

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

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

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

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Главный редактор В.Р. Петренко, д-р техн. наук – Воронеж
Заместитель главного редактора И.Г. Дроздов, д-р техн. наук – Воронеж
Ответственный секретарь Ю.В. Татаренко – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

Адрес редакции: 394026, Воронеж, Московский проспект, дом 14, комн. 212
Телефон: +7 (473) 246-28-63
E-mail: vestnik@vorstu.ru
Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»
Адрес издателя: 394006, Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2022

12+

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

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

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

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

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

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

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

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

Address: 394026, Voronezh, Moskovskiy prospekt, 14, office 212
Phone number: +7(473)246-28-63
E-mail: vestnik@vorstu.ru
Publisher: Federal State State-Financed Comprehensive Institution of High Education “Voronezh State Technical University”
Publisher address: 394006, Voronezh, 20-letiya Oktyabrya str., 84

© Voronezh State Technical University, 2022

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Матричная репликация в NP-полных задачах комбинаторной оптимизации С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев	7
Программный комплекс для проверки динамических связей технологических схем и баз данных Д.С. Синюков, А.Д. Данилов, Д.А. Денисов, М.Е. Ушков	15
Возможность применения существующих систем электронного документооборота при производстве твердотельных реле Д.Н. Трубицын	25
Алгоритм обучения с подкреплением для децентрализованных многоагентных систем, основанный на обмене опытом и обучении агентов случайному взаимодействию Ю.В. Дубенко, Н.А. Рудешко	30
Расчет функции невязки в базисном пространстве для поиска областей неопределенностей констант скоростей полимеризационного процесса Э.Р. Гиззатова, А.Р. Шагиахметов, Г.К. Хисаметдинова, С.Л. Подвальный	37
Проектирование траектории движения робота в ограниченном пространстве А.В. Каляшина, Т.С. Евдокимова, В.Ю. Ерхов	44
Разработка расширения конфигурации специального программного обеспечения Н.М. Жевандров, А.Д. Данилов	50
Разработка программных инструментов на базе расширяемых платформ с открытым исходным кодом О.В. Минакова, Н.В. Акамсина, О.В. Курипта	56
Основные этапы эволюционного численного метода для определения параметров многостадийной стохастической системы С.А. Олейникова, И.А. Селищев, Д.А. Тюников	64
Разработка системы автоматического управления процессом сушки жома сахарной свеклы в сушилке барабанного типа И.А. Болдырев, А.В. Любимов	71

Радиотехника и связь

Одномодовое приближение в задаче синтеза диэлектрической антенны вытекающей волны А.В. Останков, С.А. Останков, Г.В. Литвинов, С.Ю. Дашян, Н.Н. Щетинин	77
Влияние пространственной ориентации проводящих элементов составной метаповерхности на их частотные характеристики и диаграммы рассеивания в СВЧ-диапазоне А.С. Мазинов, И.Ш. Фитаев, Н.А. Болдырев	86
Формирование патч-антенны из солнечной панели Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров, И.А. Черноиваненко, А.В. Бунина, Л.В. Сопина, Е.Д. Меньшикова	91
Моделирование процессов электромагнитного взаимодействия распределенных объектов системы сотовой связи И.С. Киреев, И.В. Зубарев, В.Л. Бурковский, Е.В. Кощев	96

Поглощающие свойства функциональных структур на основе пленок нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ О.С. Тарасова, А.В. Ситников, Ю.Г. Пастернак, Д.С. Погребной, О.И. Ремизова, А.Р. Шакуров.....	101
--	------------

Машиностроение и машиноведение

О влиянии разрежения в контактном зазоре на кинетику автовакуумирования при диффузионной сварке титана А.Б. Булков, В.В. Пешков, И.Б. Корчагин, Г.В. Селиванов.....	109
Метод определения положения зубьев фрезы с конструктивной радиальной подачей для обработки РК-профильных отверстий В.В. Куц, М.В. Митрофанов, Ю.А. Мальнева, О.Н. Кириллов.....	115

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Matrix replication in NP-complete problems of combinatorial optimization S.L. Podval'ny, E.M. Vasil'ev	7
Software complex for checking dynamic relations of technological schemes and databases D.S. Sinyukov, A.D. Danilov, D.A. Denisov, M.E. Ushkov.....	15
Possibility of using existing electronic document management systems in the production of solid relays D.N. Trubitsyn.....	25
Reinforcement learning algorithm for decentralized multi-agent systems based on exchange of experience and training of agents in random interaction Yu.V. Dubenko, N.A. Rudeshko	30
Calculation of the residual function in the basis space to search for areas of uncertainty of the rate constants of the polymerization process E.R. Gizzatova, A.R. Shagiakhmetov, G.K. Khisametdinova, S.L. Podvalny.....	37
Designing the trajectory of the robot in a confined space A.V. Kalyashina, T.S. Evdokimova, V.Yu. Erkhov	44
Development of special software configuration extension N.M. Zhevandrov, A.D. Danilov.....	50
Development of software tools based on expandable open source platforms O.V. Minakova, N.V. Akamsina, O.V. Kuripta.....	56
Main stages of the evolution of numerical method for determining the parameters of a multi-stage stochastic system S.A. Oleynikova, I.A. Selishchev, D.A. Tyunikov.....	64
Development of an automatic control system for the drying process of sugar beet pulp in a drum-type dryer I.A. Boldyrev, A.V. Lyubimov.....	71

Radio engineering and communication

Single-mode approximation in the problem of the dielectric leaky wave antenna synthesis A.V. Ostankov, S.A. Ostankov, G.V. Litvinov, S.Yu. Dachian, N.N. Shchetinin.....	77
Influence of the spatial orientation of the conducting elements of the composite metasurface on their frequency characteristics and scattering diagrams in the RF range A.S. Mazinov, I.Sh. Fitaev, N.A. Boldyrev.....	86
Forming a patch antenna from a solar cell E.A. Ishchenko, S.M. Fyedorov, I.A. Chernoiivanenko, A.V. Bunina, L.V. Sopina, E.D. Men'shikova.....	91
Simulation of processes of electromagnetic interaction of distributed objects of a cellular communication system I.S. Kireev, I.V. Zubarev, V.L. Burkovskiy, E.V. Koshcheev.....	96

Absorbing properties of functional structures based on $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ nanocomposite films O.S. Tarasova, A.V. Sitnikov, Yu.G. Pasternak, D.S. Pogrebnoy, O.I. Remizova, A.R. Shakurov	101
--	------------

Mechanical engineering and science of machines

On the effect of dilution in the contact gap on the kinetics of autovacuuming during diffusion welding of titanium A.B. Bulkov, V.V. Peshkov, I.B. Korchagin, G.V. Selivanov	109
Method for determining the position of the teeth of a milling cutter with a constructive radial feed for processing EC-profile holes V.V. Kuts, M.V. Mitrofanov, Yu.A. Mal'neva, O.N. Kirillov	115

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.4.001

УДК 681.3

МАТРИЧНАЯ РЕПЛИКАЦИЯ В NP-ПОЛНЫХ ЗАДАЧАХ КОМБИНАТОРНОЙ ОПТИМИЗАЦИИ

С.Л. Подвальный, Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: ставится задача повышения вероятности нахождения глобального экстремума в NP-полных задачах комбинаторной оптимизации большой размерности. Показано, что комбинаторный характер формирования вариантов решений приводит к изолированному расположению глобального экстремума в области определения функции цели. Указанное обстоятельство существенно снижает эффективность эволюционных алгоритмов поиска, основанных на воспроизведении свойств наследственности и изменчивости в биологической эволюции. В связи с этим предложено ввести в упомянутые алгоритмы механизм матричной репликации. В соответствии с гипотезой М. Эйгена, этот механизм характерен для добиологического этапа возникновения жизни и заключается в формировании макромолекул путём их наращивания элементарными блоками по принципу сигнатуры – самоинструкции. Проанализированы свойства матричной репликации, раскрыто содержание алгоритмических процедур, необходимых для её реализации: построение матриц репликации, осуществление независимой эволюции для каждого варианта матрицы; отбор лучших вариантов. Получены количественные оценки многообразия вариантов возможных матриц и вариантов решений с ними. Даны рекомендации по выбору длины матрицы и их количеству при решении практических задач. Отмечено, что введение матрицы репликации в алгоритм генетического поиска снижает размерность исходной задачи на длину этой матрицы и, как следствие, сводит решение исходной задачи к решению конечного ряда подзадач меньшей размерности. Представлен пример использования механизма матричной репликации для решения NP-полной задачи нахождения оптимального маршрута, и подтверждена эффективность применения этого механизма при поиске глобального экстремума

Ключевые слова: NP-полная задача оптимизации, генетические алгоритмы, матричная репликация

Введение

Растущая сложность современных задач комбинаторной оптимизации всё чаще сталкивается с так называемым проклятием размерности – свойством комбинаторных задач, подмеченным Р. Беллманом ещё в 60-х годах XX века [1]. Практически это свойство выражается в быстром увеличении трудоёмкости решения указанных задач с ростом их размерности [2]. Проблема высокой трудоёмкости в настоящее время особенно актуальна в задачах обучения искусственных нейросетей, обработки больших массивов данных, в алгоритмах получения оптимальных проектных решений [3-5].

Сравнительная оценка трудоёмкости решения различных комбинаторных задач позволила выделить NP (от англ. non-deterministic polynomial) класс таких задач, названных так в силу того, что не найдены детерминированные алгоритмы, решающие эти задачи за время, полиномиально зависящие от размерности задачи [6-8]. Оказалось, что многообразии NP задач содержит сравнительно небольшой подкласс

типовых – NP-полных задач, к которым за полиномиальное время можно свести любую NP задачу: задача коммивояжёра, задача о назначениях, задача о независимых множествах, задача Штейнера и т.д. [9-11]. Перечисленные NP-полные задачи широко используются в качестве тестовых при исследовании различных алгоритмов комбинаторной оптимизации.

Невозможность за приемлемое время найти точное решение NP-полной задачи смягчается тем практическим обстоятельством, что во многих случаях достаточно получить решение, не совпадающее с глобальным экстремумом, но близкое к нему. На этом основании широкое распространение получили вероятностные, эволюционные и эвристические алгоритмы: генетические, отжига, сотрудничающих агентов - муравьиные, роя пчёл, стаи серых волков и т.п. [12-16].

Вместе с тем, проблема близости полученного решения к глобальному экстремуму остаётся нерешённой. Причина этого заключается в том, что в комбинаторных задачах не существует пологой области притяжения к этому экстремуму, т.е. глобальный экстремум в области определения функции цели $f(x)$ располага-

ется изолированно, без шлейфа близлежащих локальных экстремумов, рис. 1 [17].

Таким образом, актуальной задачей является разработка алгоритмов, позволяющих с высокой вероятностью находить изолированные глобальные экстремумы в задачах комбинаторной оптимизации.

В представленной ниже работе для достижения поставленной цели предлагается применить общий методологический подход к анализу сложных систем – эволюционную концепцию многоальтернативности, включающую в себя принципы многоуровневости, блочности и многообразия решений [18-21].

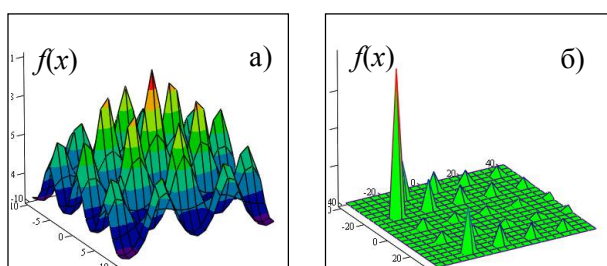


Рис. 1. Примеры расположения глобальных экстремумов: а) со шлейфом локальных экстремумов; б) изолированное

В частности, в качестве базового метода решения NP-полной комбинаторной задачи в работе использован генетический алгоритм, который по своей естественной основе близок к процедурам поиска оптимального решения.

С целью повышения сходимости генетического алгоритма к глобальному экстремуму будет применён недостаточно распространённый в технических задачах, но хорошо известный в биологии эффективный механизм эволюции – механизм матричной репликации [22].

