителей одного из приборостроительных предприятий. Основная продукция данного предприятия включает в себя большую номенклатуру мелкоразмерных деталей, у многих из которых присутствуют труднодоступные поверхности (малые пазы и отверстия). Номенклатура включает в себя порядка сорока наименований деталей. Выбранные для исследования детали были разбиты на

группы, исходя из их схожести по габаритным размерам, материалу, а также по конструктивным и технологическим признакам, в каждой группе были выделены наиболее типичные детали-представители. При проведении экспериментальных исследований процесса ВиО в среде свободных абразивов были использованы следующие рабочие среды: фарфоровые шары, диаметр 3 мм, изготовлены из фарфоровой массы по ТУ 25-11-723-71 (при теоретических расчетах зернистость условно принималась равной четырем, средний вес шара 0,04 г); формованный абразивный материал типа призмы трехгранной розовой, гранулят скорлупы ореха дробленый (размер частиц 1-4 мм, при теоретических расчетах зернистость условно принималась равной четырем).

Исследования проводились с использованием рабочих сред, которые предварительно тщательно промывались от продуктов износа и загрязнений. После каждого эксперимента изношенная рабочая среда отсеивалась и добавлялась новая. В качестве жидкости для непрерывной промывки среды применялся 2% раствор соды кальцинированной.

Построены зависимости времени съема заусенца при вибрационной отделочной обработке, некоторые из них приведены на рис. 1 и рис. 2. На графиках зависимостей сплошная линия - теоретическая кривая, точки - результаты экспериментальных исследований. Проведено сравнение расчетных значений теоретического и экспериментального исследований. Установлено, что несоответствие между результатами не превосходит 20 %.

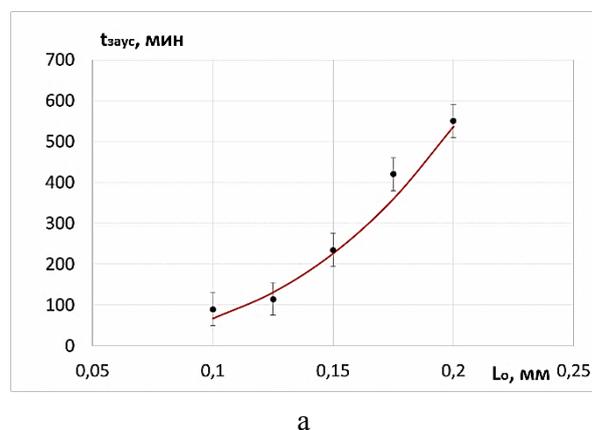


Рис. 1. Зависимость времени удаления заусенца деталей из АМг6 (а) и латуни ЛС59-1 (б) от толщины заусенца у основания L_0 при $f=33$ Гц при использовании скорлупы ореха дробленой (а), фарфоровых шаров (б)

Заключение

Целью предстоящих исследований является разработка методики проектирования высокоэффективных технологических процессов вибрационной обработки мелкогабаритных деталей с малыми пазами и отверстиями в обрабатываемой среде органического происхождения с использованием гранул разного размера небольшого удельного веса на основе разработки адекватных теоретических моделей процессов удаления заусенцев и скругления острых кромок труднодоступных поверхностей деталей.

Литература

1. ОСТ 4ГО.070.014-79. Детали радиоэлектронной аппаратуры; М.: ООО «Радиостандарт-ЦНИИРЭС». М., 1992. 15 с.
2. STD-01. WBTC.1996, draft. – DeburringTechnologyInternational, Inc., KansasCity, MO.
3. Бабичев А.П. Вибрационная обработка деталей. М.: Машиностроение, 1974. 134 с.
4. Тамаркин М.А. Теоретические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами: дис. д-ра техн. наук. Ростов н/Д, 1995.
5. La Roux K. Gillespie. Deburring and edge finishing Handbook. 1999 by Society of Manufacturing Engineers.
6. Агранат Б.А. Ультразвуковая технология. М.: Металлургия, 1974, 236 с.
7. Гудушаури Э.Г., Пановко Г.Я. Теория вибрационных технологических процессов при некулоновом трении. М.: Наука, 1988. 144 с.
8. Димов Ю.В. Обработка деталей свободным абразивом. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2000. 293 с.
9. Димов Ю.В. Обработка деталей эластичным инструментом. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 352 с.
10. Королев А.В., Новоселов Ю.К. Теоретико-вероятностные основы абразивной обработки. Саратов: Изд-во Саратов. ун-та, 1989. 320 с.
11. Билик Ш.М. Абразивно-жидкостная обработка металлов. М.: Машгиз, 1960. 198 с.
12. Кулаков Ю.М., Хрульков В.А. Отделочно-защитная обработка деталей. М.: Машиностроение, 1979. 216 с.
13. А.с. 1301673 СССР, МКИ В24 С1/00 / И.В. Благоченский и др. Опубл. 06.03.85, Бюл. 1987, № 13.
14. Пат. 2516326 Российская Федерация, МПК В24 В1/04. Способ удаления заусенцев с малогабаритных деталей / Комаревцев А.В. (RU), Бекренёв Н.В. (RU), Бочкарёв П.Ю. (RU), Комаревцев Д.В. (RU); заявитель и патентообладатель Саратовский гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю.А. № 2012128068/02; заявл. 03.07.12; опубл. 20.05.2014, Бюл. № 14.
15. А.с. 1351759 СССР, МПК В24 В31/116 / П.И. Ящерицын и др., опубл. 15.11.1987, бюл. № 42.
16. А.с. 1315254 СССР, МКИ В 24 В 31/06 / А.П. Бабичев и др. Опубл. 07.06.87, Бюл. № 21.
17. Пат. 2572684, Российская Федерация, МПК В24В 31/104. Способ центробежной обработки внутренних поверхностей мелкогабаритных деталей / Зверовщиков В.З.,

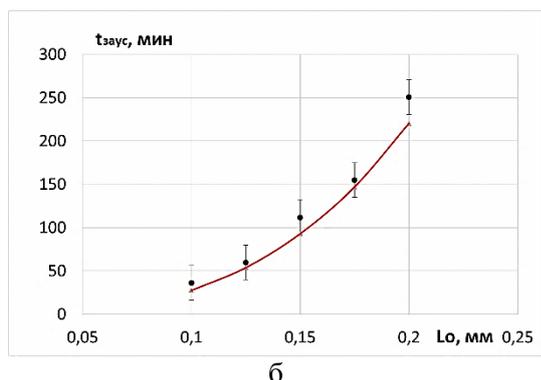


Рис. 1. Зависимость времени удаления заусенца деталей из АМг6 (а) и латуни ЛС59-1 (б) от толщины заусенца у основания L_0 при $f=33$ Гц при использовании скорлупы ореха дробленой (а), фарфоровых шаров (б) (продолжение)