Матричная репликация в генетических алгоритмах

Генетические алгоритмы реализуют два основных свойства эволюции: преемственность и изменчивость, первое из которых обеспечивает направленность эволюционного процесса, а второе – поддерживает генетическое разнообразие в популяции.

К указанным процедурам в классическом случае относятся скрещивание и мутации. Проведённый авторами количественный анализ сходимости этих процедур к глобальному экстремуму на тестовых NP-полных задачах квадратичного программирования tai_n , $n = 12...20$ показал, что эффективность генетического алгоритма по мере роста размерности n задачи

очень быстро снижается [23]. На рис. 2 показано, что с увеличением n примерно в два раза (с $n = 12$ до $n = 20$) многообразие M вариантов решения возрастает с $M = 12! = 4,79 \cdot 10^8$ до $M = 20! = 2,433 \cdot 10^{18}$, и процентное содержание поисков, завершающихся нахождением глобального экстремума, снижается со 100% до 2...5%.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что механизмы генетического скрещивания и мутаций не эффективны при решении задач с изолированным глобальным экстремумом.

Следует заметить, что этот вывод непосредственно вытекает из закона гомологических рядов Н.И. Вавилова: родственные виды имеют сходственные спектры изменчивости, - т.е. скрещивание хромосом и мутации в них не являются полностью случайными, а зависят от состава хромосом конкретного биологического вида [24].

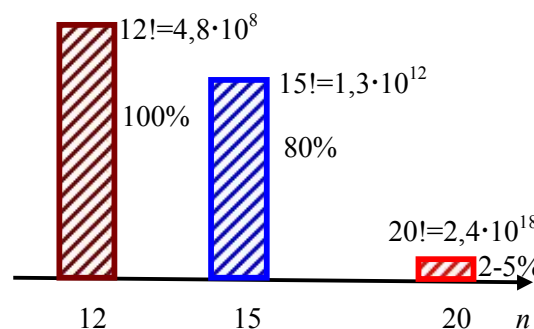


Рис. 2. Сравнение процентных долей поисков, завершившихся нахождением глобального экстремума задач tai_{12a} , tai_{15a} , tai_{20a}

В связи с этим, в качестве биологической аналогии решения NP-полной задачи предлагается рассмотреть довидовый этап возникновения жизни, т.е. процесс создания простейших живых организмов, отличающийся очень низкой вероятностью их возникновения.

Вспользуемся гипотезой М. Эйгена [25] о том, что формирование добиологических макромолекул происходит не в результате скрещивания, а путём последовательного своего наращивания элементарными блоками по принципу сигнатуры (самоинструкции) – свойства, возникающего в уже сформированной части макромолекулы. Указанный способ построения сложных образований из простых элементов называют матричной репликацией.

Сформулируем основные свойства матричной репликации:

исходным элементом для построения макромолекулы является матрица – относительно простая молекула, которая обладает различной степенью взаимодействия со свободными структурами;

формирование макромолекулы происходит случайным, но преимущественным подсоединением тех свободных структур, которые имеют большую степень взаимодействия с матрицей;

процессе формирования молекул из различных матриц во времени или пространстве разделён и не подвержен внутривидовой конкуренции.

Для реализации перечисленных свойств матричной репликации при поиске комбинаторного экстремума рассмотрим следующие процедуры:

1) Формирование некоторого множества матриц репликации.

Пусть генетическая модель задачи (хромосома) имеет n локусов с общим количеством $n!$ вариантов их заполнения генами, имеющими условные номера $1, \dots, n$.

Тогда матрицы репликации можно формировать двумя способами.

Способ равновероятного формирования: в качестве матрицы выбирается любое число $r < n$ локусов $h_i^j, i = 1, \dots, n-1, j = 1, \dots, r$, которые могут занимать в хромосоме произвольные r мест с общим количеством вариантов, равным количеству сочетаний C_n^r без повторов, рис. 3.

$$C_n^r = \frac{n!}{r!(n-r)!} \quad (1)$$

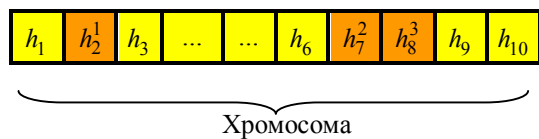


Рис. 3. Иллюстрация одного варианта расположения трёхместной матрицы в хромосоме, $n = 10, r = 3$

В каждом варианте расположения r локусов может быть без повторов размещено r генов из их общего числа n . В результате будет получено A_n^r матриц:

$$A_n^r = \frac{n!}{(n-r)!} = n(n-1)\dots(n-r+1) \quad (2)$$

Всего r -мерных матриц будет сформировано P :

$$P(r, n) = C_n^r A_n^r \quad (3)$$

Например, для $n = 10$ и $r = 2$ получим: $C_n^r = 45$; $A_n^r = 90$; $P = 4050$.

Для каждой матрицы число T вариантов расположения оставшихся $(n-r)$ генов составляет $T(r, n) = (n-r)! = 40320$. Общее количество вариантов хромосом:

$$S(r, n) = P(r, n)T(r, n) \quad (4)$$

Для данного примера получим значение $S(2, 10) = 4050 \cdot 40320 \approx 163 \cdot 10^6$.

Заметим, что исходное многообразие вариантов решения определяется выражением $M(n) = n! = 10! = 3\,628\,800 \approx 3,6 \cdot 10^6$, что значительно меньше $S(2, 10) \approx 163 \cdot 10^6$.

Сравнительная оценка величин $C_n^r, P(r, n), S(r, n), T(r, n)$ для $n = 10$ показана на рис. 4.

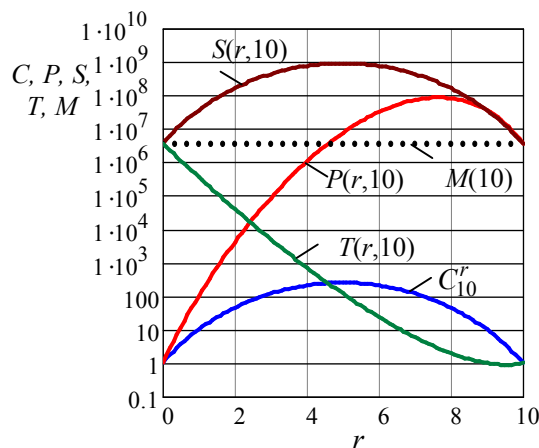


Рис. 4. Сравнение величин $C_{10}^r, P(r, 10), S(r, 10), T(r, 10), M(10)$

Качественное соотношение $C_n^r, P(r, n), S(r, n), T(r, n)$ сохраняется при любых n .

Способ приоритетного формирования основан на том свойстве матричной репликации, которое обеспечивает не равновероятное подсоединение новых структур к уже имеющейся части макромолекулы, а с приоритетом по степени их взаимодействия. В качестве количественной меры степени взаимодействия может быть использована частота встречаемости тех или иных групп одинаково заполненных локусов в результатах предварительного проведения поиска классическим генетическим алгоритмом. Эти группы локусов целесообразно выбрать в качестве матриц репликации. При таком способе формирования матриц репликации в одной хромосоме может образоваться несколько матриц различной длины.

Практические приёмы приоритетного выделения матриц репликации представлены в разделе с примером.

2) Поиск решения для каждой сформированной матрицы.

Если матрицы сформированы по равновероятной способу, то одна матрица из P обязательно принадлежит оптимальной хромосоме, т.е. глобальному экстремуму. Отсюда следует, что проведя P независимых поисков решения, мы исследуем всю область определения функции цели, включая домен, в котором расположен глобальный экстремум. Каждый поиск проводится классическим генетическим алгоритмом с той особенностью, что во всех особях каждой популяции присутствует выбранная матрица репликации, т.е. занятые ею локусы не изменяют своего содержания. Из этого следует, что размерность задачи в каждом независимом поиске уменьшена на r , т.е. многообразие вариантов в каждом поиске снижается в $\frac{n!}{(n-r)!}$

раз, (линия $T(r,10)$ на рис. 4).

Количество P матриц репликации зависит от r и имеет экстремальный характер с максимумом при $r = 0,5n$ (линия $P(r,10)$ на рис. 4). В результате общее многообразие вариантов решения задачи $S(r,n) = P(r,n)T(r,n)$ всегда превышает исходное количество вариантов $M(n)$, рис. 4. Этот вывод означает, что общая мощность множества решений задачи с использованием матриц репликации возрастает. Например, для $n = 10$ и $r = 2$ имеем: $M(10) \approx 3,6 \cdot 10^6$, а $S(2,10) \approx 163 \cdot 10^6$, т.е. общее число вариантов увеличилось примерно в 40 раз. Однако поиск решения производится не на многообразии $S(r,n)$, а разбит на P независимых поисков с мощностью множества решений, уменьшенной в $(n-r)!$ раз. И поскольку одна из матриц репликации обязательно принадлежит решению с глобальным экстремумом, то в соответствии с гипотезой М. Эйгена вероятность “выращивания” на этой матрице наилучшей хромосомы значительно возрастает. В частности, в работах [17,22] показано, что введение матричной репликации в 5-10 раз увеличивало частоту нахождения глобального экстремума генетическим алгоритмом. Аналогичные результаты получены и в рассматриваемом ниже примере решения NP-полной задачи.

Выбор длины r матриц репликации зависит от конкретной задачи и определяется степенью изолированности глобального экстремума. В том случае, если глобальный экстремум

предположительно сопровождается шлейфом локальных экстремумов, целесообразно применять малые значения r , обеспечивающие выполнение неравенства $P(r,n) \ll T(r,n)$, т.е. доминирующую роль в ходе поиска будут играть механизмы скрещивания и мутаций. При изолированном расположении глобального экстремума предпочтение следует отдавать значениям r , при которых $P(r,n) \gg T(r,n)$ с доминирующим влиянием матриц репликации. В неопределённых случаях первоначальный выбор r целесообразно осуществлять по условию:

$$r = \max\{r : P(r,n) < T(r,n)\}, \quad (5)$$

т.е. следует выбирать максимальный размер матрицы, обеспечивающий многообразие свободной части хромосомы больше, чем многообразие самих матриц, см. таблицу.

Выбор длины r матрицы репликаций

n	r	$P(r,10)$	$T(r,10)$
10	1	$1.00 \cdot 10^2$	$3.63 \cdot 10^5$
10	2	$4.05 \cdot 10^3$	$4.03 \cdot 10^4$
10	3	$8.64 \cdot 10^4$	$5.04 \cdot 10^3$
10	4	$1.06 \cdot 10^6$	$7.20 \cdot 10^2$
...
20	1	$4.00 \cdot 10^2$	$1.22 \cdot 10^{17}$
20	2	$7.22 \cdot 10^4$	$6.40 \cdot 10^{15}$
20	3	$7.80 \cdot 10^6$	$3.56 \cdot 10^{14}$
20	4	$5.63 \cdot 10^8$	$2.09 \cdot 10^{13}$
20	5	$2.88 \cdot 10^{10}$	$1.31 \cdot 10^{12}$
20	6	$1.08 \cdot 10^{12}$	$8.72 \cdot 10^{10}$
...

Из таблицы следует, что, например, при $n = 10$ условию (5) удовлетворяет значение $r = 2$, а при $n = 20$ – значение $r = 5$.

В способе приоритетного формирования матриц последние не охватывают всю область определения функции цели. Поэтому в текущих популяциях допускается присутствие особей, не содержащих матрицы.

Важно отметить, что программный поиск решения для каждой матрицы удобно реализовать в виде независимых параллельных вычислений.

3) Отбор лучшего решения сводится к просмотру результатов P независимых поисков и отбору одного или нескольких конкурентоспособных вариантов решения.

Пример решения NP-полной задачи с использованием матричной репликации

Задача о маршруте сверления печатной платы

Воспользуемся образцом платы распространённого преобразователя USB-RS485, исключив из неё с целью тестирования тривиальные участки топологии с линейным расположением большого количества точек и дополнив условием замыкания маршрута, рис. 5.

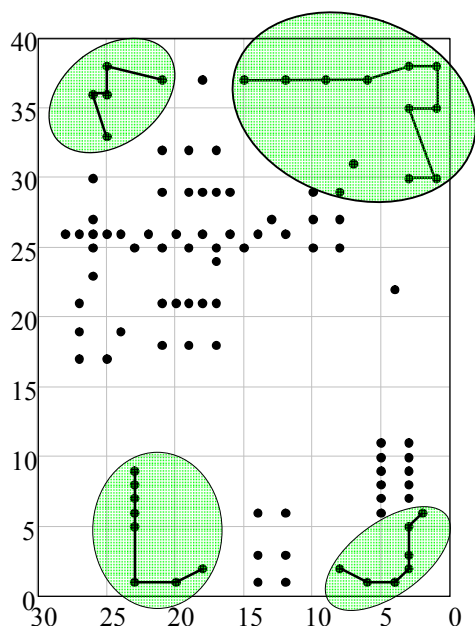


Рис. 5. Тестовый образец платы для построения оптимального маршрута

Плата содержит 99 отверстий. Размеры платы указаны в миллиметрах.

Требуется найти кратчайший замкнутый маршрут их сверления.

Начало маршрута должно совпадать с его концом для того, чтобы станок мог начать сверление очередной платы без предварительного начального перемещения сверла.

Типовой генетический алгоритм для решения этой задачи содержал только процедуры мутации и отбора. Размер популяции составлял 2000 особей, каждый поиск был ограничен по длительности 1000 циклами эволюции.

Пятисоткратное повторение поиска привело к определению нескольких близких маршрутов длиной $L = 261 \dots 264$ мм.

В результате анализа этих конкурентоспособных вариантов решения были выявлены часто встречающиеся локусы, выделенные на рис. 5. Эти локусы были использованы в качестве матриц репликации, и все четыре матрицы од-

новременно введены в исходный генетический алгоритм. Размерность задачи при этом снижается с $n = 99$ до $n = 99 - 26 = 73$.

После примерно пятидесяти повторений поиска были найдены значительно лучшие варианты решений с длинами маршрутов $L = 232$ мм и $L = 236$ мм, рис. 6 и рис. 7.

Дальнейшие многократные повторения поиска этот результат не изменили.

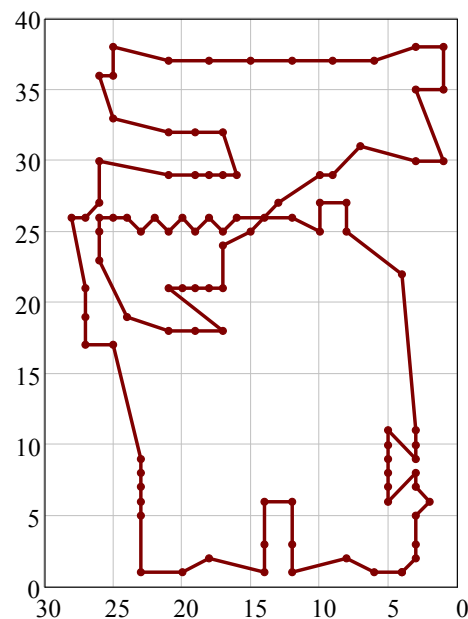


Рис. 6. Решение задачи с длиной маршрута 232 мм

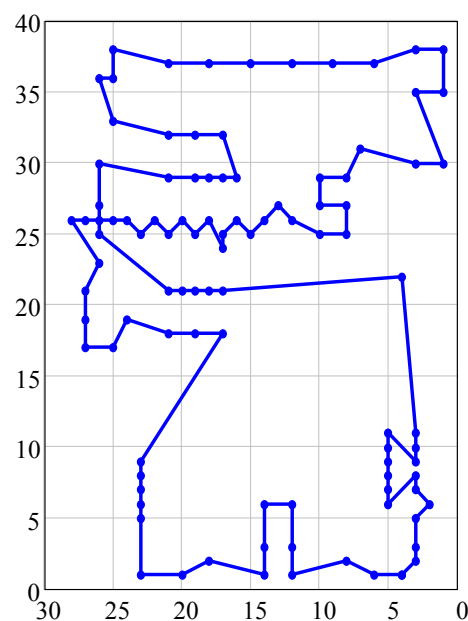


Рис. 7. Решение задачи с длиной маршрута 236 мм

Найденные решения существенно отличаются по своей топологии в центральной части,

с наиболее плотным расположением отверстий, но разница в их длине составляет всего 2%. Это обстоятельство указывает на наличие в рассматриваемой задаче, по меньшей мере, двух изолированных экстремумов.

Заключение

Результаты работы показали, что задача повышения вероятности нахождения глобального экстремума в комбинаторных задачах высокой размерности может быть успешно решена на базе генетических алгоритмов, использующих, помимо типовых процедур скрещивания, мутации и отбора, механизм матричной репликации.

Использование этого механизма в методическом плане означает, что для каждого варианта эволюции его индивидуальная матрица будет предопределять (инструктировать) предпочтения при формировании новых особей-решений. В результате эволюция популяций с разными матрицами пойдёт независимыми путями без вытесняющей конкуренции между ними. Размерность задачи для каждой такой эволюции снижается на размер матрицы.

Последнее обстоятельство позволяет исходную задачу большой размерности свести к некоторому количеству подзадач меньшей размерности. Такое снижение размерности каждой отдельной подзадачи совместно с регулярным перебором сформированного множества матриц репликации обеспечивают, в итоге, повышение вероятности нахождения глобального экстремума.

Литература

1. Bellman R.E. Dynamic programming. Prinseton, New Jersey: Princeton University Press. 1957, 2010 edition. 392 p.
2. Гришин В.А. Классическая теория управления и методы искусственного интеллекта. Проклятие размерностей // Некоторые аспекты современных проблем механики и информатики. 2018. С. 19-26.
3. Шапошникова Н.В., Ганжа Я.С. Эффективное обучение глубоких нейронных сетей для распознавания образов // Решетневские чтения. 2020. С. 260-261.
4. Лемешко Б.Ю., Лемешко С.Б., Семенова М.А. К вопросу статистического анализа больших данных // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. 2018. № 44. С. 40-49.
5. Доронина Ю.В., Рябовая В.О., Чесноков Д.И. Применение модельно-ориентированного проектирования для решения задачи структурного синтеза // Информатика и автоматизация. 2016. Т. 6. № 49. С. 122-143.
6. Кельманов А.В., Пяткин А.В. NP-полнота некоторых задач выбора подмножества векторов // Дискретный анализ и исследование операций. 2010. Т. 17. № 5. С. 37-45.
7. Гушанский С.М., Потапов В.С., Коваленко М.С. Разработка и исследование программного обеспечения и методов построения квантовых алгоритмов для решения задач NP класса // Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки. 2021. № 2 (281). С. 56-65.
8. Савось Н.Ю. Проблема классов P и NP // 68-я научно-техническая конференция учащихся, студентов и магистрантов: сб. науч. работ. В 4 ч. Минск: БГТУ, 2017. Ч. 4. С. 292-295.
9. Soto R., Rodriguez-Tello E., Monfroy E. Recent advances on swarm intelligence for solving complex engineering problems // Mathematical Problems in Engineering. 2018. Vol. 2018. 5642786. 1 p.
10. An overview of classical and quantum complexity theory / С.Н. Ugwuishiwu, М.С. Okoronkwo, P.S. Bande, С.Н. Asogwa // 2021 IEEE 4th International Conference on Information Systems and Computer Aided Education. Dalian, China. 2021. P. 166-171.
11. Васильев Е.М., Маренчук В.Р. Решение задачи Штейнера на базе генетических алгоритмов // Системы управления и информационные технологии. 2005. №2. С. 38-44.
12. Костенко В.А., Фролов А.В. Генетический алгоритм с самообучением // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2015. № 4. С. 24-38.
13. О применении эволюционных алгоритмов при анализе больших данных / К.Ю. Брестер, В.В. Становов, О.Э. Семенкина, Е.С. Семенкин // Искусственный интеллект и принятие решений. 2017. №3. С. 82-93.
14. Зорин Д.А., Костенко В.А. Алгоритм имитации отжига в задачах построения многопроцессорных расписаний // Автоматика и телемеханика. 2014. № 10. С. 97-109.
15. Курейчик В.М., Кажаров А.А. Использование роевого интеллекта в решении NP-трудных задач // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2011. Т. 120. № 7. С. 30-36.
16. Лагунова А.Д. Алгоритм стаи серых волков (GWO) для задач оптимизации // Оригинальные исследования. 2019. Т. 9. № 4. С. 52-62.
17. Васильев Е.М., Крутских И.В. Генетический алгоритм решения квадратичной задачи о назначениях // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. №3. С. 29-33.
18. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Многоальтернативность: эволюционная стратегия биологических систем // Управление большими системами. 2019. Вып. 77. С. 125-170.
19. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Эволюционные принципы построения интеллектуальных систем многоальтернативного управления // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 57. № 3. С. 4-8.
20. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Модели многоальтернативного управления и принятия решений в сложных системах // Системы управления и информационные технологии. 2014. Т. 56. № 2.1. С. 169-173.
21. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Интеллектуальные системы многоальтернативного управления: принципы построения и пути реализации // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: тр. М.: ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, 2014. С. 996-1007.
22. Васильев Е.М., Крутских И.В. Эволюционные алгоритмы с матричной репликацией // Вестник Воронежского государственного университета. 2010. Т. 17. № 5. С. 37-45.

ского государственного технического университета. 2011. Т. 7. №2. С. 21-23.

23. Taillard E.D. Comparison of iterative searches for the quadratic assignment problem // *Location Science*. 1995. №3. P. 87-105.

24. Вавилов Н.И. Закон гомологических рядов в наследственной изменчивости. Л.: Наука, 1987. 256 с.

25. Эйген М. Самоорганизация материи и эволюция биологических макромолекул. М.: Мир, 1973. 224 с.

Поступила 15.06.2022; принята к публикации 17.08.2022

Информация об авторах

Подвальный Семён Леонидович - д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел. (473) 243-77-18

Васильев Евгений Михайлович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, тел. (473) 243-77-20

MATRIX REPLICATION IN NP-COMPLETE PROBLEMS OF COMBINATORIAL OPTIMIZATION

S.L. Podval'ny, E.M. Vasil'ev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the task is to increase the probability of finding a global extremum in NP-complete high-dimensional combinatorial optimization problems. We show that the combinatorial nature of the formation of solutions leads to an isolated location of the global extremum in the domain of the goal function. This circumstance significantly reduces the efficiency of evolutionary search algorithms based on the reproduction of the properties of heredity and variability in biological evolution. In this regard, we propose to introduce a matrix replication mechanism into the mentioned algorithms. In accordance with the hypothesis of M. Eigen, this mechanism is characteristic of the prebiological stage of the emergence of life, and consists in the formation of macromolecules by building them up with elementary blocks according to the principle of signature - self-instruction. We analyzed the properties of matrix replication and disclosed the content of the algorithmic procedures necessary for its implementation: the construction of replication matrices, the implementation of independent evolution for each variant of the matrix; selection of the best options. We obtained quantitative estimates of the variety of options for possible matrices and solutions with them. We give recommendations on the choice of the length of the matrix and their number in solving practical problems. We note that the introduction of a replication matrix into the genetic search algorithm reduces the dimension of the original problem by the length of this matrix and, as a result, reduces the solution of the original problem to solving a finite number of subproblems of lower dimension. We presented an example of using the matrix replication mechanism for solving the NP-complete problem of finding the optimal route and confirmed the efficiency of using this mechanism in the search for a global extremum

Key words: NP-complete optimization problems, evolutionary algorithms, matrix replication