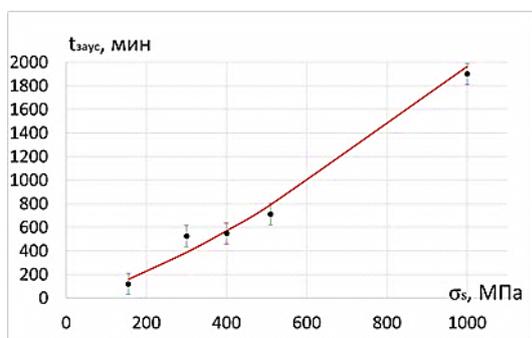


Рис. 2. Зависимость времени удаления заусенца от предела текучести материала детали σ_s при $f=33$ Гц и использовании скорлупы ореха дробленой. Толщина заусенца у основания $L_0=0,2$ мм

Полученные результаты в виде зависимости времени съема заусенца от механических свойств обрабатываемого материала, толщины заусенца у основания, а также от характеристик рабочей среды (грануляции и зернистости рабочей среды) лягут в основу определения технологических параметров виброабразивной обработки.

В результате изучения априорной информации и сравнения теоретических исследований по данному процессу запланирована серия опытно-экспериментальных работ, целью которых ставится установление влияния технологических параметров и особого расположения заусенцев деталей на время обработки деталей и количество объема металла, удаленного с образцов.

Зверовщиков А.Е., Шешкин А.В.; заявитель и патентообладатель Пенз. гос. ун-т. № 2014128140/02; заявл. 09.07.2014., опубл. 20.01.2016, Бюл. № 2.

18. Мамбреян П.А. Обработка внутренних полостей экструзионным шлифованием // НПО «Армстанок»: сб. науч. тр. Ереван, 1988. № 8. С. 110-113.

19. Ein neues Verfahren Zum Entgraten - Freblappen Reinhold Rolf, Uhlmann Ubrich. "Metallverarbeitung", 1987, 41, № 2, P. 42-44.

20. Пат. Российская Федерация № 2558782 МПК В24 С1/00, В24 В31/10. Способ обработки внутренних цилиндрических поверхностей свободным абразивом // Бочкарев П.Ю., Захаров О.В., Скляров И.А.; заявитель и патентообладатель Саратовский гос. техн. ун-т им. Гагарина Ю.А. № 2012128068/02; Заявл. 23.12.2013; Опубл. 27.06.2015, Бюл. № 8.

21. Проволоцкий А.Е. Струйно-абразивная обработка деталей машин. Киев: Техника, 1989. 177 с.

22. А.с. 1419824 СССР, МКИ В23 В47/34 / Ю.П. Сысоев. Заявл. 18.06.86; Опубл. 30.08.88, Бюл. 1988, № 32.

23. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов-н/Д: Изд. Центр ДГТУ, 1998. 624 с.

24. Карташов И.В., Шаинский М.Е., Власов В.А. Обработка деталей свободными абразивами в вибрирующих резервуарах. К.: Издательское объединение «Вища школа», 1975. 188 с.

25. Пат. 2028912, Российская Федерация, МПК В24В31/108. Способ объемной центробежной обработки деталей / Анкудимов Ю.П. и др., заявители и патентообладатели Анкудимов Ю.П.; Бабичев А.П.; Вулих А.А.; Давыдова И.В.; Радытин Г.В.; Цихановский В.Г. № 5020791/08; заявл. 08.07.1991, опубл. 20.02.1995, Бюл. № 8.

26. Отделочные операции в машиностроении: справочник; под общ. ред. П.А. Руденко. 2-е изд., перераб. и доп. Киев: Техника, 1990. 150 с.

27. Шевцов С.Н. Компьютерное моделирование динамики гранулированных сред в вибрационных машинах. Ростов н/Д, 2001. 193 с.

28. Якимов А.В. Абразивно-алмазная обработка фасонных поверхностей. М.: Машиностроение, 1984. 312 с.

29. Hashimura M., Chang Y.P., Dornfeld D. Analysis of burr formation mechanism in orthogonal cutting // Trans. ASME. J. Manuf. Sci and Eng. 1999. 121, № 1. P. 1-7.

Поступила 03.12.2018; принята к публикации 04.02.2019

Информация об авторах

Тамаркин Михаил Аркадьевич – д-р техн. наук, профессор, Донской государственный технический университет (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), e-mail: tehn_rostov@mail.ru

Смоленцев Евгений Владиславович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Колганова Елена Николаевна – аспирант кафедры «Технология машиностроения», Донской государственный технический университет (344000, Россия, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, д. 1), e-mail: elenkolg@list.ru

ANALYSIS OF THE MODERN CONDITION OF DEBURRING DETAILS HAVING SMALL GROOVES AND HOLES IN THE MEDIA OF FREE ABRASIVES

M.A. Tamarkin¹, E.V. Smolentsev², E.N. Kolganova¹

¹Don State Technical University, Rostov-on-Don, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article proves the relevance of studies of finishing-enviable processing of small-sized parts of electronic equipment. Data on complex technological problems of such processing are given. A review of methods for removing burrs and rounding of sharp edges of parts in an environment of free abrasives is presented. Vibroabrasive treatment is shown to be the most effective method of removing burrs from small-sized parts with difficult-to-reach surfaces and has several advantages over other methods, since the treatment of such parts is a complex, difficult task due to difficulty in accessing the working environment and burrs holes. The results of theoretical and experimental studies of vibration processing of parts with small grooves and holes in various media, including organic, are given in the form of dependencies of the time of removal of the burr on the mechanical properties of the material being processed, thickness of the burr at the base and characteristics of the working environment. The experiments carried out confirmed the possibility of studying the treatment in media of organic origin using mixed granules of different sizes with a small specific gravity. The research tasks are aimed at increasing the efficiency of vibration processing of small-sized parts having grooves and holes

Key words: vibration treatment, medium of organic origin, roughness, microroughness of the surface, burrs, edge rounding

References

1. OST 4GO.070.014-79 "Details of electronic equipment" ("Detali radioelektronnoy apparatury"), Moscow, LLC Radiostandart-TSNIRES, 1992, 15 p.