References

1. Bellman R.E. "Dynamic programming", Prinseton, New Jersey, Princeton University Press, 1957, 2010 edition, 392 p.
2. Grishin V.A. "Classical control theory and methods of artificial intelligence", *Some aspects of modern problems of mechanics and informatics (Nekotoryye aspekty sovremennykh problem mekhaniki i informatiki)*, 2018, pp. 19-26.
3. Shaposhnikova N.V., Ganzha Ya.S. "Efficient training of deep neural networks for pattern recognition", *Reshetnev Readings, (Reshetnevskiy chteniye)*, 2020, pp. 260-261.
4. Lemeshko B.Yu., Lemeshko S.B., Semenova M.A. "On the issue of statistical analysis of big data", *Bulletin of Tomsk State University. Control, Computer Engineering and Informatics (Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravleniye, vychislitel'naya tekhnika i informatika)*, 2018, no. 44, pp. 40-49.
5. Doronina Yu.V., Ryabovaya V.O., Chesnokov D.I. "Application of model-based design to solve the problem of structural synthesis", *Informatics and Automation (Informatika i avtomatizatsiya)*, 2016, vol. 6, no. 49, pp. 122-143.
6. Kel'manov A.V., Pyatkin A.V. "NP-completeness of some vector subset selection problems", *Discrete Analysis and Operations Research (Diskretnyy analiz i issledovaniye operatsiy)*, 2010, vol. 17, no. 5, pp. 37-45.
7. Gushanskiy S.M., Potapov V.S., Kovalenko M.S. "Development and research of software and methods for constructing quantum algorithms for solving problems of the NP class", *Bulletin of Adyge State University. Series 4: Natural-Mathematical and Technical Sciences (Vestnik Adygeyskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 4: Yestestvenno-matematicheskiye i tekhnicheskiye nauki)*, 2021, no. 2 (281), pp. 56-65.
8. Savos' N.YU. "The problem of classes P and NP", *Proc. of 68th Scientific and Technical Conf. of Pupils, Students and Undergraduates (68-ya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya uchashchikhsya, studentov i magistrantov)*, Minsk, BGTU, 2017, pp. 292-295.
9. Soto R., Rodriguez-Tello E., Monfroy E. "Recent advances on swarm intelligence for solving complex engineering problems", *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, vol. 2018, 5642786, p. 1.

10. Ugwuishiwu C.H., Okoronkwo M.C., Bande P.S., Asogwa C.N. "An overview of classical and quantum complexity theory", *2021 IEEE 4th Int. Conf. on Information Systems and Computer Aided Education*, Dalian, China, 2021, pp. 166-171.
11. Vasil'ev E.M., Marenchuk V.R. "Solution of the Steiner problem based on genetic algorithms", *Control Systems and Information Technology (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2005, no. 2, pp. 38-44.
12. Kostenko V.A., Frolov A.V. "Genetic algorithm with self-learning", *News of the Russian Academy of Sciences. Theory and control systems (Izvestiya Rossiyskoy akademii nauk. Teoriya i sistemy upravleniya)*, 2015, no. 4, pp. 24-38.
13. Brester K.Yu., Stanovov V.V., Semenkina O.E., Semenkin Ye.S. "On the application of evolutionary algorithms in the analysis of big data", *Artificial Intelligence and Decision Making (Iskusstvennyy intellekt i primyatiye resheniy)*, 2017, no. 3, pp. 82-93.
14. Zorin D.A., Kostenko V.A. "Annealing simulation algorithm in problems of building multiprocessor schedules", *Automatics and Remote Control (Avtomatika i telemekhanika)*, 2014, no. 10, pp. 97-109.
15. Kureychik V.M., Kazharov A.A. "Using swarm intelligence in solving NP-hard problems", *Proc. of the Southern Federal University. Technical Science (Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki)*, 2011, vol. 120, no. 7, pp. 30-36.
16. Lagunova A.D. "Gray Wolf Pack Algorithm (GWO) for optimization problems", *Original Research (Original'nyye issledovaniya)*, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 52-62.
17. Vasil'ev E.M., Krutskikh I.V. "Genetic Algorithm for solving the quadratic assignment problem", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 3, pp. 29-33.
18. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "Multiple alternatives: evolutionary strategy of biological systems", *Large-Scale Systems Control (Upravlenie bol'shimi sistemami)*, 2019, issue 77, pp. 125-170.
19. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "Evolutionary principles of building intelligent systems of multi-alternative control", *Control Systems and Information Technology (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2014, vol. 57, no. 3, pp. 4-8.
20. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "Models of multi-alternative control and decision-making in complex systems", *Control Systems and Information Technology (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2014, vol. 56, no. 2.1, pp. 169-173.
21. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "Intelligent systems of multi-alternative control: principles of construction and ways of implementation", *Proc. of XII All-Russian Meeting on Control Problems of VSPU-2014. Institute for Control Problems. V.A. Trapeznikova RAS (XII Vserossiyskoye soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2014. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN: trudy)*, Moscow, ICP RAS, 2014, pp. 996-1007.
22. Vasil'ev E.M., Krutskikh I.V. "Evolutionary algorithms with matrix replication", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 2, pp. 21-23.
23. Taillard E.D. "Comparison of iterative searches for the quadratic assignment problem", *Location Science*, 1995, no. 3, pp. 87-105.
24. Vavilov N.I. "The law of homologous series in hereditary variability" ("Zakon gomologicheskikh ryadov v nasledstvennoy izmenchivosti"), Leningrad, Nauka, 1987, 256 p.
25. Eygen M. "Self-organization of matter and evolution of biological macromolecules" ("Samoorganizatsiya materii i evolyutsiya biologicheskikh makromolekul"), Moscow, Mir, 1973, 224 p.

Submitted 15.06.2022; revised 17.08.2022

Information about the authors

Semyen L. Podval'nyy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel.: +7(473) 243-77-20

Evgeniy M. Vasil'ev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: vgtu-aits@yandex.ru, tel.: +7(473) 243-77-20

ПРОГРАММНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ПРОВЕРКИ ДИНАМИЧЕСКИХ СВЯЗЕЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СХЕМ И БАЗ ДАННЫХ

Д.С. Синюков¹, А.Д. Данилов², Д.А. Денисов¹, М.Е. Ушков¹

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

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: безопасность эксплуатации потенциально опасных производств является первостепенной целью в промышленности. При управлении такими объектами одной из причин возникновения нарушений являются ошибочные действия оперативного персонала. Одним из инструментов решения данной проблемы является программная проверка результатов человеческой деятельности. Для реализации такой задачи на Нововоронежской АЭС был разработан *программный комплекс* (ПК), предназначенный для проверки динамических связей между графическими объектами интерактивных схем технологического процесса и соответствующих переменных баз данных. В качестве методики была использована система кодирования Kraftwerk Kennzeichen System (KKS), позволяющая получать идентификаторы для типовых объектов энергоблока. Результатом работы ПК является информация о кодах KKS, которые не соответствуют базам данных. Организация предлагаемой базы данных реального времени сходна с организацией реляционной базы данных и позволяет обеспечить более 10 000 000 одиночных доступов в секунду. При этом имеется возможность получить файловое представление таблиц в виде дампов. При создании и редактировании видеокладов используются переменные базы данных: каждый динамический объект видеоклада связан со значением переменной. Программное обеспечение для проверки динамических связей технологических схем и базы данных было реализовано на языке Python. В результате выполнения программы формируется список кодов видеоклада, который далее сравнивается со списком кодов базы данных. При обнаружении несоответствия кода динамической связи видеоклада коду базы данных выводится сообщение об ошибке. Благодаря внедрению разработанного программного продукта на Нововоронежской АЭС была повышена достоверность представления данных оператору от различных систем энергоблока. Получены новые возможности информационной поддержки оператора, облегчающие оценку состояния оборудования и принятия решения по управлению блоком. Предлагаемая методика использования кодов KKS для проверки динамических связей между графическими объектами интерактивных схем технологического процесса и соответствующих переменных баз данных уменьшает нагрузку на оператора ядерного блока и снижает вероятность его ошибочных действий

Ключевые слова: программный комплекс, система кодирования, база данных, интерактивная схема, динамические связи

Введение

Безопасность эксплуатации потенциально опасных производств является первостепенной целью в промышленности. При управлении такими объектами одной из причин возникновения нарушений являются ошибочные действия оперативного персонала. Одним из инструментов решения данной проблемы является программная проверка результатов человеческой деятельности. Для реализации такой задачи на Нововоронежской АЭС был разработан *программный комплекс* (ПК), предназначенный для проверки динамических связей между графическими объектами интерактивных схем технологического процесса и соответствующих переменных баз данных. В качестве методики была использована система кодирования Kraftwerk Kennzeichen System (KKS), позволя-

ющая получать идентификаторы для типовых объектов энергоблока. Результатом работы ПК является информация о кодах KKS, которые не соответствуют базам данных. Кроме этого, достоинством использования данного программного продукта также является увеличение эффективности труда, так как сокращается время, необходимое для проверки видеокладов.

Характеристика системы управления технологическими процессами энергоблока

Персонал блочного пункта управления осуществляет мониторинг и управление энергоблоком с автоматизированных рабочих мест (АРМ), на которых отображаются видеоклады. Видеоклады являются интерактивными схемами технологического процесса. На них присутствуют как статические элементы без возможности управления, так и динамические, воздействие на которые приводит к изменению состо-

яния оборудования. Такой подход к управлению энергоблоком реализован в рамках системы верхнего блочного уровня (СВБУ). СВБУ является подсистемой автоматизированной системы управления технологического процесса (АСУ ТП) [1-4].

Основными функциями СВБУ являются обеспечение:

- контроля и управления технологическим процессом;
- интеграция всей информации по энергоблоку от всех систем и подсистем АСУ ТП;
- дисплейного управления оборудованием систем нормальной эксплуатации и оборудованием систем безопасности в режимах, предусмотренных проектом;
- централизованного контроля и представления как обобщенной, так и детализированной информации о состоянии энергоблока, отдельных параметрах технологического процесса и состоянии оборудования;
- контроля состояния барьеров безопасности энергоблока;
- необходимой информацией персонала различных подразделений АЭС, которым эта информация необходима в процессе работы;

- формирования сигнализации о нарушениях в работе энергоблока, отдельных систем, отдельного оборудования;
- необходимой информацией аварийного центра АЭС;
- возможности обмена информацией с другими подсистемами АСУ ТП [5].

Реализация возможности дисплейного управления обусловлена, в том числе, большим количеством оборудования и точек контроля технологического процесса. Для обеспечения функционирования СВБУ база данных АЭС содержит более 170000 переменных [6].

Пакет программ СВБУ называется Портал. Он применяется для сбора, хранения, обработки и предоставления информации операторам. Пакет программ обеспечивает возможность контроля и управления оборудованием энергоблока.

Программное обеспечение Портал состоит из нескольких компонентов (рис. 1):

- исполняющая система;
- система визуализации и регистрации технологических данных;
- система конфигурирования технологических данных [7].

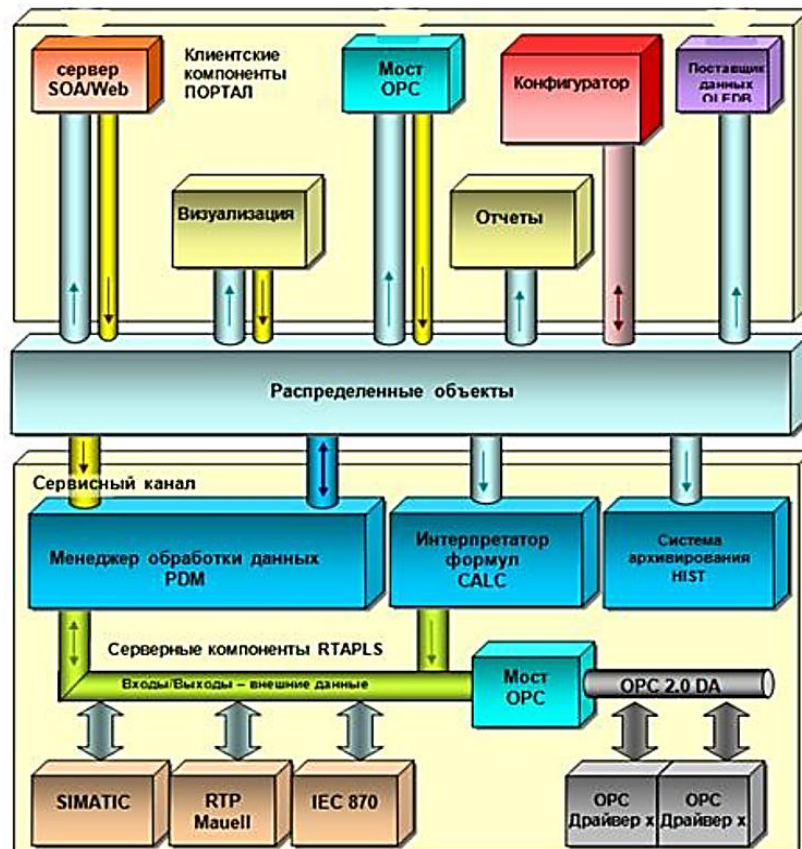


Рис. 1. Структура информационных потоков системы Портал

Исполняющая система включает в себя следующие компоненты:

- ядро (RTA), обеспечивающее работу в режиме реального времени;
- модель распределенных объектов (DBO);
- менеджер обработки данных технологического процесса (PDM);
- интерпретатор формул (CALC);
- система архивирования (HIST);
- информационно-отчетная система (REPORT);
- визуализация технологического процесса (VIEW);
- объектно-ориентированная система проектирования (RtOOS);
- драйверы (интерфейсы к системам ввода-вывода).

Вся система базируется на ядре, именуемом Архитектурой Реального Времени (RTA). Ядро предоставляет набор базовых служб. Технологии, используемые архитектурой реального времени:

- база данных в реальном времени (RtDb);
- взаимодействие процессов в реальном времени (RtIPC) – осуществляет коммуникацию данных между процессами, репликацию данных пользователям;
- управление резервированием в реальном времени.

База данных и переменных системы

Основными информационными единицами в разрабатываемой системе являются технологические данные, которые хранятся в базе данных реального времени [8].

Организация базы данных реального времени сходна с организацией реляционной базы данных. Она представляет собой совокупность связанных между собой таблиц (рис. 2).

Информационные единицы представлены в виде двоичных, аналоговых и текстовых технологических переменных. Переменные в одной таблице могут иметь несколько столбцов, которые описывают их конфигурацию. Переменные имеют уникальный идентификатор. Идентификатор обеспечивает взаимосвязь с другими таблицами. Способы взаимодействия между таблицами базы данных «one to one», «one to many». Например, в случае таблиц PLS_ANA_CONF и PLS_ANA_DYN уникальный идентификатор PVNг, который используется только в одной строке таблицы PLS_ANA_CONF («one to one»). В случае таблиц PLS_ANA_DYN и PLS_USERS уникальный идентификатор USERNR, который используется в нескольких строках таблицы PLS_USERS («one to many»).

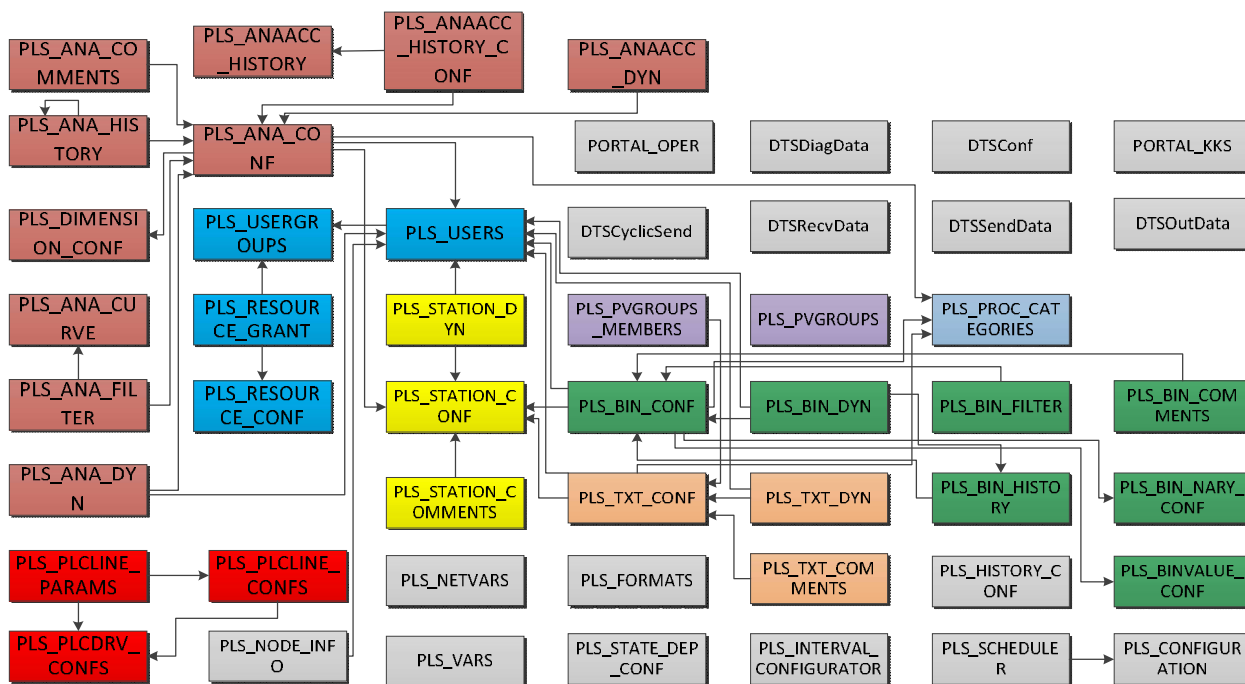


Рис. 2. Структура ОЗУ-резидентной базы данных реального времени

Рассматриваемая база данных характеризуется следующими свойствами:

- существует возможность обеспечить в реальном времени более 10 000 000 одиночных доступов в секунду;
- данные отображаются в таблицах со строками и столбцами;
- каждый из индивидуальных сетевых узлов в распределенной системе может хранить локальную копию таблиц базы данных. Репликация таблиц будет произведена автоматически в случае их изменения с помощью широкополосных протоколов;
- специальная интеграция в язык программирования С++ путем поддержки типов данных

из С++ и через процедурный, программный интерфейс;

- пусковые механизмы позволяют какому-либо приложению определять действия, которые будут активированы автоматически, когда некое приложение меняет данные в базе данных;
- таблица базы данных может быть распределена на несколько серверов, каждый из которых отвечает за определенную часть данных [9].

Схема хранения распределенных объектов приведена на рис. 3.

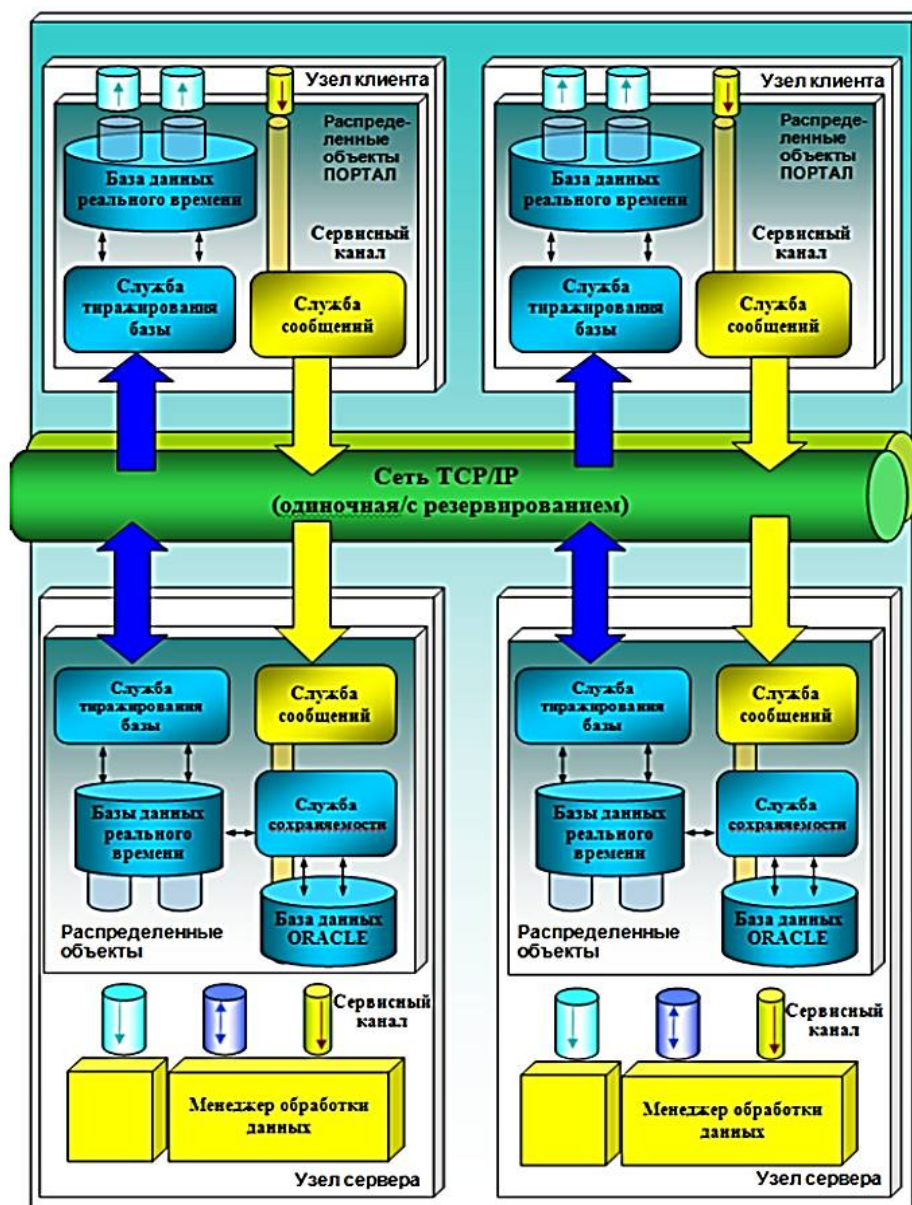


Рис. 3. Структурная схема хранения распределенных объектов

Таблицы базы данных располагаются в памяти компьютера для ускорения доступа к данным, однако имеется возможность получить файловое представление таблиц в виде дампов [10].

Дамп является файлом и представляет собой таблицу базы данных в текстовом формате. Одна строка файла соответствует одной строке таблицы, а значения соседних ячеек таблицы разделены символом «|», закомментированные строки начинаются символом «*». Первая строка файла содержит заголовок таблицы. Следующие строки определяют значения и конфигурации переменных, в соответствии с которыми они обрабатываются в системе Портал.

База данных формируется на основании импортных файлов низовой автоматике.

Создание и редактирование интерактивных схем технологического процесса

Переменные в базе данных являются сигналами от оборудования и механизмов. Они несут в себе информацию о соответствующих параметрах технологического процесса. Переменные представлены в дискретном, аналоговом и текстовом видах. Они имеют свою конфигурацию, на основании которой исполняющая система осуществляет их обработку. Переменные имеют следующую классификацию:

- входные переменные, которые отображают состояние датчиков в технологическом процессе;
- выходные переменные, которые выдаются в процесс при каждом их изменении или сразу после перезапуска системы;
- производные переменные, которые вычисляются на основе других переменных;
- системные переменные, которые формируются ПО Портал;
- переменные приложения, которые создаются прикладными приложениями;
- переменные, которые вводятся и модифицируются оператором.

При создании и редактировании видеокладов используются переменные базы данных: каждый динамический объект видеоклада связан со значением переменной. На видеокладах технологический процесс изображен в виде интерактивных схем, которые создаются в соответствии с нормативными документами. Информация предоставляется оператору в удобном и стандартизированном формате. Для создания, редактирования и отображения видео-

кадров используется система визуализации ПО Портал. Пример видеоклада представлен на рис. 4.