2. STD-01. WBTC.1996, draft, DeburringTechnologyInternational, Inc., KansasCity, MO.

3. Babichev A.P. "Vibration processing of parts" ("Vibratsionnaya obrabotka detaley"), Moscow, Mashinostroenie, 1974, 134 p.
4. Tamarkin M.A. "Theoretical bases of optimization of the processing of parts with free abrasives: Dr. techn. sci. dis." ("Teoreticheskie osnovy optimizatsii protsessov obrabotki detaley svobodnymi abrazivami: dis. d-ra tekhn. nauk"), Rostov-on-Don, 1995.
5. La Roux K. Gillespie "Deburring and edge finishing Handbook", Society of Manufacturing Engineers, 1999.
6. Agranat B.A. "Ultrasound technology" ("Ul'trazvukovaya tekhnologiya"), Moscow, Metallurgiya, 1974, p.236.
7. Gudushauri E.G., Panovko G.Ya. "Theory of vibrational technological processes with non-jugular friction" ("Teoriya vibratsionnykh tekhnologicheskikh protsessov pri nekulonovom trenii"), Moscow, Nauka, 1988, 144 p.
8. Dimov Yu.V. "Processing parts free abrazivom" ("Obrabotka detaley svobodnym abrazivom"), Irkutsk, ISTU publishing house, 2000, 293 p.
9. Dimov Yu.V. "Processing details elastic tool" ("Obrabotka detaley elastichnym instrumentom"), Irkutsk, ISTU publishing house, 2007, 352 p.
10. Korolev A.V., Novoselov Yu.K. "Probability-theoretical bases of abrasive processing" ("Teoretiko-veroyatnostnye osnovy abrazivnoy obrabotki"), Saratov, Publishing House of SSU, 1989, 320 p.
11. Bilik Sh.M. "Abrasive-liquid metal processing" ("Abrazivno-zhidkostnaya obrabotka metallov"), Moscow, Mashgiz, 1960, 198 p.
12. Kulakov Yu.M., Khrul'kov V.A. "Finishing and grinding processing of parts" ("Otdelochno-zachistnaya obrabotka detaley"), Moscow, Mashinostroenie, 1979, 216 p.
13. Blagoveshchenskiy I.V. et al. A.C. 1301673 USSR, MKI V24 S1/00, publ. 03.06.85, 1987, bull. no. 13.
14. Komarevtsev A.V., Bekrenyev N.V., Bochkaryev P.Yu., Komarevtsev D.V. Pat. 2516326 of the RF, MPK6 B24B1/04 "Method of removing burrs from small parts" ("Sposob udaleniya zaustentsev s malogabaritnykh detaley"), Gagarin SSTU, 2014
15. Yashcheritsyn P.I. et al. A.C. 1351759 USSR, IPC B24 B31 / 116, publ. 11.15.1987, bul. no. 42
16. Babichev A.P. et al. A.C. 1315254 USSR, MKI V 24 V 31/06, publ. 07.06.87, bull. №21
17. Zverovshchikov V.Z., Zverovshchikov A.E., Steshkin A.V. Pat. #2572684 of RF, IPC B24B 31/104 "The method of centrifugal processing of internal surfaces of small-sized parts" ("Sposob tsentrobezhnoy obrabotki vnutrennikh poverkhnostey melkorazmernnykh detaley"), Penza SU, 2016, bull. no. 2
18. Mambreyan P.A. "Processing of internal cavities by extrusion grinding", *Coll. of Sci. Papers: NPO "Armstanok"*, Yerevan, 1988, no. 8, pp. 110-113.
19. Freblappen Reinhold Rolf, Uhlmann Ubrich "Ein neues Verfahren Zun Entgraten", *Metallverarbeitung*, 1987, 41, no. 2, pp. 42-44.
20. Bochkarev P.Yu., Zakharov O.V., Sklyarov I.A. Pat. #2558782 of RF, IPC B24 S1 / 00, B24 B31 / 10, "The method of processing internal cylindrical surfaces with a free abrasive" ("Sposob obrabotki vnutrennikh tsilindricheskikh poverkhnostey svobodnym abrazivom"), Gagarin SSTU publ. 06.27.2015, bull. no. 8
21. Provolotskiy A.E. "Jet-abrasive machining of machine parts" ("Struyno-abrazivnaya obrabotka detaley mashin"), Kiev, Tekhnika, 1989, 177 p.
22. Sysoev Yu.P. A.C. 1419824 USSR, MKI V23 V47 / 34 /, publ. 08/30/88, 1988, bull. no. 32
23. Babichev A.P., Babichev I.A. "Basics of vibration technology" ("Osnovy vibratsionnoy tekhnologii."), Rostov-on-Don, Ed. Tsent DGTU, 1998, 624 p.
24. Kartashov I.V., Shainskiy M.E., Vlasov V.A. "Processing of parts with free abrasives in vibrating tanks" ("Obrabotka detaley svobodnymi abrazivami v vibriruyushchikh rezervuarakh"), Kiev, Vishcha Shkola, 1975, 188 p.
25. Ankudimov Yu. P., Babichev A.P., Vulikh A. A., Davydova I. V., Radytin G.V., Tsikhanovskiy V.G. Pat. #2028912 of RF, IPC B24B31 / 108, "Method of volumetric centrifugal processing of parts" ("Sposob ob'yemnoy tsentrobezhnoy obrabotki detaley"), publ. 20.02.1995, bull. no. 8
26. Ed. Rudenko P.A. "Finishing operations in mechanical engineering: reference book" ("Otdelochnye operatsii v mashinostroyenii: spravochnik"), Kiev, Tekhnika, 1990, 150 p.
27. Shevtsov S.N. "Computer simulation of the dynamics of granular media in vibration machines" ("Komp'yuternoe modelirovaniye dinamiki granulirovannykh sred v vibratsionnykh mashinakh"), Rostov-on-Don, 2001, 193 p.
28. Yakimov A.V. "Abrasive and diamond processing of façade surfaces" ("Abrazivno-almaznaya obrabotka fasonnykh poverkhnostey"), Moscow, Mashinostroenie, 1984, 312 p.
29. Hashimura M., Chang Y.P., Dornfeld D. "Analysis of the burr formation mechanism in orthogonal cutting", *Trans.ASME.J.Manuf.Sci and Eng.*, 1999, 121, no. 1, pp. 1-7.