Система визуализации использует векторный графический стандарт SVG. Преимущество SVG состоит в том, что доступно множество редакторов и конвертеров для многократного использования разработанных изображений. Формат SVG независим от платформы. Дополнительно система визуализации имеет встроенный обозреватель для отображения гипертекстового содержимого (HTML).

Система визуализации может содержать программный код, например, для управления навигацией между окнами. Реализация алгоритмов, специфических для прикладной системы, требует использования специализированного языка программирования.

Система визуализации состоит из исполняющей и прикладной частей [7].

Исполняющая система визуализации запускается на каждой рабочей станции с графическим интерфейсом оператора и необходима для дисплейного управления. Графический интерфейс пользователя состоит из главного и нескольких дополнительных окон. Окно, в свою очередь, состоит из областей отображения, на которых могут быть представлены HTML-страницы или видеоклады.

Прикладная система используется для создания графических интерфейсов пользователя. К прикладной части относится редактор, который применяется для создания видеокладов, а также логических и арифметических связей и ссылок на источники данных. То есть в редакторе создаются динамические связи между графическими объектами и базой данных. Редактор работает с файлами формата SVG и способен реализовать часть его спецификации:

- объекты (circle – круг, line – линия, title – наименование и т.д.);
- события (OnClick – щелчок левой кнопкой мыши и т.д.);
- атрибуты (id – идентификация элемента, description – описание элемента и т.д.).

Прикладная система обеспечивает возможность создания и редактирования видеокладов в соответствии с требованиями технологического процесса. Работа с графическими схемами происходит в специализированном редакторе ПО Портал. После создания графической схемы необходимо создать динамическую связь между графическим объектом и соответствующей переменной базы данных.

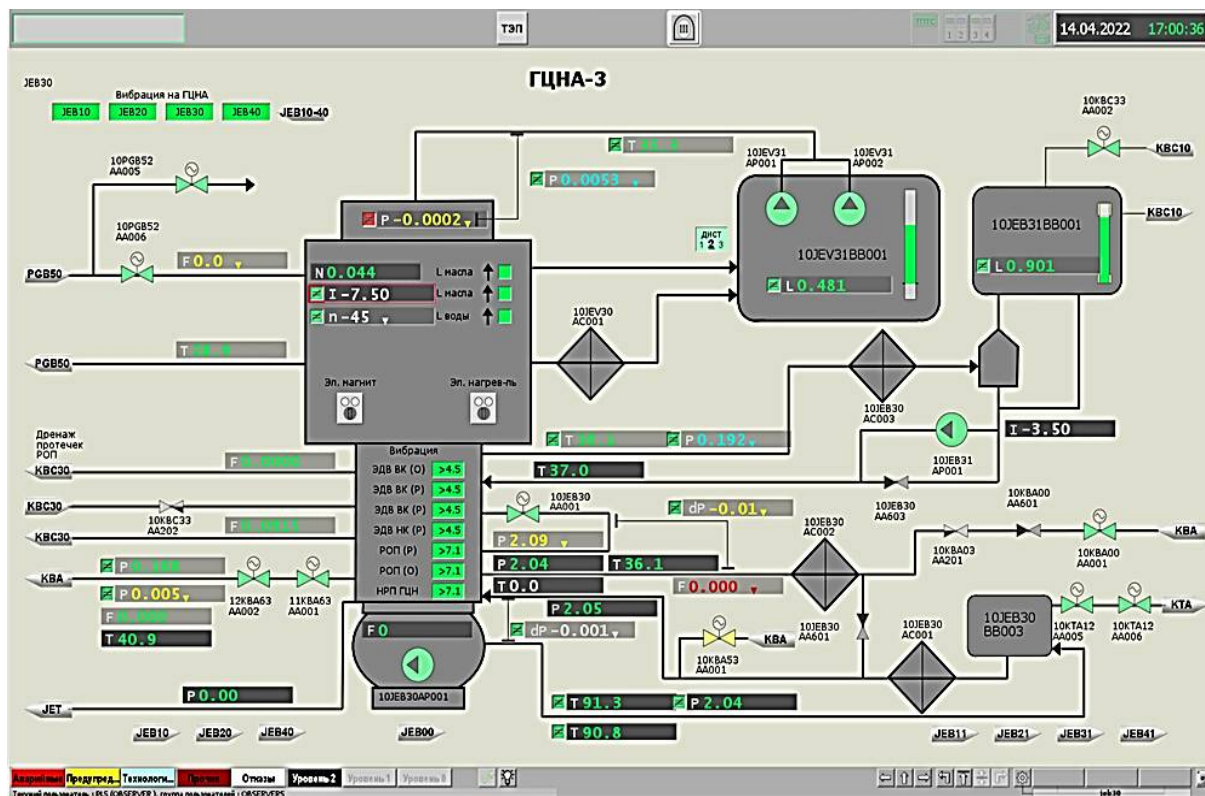


Рис. 4. Пример визуализации видеокadra при использовании платформы Портал

Существует риск создания неправильной динамической связи вследствие большого количества графических объектов и переменных.

Для устранения данной проблемы был разработан программный комплекс, который проверяет корректность созданной динамической связи между графическим объектом технологической схемы и соответствующей переменной базы данных.

Программное обеспечение для проверки динамических связей технологических схем и базы данных

Языком программирования для написания кода программы был выбран Python. Выбор данного языка обосновывается следующим:

- кроссплатформенностью;
- возможностью дальнейшего развития;
- наличием множества библиотек с готовыми решениями для различных задач.

Алгоритм работы программы представлен на рис. 5.

Программа работает с дампами базы данных в формате dmp и с файлами видеокadров в формате svg.

В процессе написания программы использовалось несколько модулей и функций, созданных для языка программирования Python.

Импортируемые модули:

- модуль *re* для работы с регулярными выражениями;
- модуль *codecs* для работы с кодками;
- модуль *os* для работы с операционной системой;
- модуль *xml.dom* для работы с файлами формата *svg*.

Из указанной директории открываются дампы PLS_ANA_CONF и PLS_BIN_CONF, которые разбиваются на строки. В цикле анализируется каждая строка. Если строка не является заголовком, то из заданной колонки строки извлекается код технологического оборудования. В результате работы цикла создается список кодов.

Формирование списка файлов указанной директории осуществляется модулем *os*. В цикле проверяется формат каждого файла. Найденный видеокadр считывается как файл *xml*. Теги файла анализируются в цикле, где осуществляется поиск кода динамической связи при условии наличия атрибута динамической связи. Регулярное выражение для поиска кода: $\backslash d\{2\}\backslash D\{3\}\backslash d\{2\}\backslash D\{2\}\backslash d\{3\}$. В результате работы цикла формируется список кодов видеокadра.

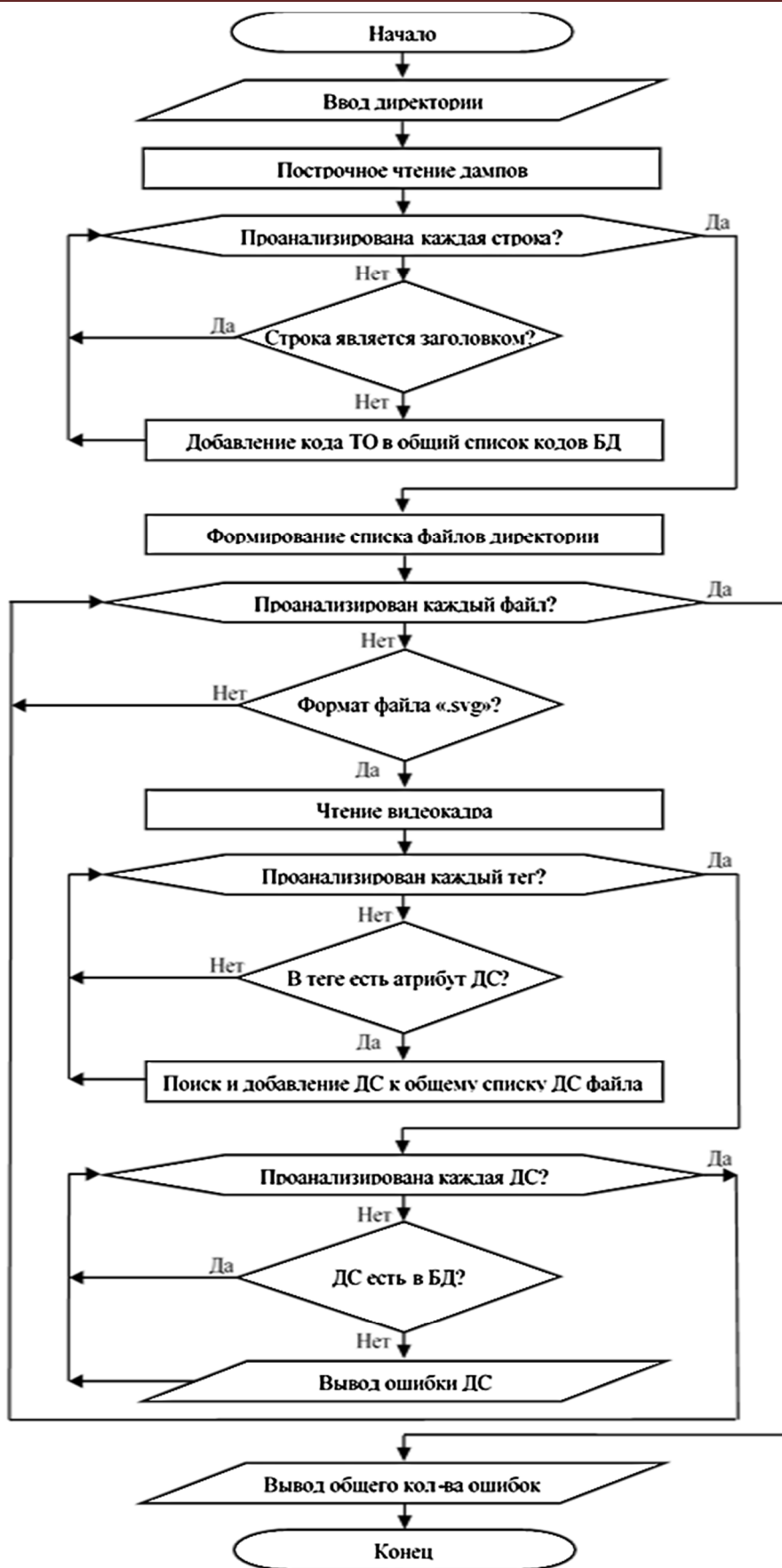


Рис. 5. Алгоритм работы программы

```

Run: check_din_link
Старт работы программы
Определение переменных в файле "PLS_ANA_CONF.dmp" базы данных
Определение переменных в файле "PLS_BIN_CONF.dmp" базы данных
Создание общего списка переменных. Общее количество переменных базы данных: 173315
Проверка динамических связей видеокадра "10bba.svg"
Проверка динамических связей видеокадра "10bbb.svg"
Проверка динамических связей видеокадра "10bbc.svg"
Проверка динамических связей видеокадра "10bbd.svg"
Проверка динамических связей видеокадра "10bde.svg"
Проверка динамических связей видеокадра "10bdf.svg"
Проверка динамических связей видеокадра "10bha.svg"
Проверка динамических связей видеокадра "10bhb.svg"
Проверка динамических связей видеокадра "10bhc.svg"
Проверка динамических связей видеокадра "10bh35.svg"
Ошибка при создании динамической связи!
Код KKS "10BGT11GS002" динамической связи видеокадра "10bh35.svg" отсутствует в базе данных!
Ошибка при создании динамической связи!
Код KKS "10BGT12GS002" динамической связи видеокадра "10bh35.svg" отсутствует в базе данных!
Общее количество ошибок при создании динамических связей: 2

```

Рис. 6. Пример визуализации работы программного комплекса

В цикле список кодов видеокадра сравнивается со списком кодов базы данных. Далее при обнаружении несоответствия кода динамической связи видеокадра коду базы данных выводится сообщение об ошибке.

В целях подтверждения корректности функционирования разработанного программного средства выполнялась его верификация путем сопоставления выходных данных программы с проверенными данными, где преднамеренно были созданы ошибки. Для этого в общую директорию были загружены дампы PLS_ANA_CONF и PLS_BIN_CONF базы данных с общим количеством 173315 переменных, а также десять видеокадров. В одном из видеокадров умышленно были созданы две динамические связи, коды которых отсутствуют в базе данных. Программа корректно обнаружила ошибки. На выходе программа выводит имена дампов базы данных, общее количество переменных, имена файлов видеокадров, в случае обнаружения ошибок – коды и имена видеокадров с ошибками, общее количество ошибок (рис. 6).

Заключение

В результате внедрения разработанного программного комплекса в систему управления Нововоронежской атомной электростанции была решена одна из проблем повышения эксплуатационной надежности оборудования и систем безопасности в режимах, предусмотренных проектом. Достигнуты цели по достоверности

представления данных оператору от различных систем энергоблока. Расширены возможности представления данных. Получены новые возможности информационной поддержки оператора, облегчающие оценку состояния оборудования и принятия решения по управлению блоком. Повышена надёжность и устойчивость работы системы верхнего блочного уровня за счет расширения возможностей контроля динамических элементов при использовании интерактивных схем технологических процессов. Предлагаемая методика использования кодов KKS для проверки динамических связей между графическими объектами интерактивных схем технологического процесса и соответствующих переменных баз данных уменьшает нагрузку на оператора ядерного блока и снижает вероятность его ошибочных действий.

Литература

1. Поваров В.П., Бакиров М.Б., Данилов А.Д. Автоматизированная система многопараметрического мониторинга параметров состояния энергетических установок АЭС. Воронеж: Научная книга, 2017. 276 с.
2. Поваров В.П., Бакиров М.Б., Данилов А.Д. Обработка данных в системе непрерывного мониторинга эксплуатационной повреждаемости критических элементов энергетических установок // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т.14. № 1. С. 64-72.
3. Intellectual decision-making system in the context of potentially dangerous nuclear power facilities / A. Danilov, V. Burkovsky, S. Podvalny, K. Gusev, V. Povarov // MATEC Web of Conferences. 13. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018". 2018. P. 2009.

4. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterrupted 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. P. 2012.

5. Терехов Д.В., Данилов А.Д. Обработка потоков данных в информационных системах верхнего уровня управления процессами // Системы управления и информационные технологии. 2019. № 1 (75). С. 67-70.

6. Терехов Д.В., Сидоренко Е.В., Данилов А.Д. Тенденции развития АСУТП на Нововоронежской АЭС // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 3. С. 66-76.

7. Данилов А.Д., Терехов Д.В. Особенности архитектуры информационной системы реального времени // Системы управления и информационные технологии. 2018. № 4 (74). С. 49-54.

8. Данилов А.Д., Синюков Д.С. Механизм распределения данных о специальных транзакциях с оперативным контентом в реальном времени на основе кэширования в гетерогенных объектах распределенной сети // Информационные технологии моделирования и управления. 2021. Т. 125. № 3. С. 216-223.

9. Поваров В.П., Терехов Д.В., Данилов А.Д. Особенности использования многоуровневой конфигурации специализированной информационной системы в задачах реализации принципа разнообразия систем безопасности 4-го блока Нововоронежской АЭС // Ядерная и радиационная безопасность. 2019. № S1. С. 41-45.

10. Терехов Д.В., Данилов А.Д. Проблема разработки принципов организации информационного обмена между иерархическими уровнями в многоуровневых АСУТП // Информационные технологии моделирования и управления. 2021. Т. 124. № 2. С. 151-157.

Поступила 17.05.2022; принята к публикации 15.08.2022

Информация об авторах

Синюков Денис Сергеевич – заместитель начальника цеха тепловой автоматики, филиал АО «Концерн Росэнергоатом», «Нововоронежская атомная станция» (396072, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1), e-mail: sinyukovds@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Данилов Александр Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (324006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

Денисов Денис Анатольевич – начальник участка СВБУ цеха тепловой автоматики, филиал АО «Концерн Росэнергоатом», «Нововоронежская атомная станция» (396072, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1), e-mail: DenisovDA@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Ушков Максим Евгеньевич – инженер участка СВБУ цеха тепловой автоматики, филиал АО «Концерн Росэнергоатом», «Нововоронежская атомная станция» (396072, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1), e-mail: UshkovME@nvnpp1.rosenergoatom.ru

SOFTWARE COMPLEX FOR CHECKING DYNAMIC RELATIONS OF TECHNOLOGICAL SCHEMES AND DATABASES

D.S. Sinyukov¹, A.D. Danilov², D.A. Denisov¹, M.E. Ushkov¹

¹Branch of JSC "Concern Rosenergoatom", "Novovoronezh Nuclear Power Plant",
Novovoronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: safety of operation of potentially hazardous industries is an urgent task in the industry. When managing such objects, one of the causes of violations is the erroneous actions of operational personnel. One of the tools for solving this problem is software verification of the results of human activity. To implement such a task, Novovoronezh NPP developed a software package designed to check the dynamic links between graphical objects of interactive process flow diagrams and the corresponding variable databases. As a methodology, the Kraftwerk Kennzeichen coding System (KKS) was used, which makes it possible to obtain identifiers for typical power unit objects. The result of the software operation is information about KKS codes that do not correspond to the databases. The organization of the proposed real-time database is similar to the organization of a relational database and allows for more than 10,000,000 single accesses per second. In this case, it is possible to obtain a file representation of tables in the form of dumps. When creating and editing video frames, database variables are used: each dynamic video frame object is associated with a variable value. The software for checking the dynamic links of technological schemes and the database was implemented in Python. As a result of the program, a list of video frame codes is formed, which is then compared with the list of database codes. If a video frame dynamic link code does not match the database code, an error message is displayed. Implementation of the developed software product at Novovoronezh NPP increased the reliability of data presentation to the operator from various power unit systems. New opportunities for information support of the operator were obtained, which facilitate the assessment of the state of the equipment and decision-making on the control of the unit. The proposed method for using KKS codes to check dynamic links between graphical objects of interactive flow diagrams and the corresponding database variables reduces the load on the operator of the nuclear unit and reduces the likelihood of his erroneous actions

Key words: software package, coding system, database, interactive diagram, dynamic links

References

1. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. "Automated system for multi-parameter monitoring of state parameters of NPP power plants" ("Avtomatizirovannaya sistema mnogoparametricheskogo monitoringa parametrov sostoyaniya energeticheskikh ustanovok AES"), Voronezh: Nauchnaya kniga, 2017, 276 p.
2. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. "Data processing in the system of continuous monitoring of the operational damage of critical elements of power plants", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 1, pp. 64-72.
3. Danilov A., Burkovsky V., Podvalny S., Gusev K., Povarov V. "Intellectual decision-making system in the context of potentially dangerous nuclear power facilities", *MATEC Web of Conferences. 13. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018"*, 2018, pp. 2009.
4. Povarov V., Danilov A., Burkovsky V., Gusev K. "Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterruptible condition monitoring", *MATEC Web of Conferences. 13. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018"*, 2018, pp. 2012.
5. Terekhov D.V., Danilov A.D. "Processing of data streams in information systems of the upper level of process management", *Control Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2019, no. 1 (75), pp. 67-70.
6. Terekhov D.V., Sidorenko E.V., Danilov A.D. "Trends in the development of process control systems at the Novovoronezh NPP", *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Energy (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika)*, 2017, no. 3, pp. 66-76.
7. Danilov A.D., Terekhov D.V. "Features of the real-time information system architecture", *Management Systems and Information Technologies (Sistemy upravleniya i informatsionnye tekhnologii)*, 2018, no. 4 (74), pp. 49-54.
8. Danilov A.D., Sinyukov D.S. "Mechanism for distributing data on special transactions with real-time operational content based on caching in heterogeneous objects of a distributed network", *Information Technologies of Modeling and Control (Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2021, vol. 125, no. 3, pp. 216-223.
9. Povarov V.P., Terekhov D.V., Danilov A.D. "Features of using a multi-level configuration of specialized information systems in the tasks of implementing the principle of diversity of safety systems of the 4th unit of the Novovoronezh NPP", *Nuclear and Radiation Safety (Yadernaya i radiatsionnaya bezopasnost')*, 2019, no. S1, pp. 41-45.
10. Terekhov D.V., Danilov A.D. "The problem of developing principles for organizing information exchange between hierarchical levels in multilevel process control systems", *Information Technologies of Modeling and Control (Informatsionnye tekhnologii modelirovaniya i upravleniya)*, 2021, vol. 124, no. 2, pp. 151-157.

Submitted 17.05.2022; revised 15.08.2022

Information about the authors

Denis S. Sinyukov, Deputy Head of the Thermal Automation Department, Branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh Nuclear Power Plant (1 Yuzhnaya Industrial Zone, Novovoronezh 396072, Voronezh Region, Russia), e-mail: sinyukovds@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Aleksandr D. Danilov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394016, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

Denis A. Denisov, Head of the SVBU section of the Thermal Automation Shop, Branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh Nuclear Power Plant (1 Yuzhnaya Industrial Zone, Novovoronezh 396072, Voronezh Region, Russia), e-mail: DenisovDA@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Maksim E. Ushkov, engineer of the SVBU section of the Thermal Automation Shop, Branch of Rosenergoatom Concern JSC, Novovoronezh nuclear power plant (1 Yuzhnaya Industrial Zone, Novovoronezh 396072, Voronezh Region, Russia), e-mail: UshkovME@nvnpp1.rosenergoatom.ru

ВОЗМОЖНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ СУЩЕСТВУЮЩИХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОННОГО ДОКУМЕНТООБОРОТА ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ТВЕРДОТЕЛЬНЫХ РЕЛЕ

Д.Н. Трубицын

Орловский государственный университет имени И.С. Тургенева, г. Орёл, Россия

Аннотация: рассматриваются функциональные возможности различных существующих систем электронного документооборота и систем автоматизированного проектирования. Перечислены основные функции САПР и СЭД при решении задач в различных подразделениях производства. Для примера рассмотрены СЭД Directum, Microsoft sharepoint и Дело. Из номенклатуры существующих систем автоматизированного проектирования рассмотрены Компас-3D, Altium designer и AutoCAD. Выполнен анализ их функционала, представлены достоинства и недостатки систем при использовании их в проектировании и производстве твердотельных реле. Проанализированы их совместимость между собой и сложности, возникающие при обмене информацией и переводе документов из одной системы в другую. Приводится сравнительная таблица функциональных возможностей современных САПР и СЭД. Рассматриваются варианты решений проблемы передачи данных между различными САПР и СЭД и делается вывод о целесообразности расширения функционала одной из существующих СЭД или САПР для обеспечения взаимосвязи между различными документами проекта, и возможно, в дальнейшем автоматического выпуска отдельных документов при наличии в предыдущих документах всей необходимой информации для формирования нового документа

Ключевые слова: система электронного документооборота, система автоматизированного проектирования

Введение

В настоящее время в большее число различных сфер жизни внедряются информационные технологии. Одним из основных направлений развития являются системы электронного документооборота (ЭДО). Производство продукции любого вида предполагает наличие рабочей конструкторской, технологической, эксплуатационной и прочих видов документации, которая используется на всех этапах жизненного цикла изделия. Использование ЭДО может обеспечить своевременную передачу новых версий документов всем участникам производства, хранение, контроль версий и многое другое. Кроме того, применение ЭДО позволяет ускорить производство за счет уменьшения затрат времени на передачу документов между различными подразделениями. Также применение ЭДО позволяет сократить количество печатных документов и их копий, что повышает экологичность производства. В данной статье рассматривается возможность применения ЭДО при производстве твердотельных реле.