Submitted 03.12.2018; revised 04.02.2019

Information about the authors

Mikhail A. Tamarkin, Dr. Sc. (Technical), Professor, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don 344000, Russia), e-mail: tehn_rostov@mail.ru

Evgeniy V. Smolentsev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moskovskiy prospekt, Voronezh, 394026, Russia), e-mail: smolentsev.rabota@gmail.com

Elena N. Kolganova, Graduate student, Don State Technical University (1 Gagarin square, Rostov-on-Don 344000, Russia), e-mail: elenkolg@list.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ЦЕЛЬЮ ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМНЫХ ПАРАМЕТРОВ

Д.М. Черных, Ю.С. Ткаченко, В.С. Цыганов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена проблема механической обработки серого чугуна СЧ18-СЧ25 без использования смазочно-охлаждающих технических средств. Целью данной работы является моделирование и расчет на его основе температуры на передней поверхности инструмента посредством разработки математической модели для оптимизации режимных параметров при механической обработке. Для определения температуры в зоне резания и на передней поверхности режущего инструмента применялся метод конечных элементов с использованием программного комплекса Deform 3D Machining. Для решения задачи нелинейного программирования применялся эволюционный метод, в качестве ограничений для черного растачивания были использованы температура на передней поверхности режущего инструмента, частота вращения шпинделя, мощность резания. Разработана методика для оптимизации режимов резания по объему удаляемого материала. В ходе моделирования определена зависимость температуры на передней поверхности режущего инструмента от режимных параметров обработки. При помощи эволюционного алгоритма на основе разработанной модели нелинейного программирования определены режимные параметры обработки, позволяющие достичь максимальной производительности съема материала. Выполнено моделирование методом конечных элементов механической обработки заготовки, а именно растачивания отверстия корпусной детали из серого чугуна СЧ25 с помощью программного комплекса Deform 3D Machining. Определены коэффициенты уравнения регрессии зависимости температуры на передней поверхности режущего инструмента и в зоне резания от глубины резания, скорости резания и подачи. На основе разработанной математической модели определены режимные параметры обработки, при которых объем удаляемого материала будет максимальным без превышения температуры красностойкости инструментального материала. Получены данные для определения оптимальных режимных параметров механической обработки при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ

Ключевые слова: моделирование механической обработки, метод конечных элементов, модель Джонсона-Кука, температура, оптимизация, нелинейное программирование

Введение

Целью данной работы является моделирование и расчет на его основе температуры на передней поверхности инструмента посредством разработки математической модели для оптимизации режимных параметров при механической обработке.

Основными причинами широкого использования серого чугуна являются его низкая стоимость, хорошие литейные свойства, обрабатываемость резанием и демпфирующая способность. Область применения данного конструкционного материала расширяет возможность варьировать механические, технологические и эксплуатационные свойства в достаточно широких пределах. Повышение производительности механической обработки серого чугуна является актуальной задачей [1].

В структуре серого чугуна наряду с цементитом присутствует графит. Графит обладает низкими механическими свойствами, такими как прочность и пластичность. Он нарушает сплошность металлической основы, располагаясь между ее зернами, ослабляя связь между ними. Фор-

ма и размер включений графита определяют механические свойства серого чугуна. Размеры включений графита часто лежат в пределах 0,05-0,5 мм, а их форма не является правильной и имеет пластинчатую форму. При обработке резанием серого чугуна формирование стружки обусловлено наличием сечений, имеющих критическую площадь графитовых включений. Это приводит к локализации графита на поверхности, в порах и трещинах чугунной стружки. В чугунной пыли количество графита возрастает на 8-18%. На рис. 1 представлена микроструктура стружки серого чугуна СЧ25 [2].

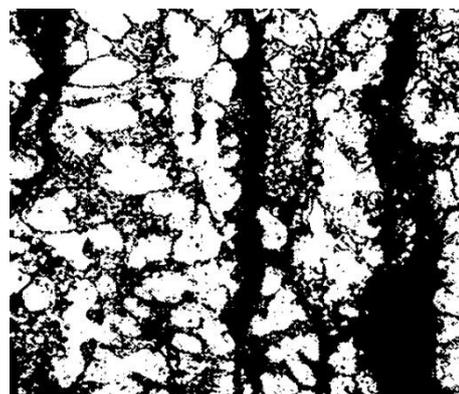


Рис. 1. Микроструктура стружки серого чугуна СЧ25

Несмотря на хорошую обрабатываемость резанием, при обработке серого чугуна выделяется большое количество теплоты. В процессе резания большая часть механической работы превращается в тепло. В зависимости от параметров резания и используемого инструмента 75-95% тепловой энергии остается в стружке, снимаемой с детали [2]. Использование смазочно-охлаждающих технических средств (СОТС) позволяет улучшить отвод тепла из зоны резания и облегчить удаление стружки, однако градиент тепловой нагрузки может привести к образованию термических трещин на передней поверхности инструмента, возникающих вследствие прерывистости процесса резания и подвода СОТС в зону резания. Также СОТС, смешиваясь с графитовой пылью, образует эмульсию, которая приводит к значительному увеличению загрязнения детали, приспособления, станка в целом и может привести к снижению надежности процесса обработки, что повышает затраты на ремонт и техническое обслуживание металлорежущих станков.

Проблема удаления пылеобразной стружки может эффективно решаться использованием вакуумного отсоса, сопло которого необходимо разместить как можно ближе к рабочей зоне. При отказе от использования СОТС стружка выполняет функцию отвода образующегося тепла из рабочей зоны. Одними из основных параметров механической обработки, определяющими режимы резания, будут являться допустимая максимальная температура в зоне резания и на передней поверхности режущего инструмента (РИ). От этих параметров во многом зависят точность, качество обработки и стойкость РИ. Контроль этих параметров является важной задачей при разработке технологии механической обработки серого чугуна.

Максимальная температура на передней поверхности РИ является одним из основных факторов, определяющих граничные режимные параметры процесса резания, и может быть использована в качестве критерия управления [3]. Поэтому важно оценить влияние режимов резания на температуру в зоне резания и на передней поверхности инструмента. Для этого необходимо разработать математическую модель, связывающую скорость резания, подачу, глубину резания и температуру на передней поверхности инструмента.

Постановка задачи

Рассмотрим поставленную проблему на примере чернового растачивания сквозного отверстия $\varnothing 200$ мм и $L=100$ мм корпусной детали из серого чугуна СЧ25 на обрабатывающем центре мод. НМС410.

Процесс механической обработки чугуна является сложной нелинейной задачей. К тому же конструкция расточных головок усложняет подачу СОТС в зону резания. Классические методы проведения экспериментальных исследований сложны в исполнении и дороги. Метод конечных элементов позволяет проводить моделирование процессов механической обработки с достаточной точностью и при этом значительно сократить время и затраты. Для моделирования процесса растачивания отверстия в заготовке из серого чугуна СЧ25 использовался программный пакет Deform 3D Machining [4]. При математическом моделировании процесса механической обработки значимую роль имеет модель, описывающая свойства обрабатываемого материала в широком диапазоне пластических деформаций, скоростей деформаций и температур. Из описывающих пластическую деформацию моделей, представленных в системе Deform 3D Machining, на практике наиболее часто применяется модель Джонсона-Кука (Johnson-Cook model) [5], которая учитывает зависимость предела текучести от температуры, скорости деформирования и накопленной пластической деформации. В обрабатываемом материале напряжение пластической деформации определяется формулой, приведенной в [6]:

$$\sigma = (A + B \cdot \varepsilon_p^n) \cdot \left(1 + C \cdot \ln\left(\frac{\varepsilon'_p}{\varepsilon'_0}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(1 - \left(\frac{T - T_r}{T_m - T_r}\right)^m\right)\right), \quad (1)$$

где ε_p - эффективная пластическая деформация; ε'_p - скорость пластической деформации; T - текущая температура в процессе моделирования; T_m - температура плавления; T_r - температура окружающей среды; $A, B, C, n, m, \varepsilon'_0$ - коэффициенты, полученные в результате статистической обработки экспериментальных данных исследований прочностных характеристик материала заготовки.

Определение коэффициентов модели Джонсона - Кука для материалов группы

СЧ18-СЧ25 представляет собой сложную экспериментальную задачу. В стандартной библиотеке Defogm 3D данный материал отсутствует. Поэтому использовались коэффициенты модели для серого чугуна СЧ25, приведенные в литературных источниках [7] и представленные в табл. 1.

Таблица 1
Значения констант модели Джонсона-Кука

Наименование константы	Значение
A	573
B	380
C	0,034
n	0,17
m	0,12
T_r	20°C
T_m	1250°C

Исходя из вида технологической операции, свойств обрабатываемого материала, геометрических параметров обрабатываемой поверхности, технических характеристик металлорежущего станка, была выбрана расточная державка со сменными твердосплавными пластинами A25T-SSKCR 12 и сменная твердосплавная пластина SCMT 12 04 12-KR 3210 [8]. Основные геометрические параметры данной инструментальной сборки представлены в табл. 2.

Таблица 2
Геометрические параметры инструментальной сборки

Наименование параметра	Обозначение	Значение
Главный передний угол	γ	-5°
Главный задний угол	α	12°
Главный угол в плане	φ	75°
Угол наклона главной режущей кромки	λ	8,87°
Радиус при вершине сменной пластины	c	1,191 мм
Толщина пластины	S	4,763 мм

Для сокращения числа опытов использовался метод дробного факторного эксперимента [9]. Для моделирования процесса растачивания были определены граничные технологические условия проведения эксперимента. Для нахождения минимальных граничных условий был проведен расчет режимов резания на основе табличных значений [10]. Итоговыми значениями проведенных вычислений являются: скорость резания $V = 100$ м/мин, подача $S =$

0,1 мм/об и глубина резания $t = 1$ мм. Верхние граничные условия назначены, исходя из рекомендаций производителя режущего инструмента [8]. По рекомендуемым значениям для данного инструмента были выбраны следующие максимальные параметры режимов резания: скорость резания $v = 250$ м/мин, подача $S = 0,3$ мм/об и глубина резания $t = 2$ мм. В табл. 3 представлена матрица планирования, разработанная исходя из граничных условий, представленных ранее.

Таблица 3
Матрица планирования экспериментальных исследований с выходным параметром моделирования обработки

Номер серии	Варьируемые параметры			Выходной параметр $\theta, ^\circ\text{C}$
	$v, \text{ м/мин}$	$S, \text{ мм/зуб}$	$t, \text{ мм}$	
1	100	0,1	2	252,37
	(-)	(-)	(+)	
2	100	0,3	1	244,26
	(-)	(+)	(-)	
3	250	0,3	2	410,41
	(+)	(+)	(+)	
4	250	0,1	1	247,05
	(+)	(-)	(-)	

Результаты моделирования и их анализ

На рис. 2 представлены результаты моделирования температуры в зоне резания (см. рис. 2а) и на передней поверхности инструмента (см. рис. 2б) при скорости резания $v = 250$ м/мин, подаче $S = 0,1$ мм/об и глубине резания $t = 1$ мм. Температура в зоне резания растет по экспоненциальному закону и достигает установившегося значения.

Коэффициенты уравнения регрессии определяются по методу наименьших квадратов, поэтому необходимо отметить, что экспериментальные данные должны быть однородными и нормально распределенными. На рис. 3а представлен поверхностный график зависимости температуры на передней поверхности инструмента от скорости резания, лежащей в диапазоне от 100 м/мин до 250 м/мин, и подачи, лежащей в диапазоне от 0,1 мм/об до 0,3 мм/об, при постоянной глубине резания, равной 1 мм. Для упрощения анализа результатов моделирования на рис. 3б представлена карта изолиний.

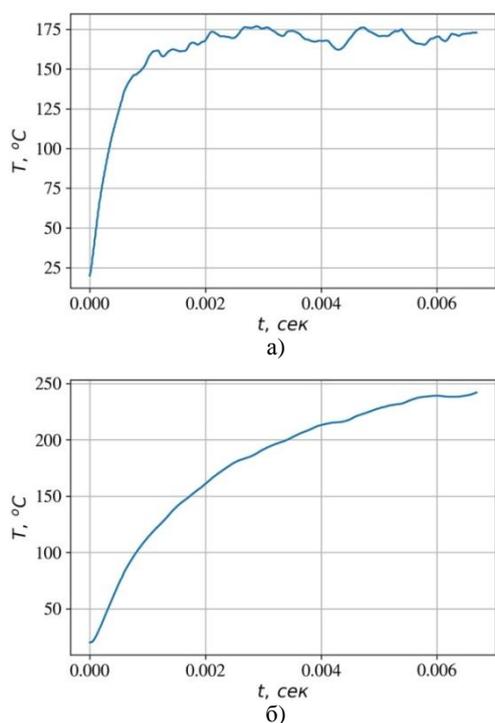


Рис. 2. Результаты моделирования температуры при растачивании заготовки из чугуна СЧ25

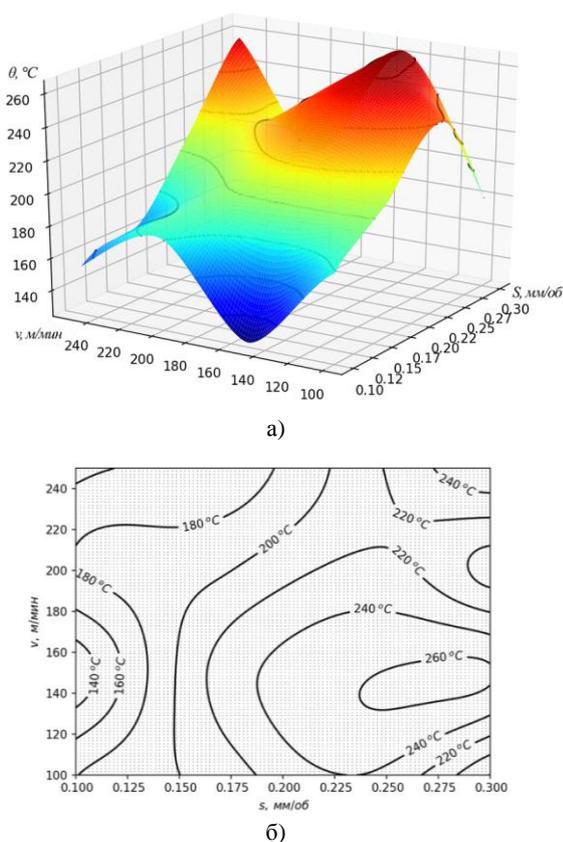


Рис. 3. Зависимость температуры на передней поверхности инструмента от v и S при $t=1$ мм

Для сглаживания случайных ошибок, возникающих в процессе математического моделирования, было решено использовать экспоненциально-взвешенную скользящую среднюю (Exponentially Weighted Moving Average) [11]. Использование данного метода позволяет значительно снизить влияние ошибок при математическом моделировании, возникающих при регенерации конечно-элементной сетки в процессе моделирования температуры в зоне резания и на передней поверхности РИ. Экспоненциально взвешенная скользящая средняя рассчитывается по формуле:

$$\bar{y}_t = \alpha y_t + (1 - \alpha) \bar{y}_{t-1}, \quad (2)$$

где y_t — фактическое значение ряда на наблюдении t ; \bar{y}_t — расчетное значение по скользящей средней на наблюдении t ; α — постоянная сглаживания, коэффициент, который выбирается из промежутка (0; 1).

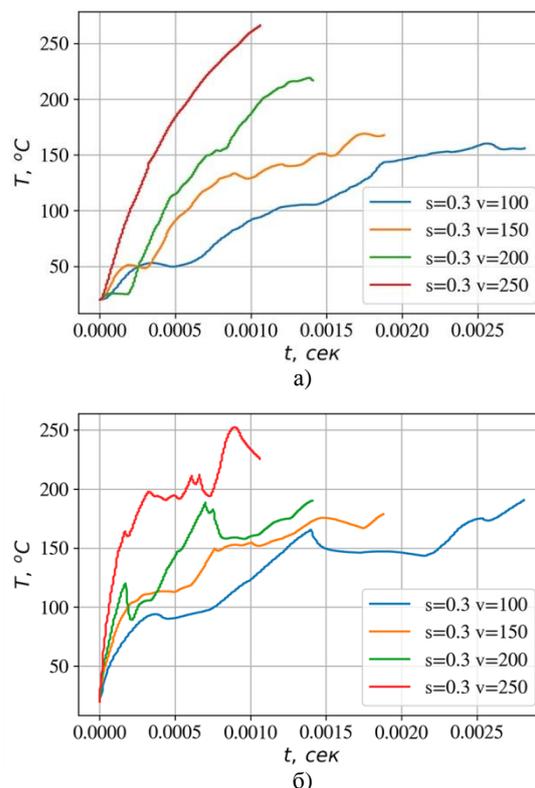


Рис. 4. Зависимость температуры в зоне резания и на передней поверхности инструмента при $t=1$ мм

На рис. 4 показаны графики зависимости температуры в зоне резания и на передней поверхности инструмента в зависимости от времени обработки при различных режимных параметрах, сглаженные с помощью модели EWMA с $\alpha = 0,1$. Из рис. 4 видно влияние режимных

параметров на скорость изменения температуры в зоне резания (см. рис. 4 б) и на передней поверхности РИ (см. рис. 4 а) при $t=1$ мм.

Математическая обработка полученных экспериментальных данных позволила получить эмпирическую зависимость температуры от режимных параметров процесса резания. Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии проводилась по t -критерию Стьюдента. Адекватность полученной модели оценивалась с помощью F -критерия Фишера [9]. В качестве инструментов использовался язык программирования Python с библиотеками pandas, numpy, scipy [12].

Эмпирическая формула для определения температуры на передней поверхности инструмента имеет следующий вид при заданных граничных условиях (табл. 3):

$$\theta = -11,51 + 0,54 \cdot v + 388,11 \cdot S + 85,73 \cdot t, \quad (3)$$

где v – скорость резания; S – подача; t – глубина резания.

Задание температуры на передней поверхности инструмента ниже значения теплоустойчивости инструментального материала на этапе разработки управляющей программы для станка с числовым программным управлением (ЧПУ) позволит обеспечить гарантированный период стойкости инструмента, заявленной поставщиком.

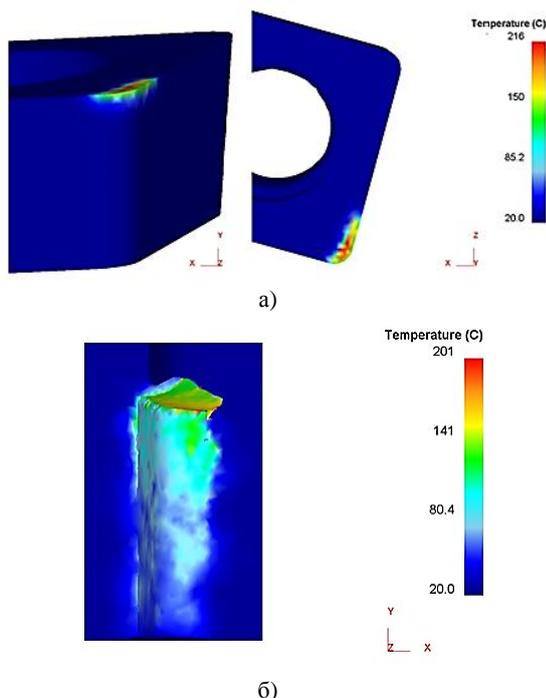


Рис. 5. Распределение температурных полей на передней и задней поверхностях РИ

На рис. 5 представлено распределение температурных полей на режущей кромке инструмента (см. рис. 5а) и в зоне резания (см. рис. 5б). Количество теплоты, поступающее через переднюю поверхность РИ, значительно превышает количество теплоты, образующейся под действием сил трения задней поверхности.

Для определения оптимальных режимных параметров по критерию производительности целесообразно использовать эволюционный алгоритм [13]. В качестве целевой функции была выбрана функция, определяющая объем удаляемого материала в минуту. Ограничения выбираются исходя из условий обработки, требований по точности и качеству обработанной поверхности. В качестве ограничений были выбраны функции, определяющие температуру на передней поверхности РИ, максимальную частоту вращения шпинделя станка, максимальную мощность резания. При чистовой обработке в качестве ограничений целесообразно добавить функции, связывающие режимные параметры обработки с шероховатостью обработанной поверхности и жесткостью элементов СПИД [14].

$$Q = v \cdot S \cdot t \rightarrow \max \quad (4)$$

$$\begin{cases} \theta = f(v, S, t) \leq \theta' \\ n = \frac{1000 \cdot v}{\pi \cdot d} \leq n' \\ N = \frac{P_z \cdot v}{1020 \cdot 60} \leq N' \\ v \geq 0, S \geq 0, t \geq 0 \end{cases}$$

где $Q = v \cdot S \cdot t \rightarrow \max$ - целевая функция; Q – скорость удаления материала; d -диаметр обработки; n – частота вращения шпинделя; n' -ограничение по частоте вращения шпинделя (основываясь на паспорте используемого металлорежущего станка $n' = 8000 \text{ мин}^{-1}$); N - мощность резания; N' - ограничение по мощности резания (основываясь на паспорте используемого металлорежущего станка $N' = 9 \text{ кВт}$); θ' - ограничение по температуре на передней поверхности инструмента (основываясь на термостойкости инструментального материала режущей части $\theta' = 500^\circ\text{C}$); θ – температура на передней поверхности режущей части инструмента, определяемая по формуле (3) для данных условий моделирования; P_z - тангенциальная составляющая силы

резания, определяемая по зависимостям, приведенным в [10], для данных условий моделирования:

$$P_z = 10 \cdot 92 \cdot t^1 \cdot S^{0,75} \cdot v^0. \quad (5)$$

В ходе выполнения расчетов получили следующие режимные параметры, обеспечивающие условия максимальной производительности съема материала: скорость резания $v = 318$ м/мин, подача $S = 0,43$ мм/об, глубина резания $t = 1,99$ мм. Скорость удаления материала составила $Q = 273 \cdot 10^3$ мм³/мин.

Заключение

Был выполнен анализ особенностей механической обработки заготовок из серого чугуна СЧ18 - СЧ25 без использования СОТС и показана необходимость моделирования температуры в зоне резания и на передней поверхности инструмента.

Разработана математическая модель, связывающая основные режимные параметры обработки и температуру на передней поверхности РИ и в зоне резания. В программном пакете Deform 3D Machining методом конечных элементов определены значения температур в зоне резания и на передней поверхности РИ при точении фрагмента заготовки из чугуна СЧ25. Использовалась модель Джонсона – Кука, на основе которой смоделировано распределение температурного поля в зоне резания и на передней поверхности РИ в зависимости от времени обработки. Был построен график зависимости температуры на передней поверхности РИ в зависимости от скорости резания и подачи. На основе дробно-факторного анализа были определены коэффициенты уравнения регрессии $\theta = f(v, S, t)$.

Разработана методика для оптимизации производительности механической обработки по скорости съема материала без применения СОТС за счет контроля температуры на передней поверхности РИ на примере чернового растачивания на основании представленных формул для используемой группы инструментальных материалов. Для решения разработанной модели нелинейного программирования был использован эволюционный метод, позволяющий определить режимные параметры, обеспечивающие максимальную производительность механической обработки, учитывающий характеристики инструментального ма-

териала, материала заготовки и используемого оборудования.

Результаты данной работы могут быть использованы при разработке управляющих программ для станков с ЧПУ.

Литература

1. Развитие теории и технологии проектирования машин, агрегатов и инструмента в процессах обработки давлением и резания / С.И. Платов, Н.Н. Огарков, Д.В. Терентьев, О.С. Железков, В.В. Рубаник, Ж.П. Вассал // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2014. № 1(45). С. 112-114.
2. Дьяконов О.М. Исследование физико-химических и механических свойств стальной и чугунной стружки // Литьё и металлургия. 2009. № 4(53). С. 161-173.
3. Григорьев С.Н., Терешин М.В. Повышение использования ресурса инструмента путем управления процессом резания по максимальной температуре // ГИАБ. 2011. № S4-6. С. 3-6.
4. Семашко М.Ю., Шеркунов В.Г., Чигинцев П.А. Моделирование в среде Deform микроструктуры металлических образцов, подвергнутых интенсивной пластической деформации // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. 2013. № 1(41). С. 57-61.
5. Sobolev A.V., Radchenko M.V. Use of Johnson–Cook plasticity model for numerical simulations of the SNF shipping cask drop tests // Nuclear Energy and Technology. 2016. № 2. P. 272–276.
6. Ходько А.А. Особенности выбора модели пластичности металла деформируемой заготовки при численном исследовании процесса гидродинамической штамповки // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 5 (112). С. 11–24.
7. Bo Wang, Li Wang, Enguang Zhang. Finite element simulation of cutting grey iron HT250 by self-prepared Si3N4 ceramic insert // AIP Conference Proceedings 1829, 020038 (2017); doi: 10.1063/1.4979770
8. Обзор инструмента при черновом растачивании [Электронный ресурс] // Sandvik Coromant URL: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/boring/roughing/choice-of-tools/product-overview/pages/default.aspx> (дата обращения: 19.04.2018).
9. Рыков В.В., Иткин В.Ю. Математическая статистика и планирование эксперимента. М.: Рос. гос. ун-т нефти и газа им. И.М. Губкина, 2008.
10. Справочник технолога - машиностроителя. В 2-х т. / Под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. 5-е изд., перераб. и доп. М.: Машиностроение-1, 2001. Т. 2. 944 с.
11. Гребенникова И.В. Методы математической обработки экспериментальных данных: учеб.-метод. пособие. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2015. 124 с.
12. Черных Д.М., Симонова Ю.Э. Моделирование процесса течения стеклопластиков с применением метода конечных элементов // Авиapersпектива: региональный сб. науч. тр. Воронеж: ВГТУ, 2017. Вып. 1. 247 с.
13. Вахнин А.В., Сопов Е.А. Параметрическая оптимизация функций с помощью генетических алгоритмов // Информационные технологии Сибири. 2016. С. 131-133.

14. Черных Д.М., Трофимов В.В. Адаптивное изменение жесткости системы стол-приспособление-деталь на базе системы с нулевой точкой // Авиация и

космонавтика - 2015: тез. 14 Междунар. науч.-практ. конф. М., 2015. С. 499-501.

Поступила 15.12.2018; принята к публикации 24.01.2019

Информация об авторах

Черных Дмитрий Михайлович - аспирант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: dmitriy.chernykh@gmail.com

Ткаченко Юрий Сергеевич - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: kafedra-ao@mail.ru

Цыганов Вячеслав Сергеевич - магистрант, Воронежский государственный технический университет (394026, Россия, г. Воронеж, Московский проспект, 14), e-mail: slavok-48@mail.ru

MACHINING MODELING TO OPTIMIZE PROCESS PARAMETERS

D.M. Chernykh, Yu.S. Tkachenko, V.S. Tsyganov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers the problem of machining gray iron SCH18-SCH25 without the use of coolant. The purpose of this work is to simulate and calculate on its basis the temperature on the front surface of the instrument through the development of a mathematical model to optimize the operating parameters during mechanical processing. To determine the temperature in the cutting zone and on the front surface of the cutting tool, the finite element method was used using the Deform 3D Machining. To solve the problem of nonlinear programming, an evolutionary method was used; the temperature on the front surface of the cutting tool, the spindle speed, and the cutting power were used as constraints for rough boring. A technique was developed to optimize cutting conditions for the volume of material to be removed. In the course of modeling, the dependence of the temperature on the front surface of the cutting tool on the regime processing parameters was determined. With the help of an evolutionary algorithm, based on the developed model of nonlinear programming, the regime processing parameters were determined, allowing us to achieve maximum material removal performance. The simulation was performed by the method of finite elements of machining the workpiece, namely, boring the hole in the case of gray cast iron SCH25, using Deform 3D Machining. The coefficients of the regression equation for the dependence of the temperature on the front surface of the cutting tool and in the cutting zone on the cutting depth, cutting speed and feed were determined. On the basis of the developed mathematical model, the regime processing parameters were determined, at which the volume of material to be removed will be maximum without exceeding the temperature of redness of the tool material. We obtained the data to determine the optimal operating parameters of machining when developing control programs for CNC machines

Key words: machining simulation, finite element method, Johnson-Cook model, temperature, optimization, nonlinear programming

References

1. Platov S.I., Ogarkov N.N., Terent'ev D.V., Zhelezkov O.S., Rubanik V.V., Vassal Zh. P. "Development of the theory and technology of designing machines, assemblies and tools in forming processes and cutting", *Papers of Nosov Magnitogorsk State Technical University (Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova)*, 2014, vol. 1(45), pp. 112-114.
2. D'yakonov O.M. "Study of physical, chemical and mechanical properties of steel and cast iron chips", *Casting and metallurgy (Lit'ye i metallurgiya)*, 2009, vol. 4(53), pp. 161-173.
3. Grigor'ev S.N., Tereshin M.V. "Increased tool life by controlling cutting process maximum temperature", *GIAB*, 2011, vol. S4-6, pp. 3-6.
4. Semashko M.Yu., Sherkunov V.G., Chigintsev P.A. "Simulation of the microstructure of metal samples subjected to severe plastic deformation using Deform software", *Papers of Nosov Magnitogorsk State Technical University (Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova)*, 2013, vol. 1(41), pp. 57-61.
5. Sobolev A.V., Radchenko M.V. "Use of Johnson-Cook plasticity model for numerical simulations of the SNF shipping cask drop tests", *Nuclear Energy and Technology*, 2016, issue 2, pp. 272-276.
6. Hod'ko A.A. "Choosing a metal plasticity model for numerical simulation of the hydrodynamic forming process", *Aerospace Engineering and Technology (Aviatsionno-kosmicheskaya tekhnika i tekhnologiya)*, 2014, vol. 5(112), pp. 11-24.
7. Bo Wang, Li Wang, Enguang Zhang "Finite element simulation of cutting grey iron HT250 by self-prepared Si3N4 ceramic insert", *AIP Conference Proceedings* 1829, 020038 (2017), doi: 10.1063/1.4979770
8. "Product overview for rough boring" ("Обзор инструмента при черновом растачивании"), Sandvik Coromant, available at: <https://www.sandvik.coromant.com/ru-ru/knowledge/boring/roughing/choice-of-tools/product-overview/pages/default.aspx>

9. Rykov V.V., Itkin V.Yu. "Mathematical statistics and experiment planning" ("Matematicheskaya statistika i planirovanie ehksperimenta"), Moscow, National University of Oil and Gas «Gubkin University», 2008
10. Dal'skiy A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheryakova R.K. "Technologist-mechanical engineer's handbook" ("Spravochnik tekhnologa - mashinostroitelya"), Moscow, Mashinostroenie, 2005, 944 p.
11. Grebennikova I.V. "Mathematical processing methods of experimental data" ("Metody matematicheskoy obrabotki eksperimental'nykh dannykh"), Ekaterinburg, Ural University, 2015, 124 p.
12. Chernykh D.M., Simonova Yu.E. "Finite element simulation for turning fiberglass", *Aviaperspektiva: reg. col. of sci. pp.*, Voronezh, Voronezh State Technical University, 2017, vol. 1, pp. 144-149.
13. Vakhnin A.V., Sopov E.A. "Using genetic algorithms for parameter optimization", *Information technology of Siberia: proceedings of international Scientific and Technical Conference (Informatsionnye tekhnologii Sibiri)*, 2016, pp. 131-133.
14. Chernykh D.M., Trofimov V.V. "Adaptive change of rigidity in the system "table - tool - part" based on the zero point system", *Proc. of the Intern. scientific-practical conf.: 14th International Conference "Aviation and Cosmonautics - 2015" (Aviatsiya i kosmonavtika - 2015: tez. 14 Mezhdunar. nauch.-prakt. konf.)*, Moscow, 2015, pp. 499-501

Submitted 15.12.2018; revised 24.01.2019

Information about the authors

Dmitriy M. Chernykh, Graduate student, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: dmitriy.chernykh@gmail.com
Yuriy S. Tkachenko, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: kafedra-ao@mail.ru
Vyacheslav S. Tsyganov, MA, Voronezh State Technical University (14 Moscovskiy prospect, Voronezh 394026, Russia), e-mail: slavok-48@mail.ru