Требования к ЭДО при производстве изделий

В процессе разработки и изготовления может потребоваться следующая документация:

1. Рабочая конструкторская документация. Разрабатывается группой инженеров, проектирующих твердотельное реле. Данная документация должна быть доступна для просмотра, копирования и корректировки руководителю проекта и группе инженеров, которая занимается разработкой твердотельных реле. В то же время, данная документация должна быть доступна для копирования и просмотра, но не для корректировки, специалистам отдела технического контроля и рабочим производства, выпускающего данный вид реле. В случае внесения каких-либо изменений новую версию документов следует отправить всем работникам, имеющим копии данной документации. Соответственно автоматизированная система должна также вести учет копий документов, отправленных в различные подразделения. В идеале – в автоматическом режиме выполнять рассылку новых версий документов вместе с извещениями об изменении. Актуальная конструкторская документация должна храниться в электронном архиве.

2. План работ на определенный период времени. Содержит данные об объемах и сроках выпуска продукции. Составляется руковод-

ством предприятия и должен быть доступен всем участникам производственного процесса для просмотра и копирования.

3. Ведомость материалов. Составляется на основе плана работы и требуемых объемов продукции. Должна быть доступна в отделе снабжения. В идеальном случае, документ должен формироваться автоматически при наличии перечня материалов для выпуска каждого из изделий и, соответственно, плана производства с требуемыми объемами выпуска.

4. Технологические документы. Должны быть доступны для просмотра и редактирования технологам предприятия и передаваться на производство, оставаясь доступными для просмотра и копирования работникам производственных подразделений. Техпроцессы должны храниться в электронном архиве технологической документации. Технологические паспорта должны формироваться по мере изготовления изделий, в них должны ставиться отметки о выполнении технологических операций. Отметки должны ставить работники предприятия, выполнявшие технологические операции, руководители производственных подразделений и представители ОТК, занимавшиеся проверкой данных изделий. Заполненные технологические паспорта должны храниться в специальном архиве.

5. Протоколы проверок изделий из тех или иных выпускаемых партий должны быть доступны для копирования и корректировки работникам службы ОТК.

6. Перечень изготовленной продукции должен быть доступен для редактирования и просмотра работникам производства, специалисту, ответственному за склад готовой продукции, отделу продаж и прочим работникам, связанным с реализацией готовой продукции.

7. Эксплуатационная документация (в случае твердотельных реле ею является лист данных об изделии конкретной марки) должна создаваться инженерами, проектировавшими реле данной марки, и быть доступна для копирования и просмотра в открытом доступе для всех лиц, которые могут эксплуатировать данное изделие (если изделие не является секретным, чаще всего это публикация в интернете).

8. Множество внутренних документов, выпускаемых различными подразделениями.

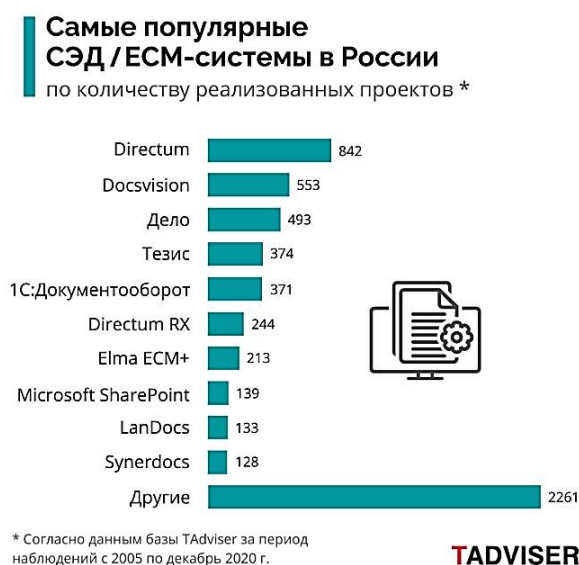
Кроме перечисленного, система ЭДО должна обеспечивать резервное копирование

данных во избежание потери информации при выходе из строя оборудования.

Рассмотрим, какие системы ЭДО используются на сегодняшний день, и какие возможности они предоставляют.

Перечень средств для реализации ЭДО

Согласно статистике, составленной базой TAdviser, наиболее широко в России применяются следующие СЭД системы [1]:



Рассмотрим, какие возможности они предоставляют.

1. Directum [1] – система ЭДО отечественной разработки. Обеспечивает широкий спектр возможностей по работе с бухгалтерскими и внутриорганизационными документами, обеспечивает передачу и хранение документов по работе с персоналом, входящих и исходящих писем, графиков отпусков, командировок и т.д. Кроме того, имеет функционал по работе со складом и с поставщиками и функционал составления планов производства. Из недостатков, применительно к рассматриваемой задаче, следует отметить отсутствие функционала по работе с проектными документами.

2. Microsoft sharepoint [2] – система ЭДО корпорации Microsoft. Данная система представляет собой не специализированную СЭД, а скорее, облачное хранилище файлов, которое можно настроить для целей организации ЭДО. Функционал представлен, как уже говорилось, облачным хранилищем данных, общим календарем, обеспечивающим планирование работ, и некоторыми другими функциями. Недостатком

является отсутствие функционала для работы с конструкторскими, технологическими и прочими производственными документами. Также нет функционала для работы с поставщиками и учета ресурсов склада.

3. Дело [3] – система СЭД для проектных организаций. Обеспечивает работу с персоналом, электронный архив документов, автоматизацию работ с поставщиками компонентов, учет содержимого склада и управление проектной деятельностью. Система обеспечивает учет изменений документов, обработку запросов на изменения и т.д. Однако система не обеспечивает функционала непосредственно для проектирования, работы с технологическими документами, данными о готовой продукции.

В целом, исходя из рассмотренного, можно сделать вывод, что на сегодняшний день существуют программы с хорошим функционалом для работы с внутриорганизационными и внеорганизационными бухгалтерскими, складскими документами и документами по управлению персоналом. Однако функционал, обеспечивающий проектирование с ними, никак не соотносится и является исключительно областью систем автоматизированного проектирования (САПР).

Функциональные характеристики САПР

Рассмотрим с другой стороны, какой функционал предоставляют системы САПР.

САПР Компас-3D [4]. САПР отечественной разработки, предоставляет широчайший функционал для проектирования механических систем, архитектуры приборостроительных систем и т.д. Данный САПР поддерживает автоматическую связь документов проекта (т.е., например, при внесении изменений в сборочный чертеж автоматически корректируются данные в спецификации и номера позиций на чертеже, уже в соответствии с обновленной спецификацией), частичную автоматизацию расчетов и т.д. Последние версии Компас-3D обеспечивают работу с облачным хранилищем документов. В то же время никакого функционала, выходящего за рамки САПР, у него нет.

Altium designer [5] – программа САПР, разработанная и оптимизированная для разработки электрических принципиальных схем и трассировки печатных плат. Программа предоставляет широчайшие возможности по проектированию печатных плат. Помимо собственно проектирования принципиальных схем и плат, САПР обеспечивает формирование файлов для

производства и монтажа печатной платы, позволяет экспортировать 3D модель печатного узла в формат STEP, а перечень элементов в формат Excel. Но так же, как и у Компаса, функционала для работы с документами после проектирования у него нет.

AutoCAD [6] – Программа САПР для разработки элементов механики. По функционалу примерно аналогичен Компас-3D. Есть конфигурация, оптимизированная для разработки строительных конструкций. Поддержания взаимосвязи между документами проекта нет.

Для наглядности сравнительный анализ функциональных возможностей существующих САПР и СЭД приведен в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Параметр	СЭД		
	Directum	Sharepoint	Дело
Электронный архив	+	–	+
Учет комплектации на складе	+	–	+
Запрос на закупку комплектации	–	–	+
Верификация документов с помощью ЭП	+	–	+
Проектирование механических элементов		–	–
Проектирование печатных плат	–	–	–
Поддержание связности документов проекта	–	–	–
Облачное хранение документов	+	+	+
Ограничение доступа к документам	+	+	+
Работа с внутренними служебными документами	+	+	+
Работа с договорами	+	+	+

Таблица 2

Параметр	САПР		
	Компас-3D	Altium designer	AutoCAD
Электронный архив	–	–	–
Учет комплектации на складе	–	–	–
Запрос на закупку комплектации	–	–	–
Верификация документов с помощью ЭП	–	–	–
Проектирование механических элементов	+	–	+
Проектирование печатных плат	–	+	–
Поддержание связности документов проекта	+	–	–
Облачное хранение документов	–	–	–
Ограничение доступа к документам	–	–	–
Работа с внутренними служебными документами	–	–	–
Работа с договорами	–	–	–

Таким образом, можно сказать, что на сегодняшний день существует множество СЭД, оптимизированных для своей области задач, но при этом много времени и усилий требуется для переноса из одного в другой вид САПР или СЭД, например:

- Altium designer позволяет автоматически создать перечень электронных компонентов, но выведет он его в формате Excel, и для оформления перечня в соответствии с ЕСКД, например, в программе Компас-3D, придется переносить данные из одного электронного документа в другой вручную;

- Компас 3D обеспечивает взаимосвязь документов внутри проекта, однако, например, составить перечень необходимой комплектации для изготовления всего проекта целиком и на основе данных о объемах выпуска автоматически сформировать заявку на заказ комплектующих Компас не может, необходимо делать это вручную;

- AutoCAD аналогичен Компас 3D, за исключением отсутствия взаимосвязи между документами проекта;

- Современные программы СЭД могут вести учет количества компонентов и материалов

на складе, но исходя из плана работ по выпуску изделий определенной марки, автоматически получить данные о необходимых компонентах для выпуска из файлов Компаса и составить список недостающих компонентов (или заявку на заказ компонентов у поставщиков) они не могут, и это также необходимо делать вручную.

Таких примеров можно привести множество. Необходимость вручную выполнять все эти действия замедляет и затрудняет процесс производства, повышает вероятность ошибок, приводит к нерациональному использованию трудовых ресурсов и увеличению себестоимости продукции. При этом все необходимые данные для перевода перечисленных операций в автоматический режим уже есть в электронных документах. Проблема в том, что эти данные находятся в разных форматах и нет программного обеспечения, выполняющего эти операции и работающего с этими форматами одновременно.

Соответственно, автоматизация этих задач может быть выполнена тремя способами:

- Разработка нового приложения, обеспечивающего функции всех перечисленных приложений.

- Разработка СЭД, способной работать с документами форматов разных САПР и СЭД, обеспечивающей описанные функции.

- Доработка существующей СЭД под конкретную задачу с реализацией недостающего функционала.

Для автоматизации производства твердотельных реле целесообразно использовать третий вариант автоматизации. За основу, исходя из минимальных необходимых доработок, можно взять СЭД «Дело».

Заключение

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Существующие на сегодняшний день САПР и СЭД хорошо обеспечивают решение задач в своей области проектирования или управления производством, однако мало приспособлены для автоматизации работы между различными областями проектирования и управления производством.

2. Для дальнейшей автоматизации процесса электронного документооборота целесообразно использовать СЭД с доработкой функции

онала для обеспечения связности СЭД с конструкторскими документами.

Литература

1. Статистика систем СЭД и функционал СЭД Directum RX. URL: <https://www.directum.ru/products/directum> (Дата обращения: 10.04.2022)
2. Функционал СЭД Microsoft sharepoint. URL: <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/business?market=ru> (Дата обращения: 12.04.2022)

3. Функционал СЭД Дело. URL: <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/business?market=ru> (Дата обращения: 12.04.2022)

4. Функционал САПР Компас-3D. URL: <https://kompas.ru/publications/video/?cat=3> (Дата обращения: 13.04.2022)

5. Функционал САПР Altium designer. URL: <https://www.altium.com/ru/altium-designer> (Дата обращения: 14.04.2022)

6. Функционал САПР AutoCAD. URL: <https://www.autodesk.ru> (Дата обращения: 14.04.2022)

Поступила 05.06.2022; принята к публикации 15.08.2022

Информация об авторах

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

POSSIBILITY OF USING EXISTING ELECTRONIC DOCUMENT MANAGEMENT SYSTEMS IN THE PRODUCTION OF SOLID RELAYS

D.N. Trubitsyn

Turgenev Orel State University named, Orel, Russia

Abstract: the article discusses the functionality of various existing electronic document management systems and computer-aided design systems. The main functions of CAD and EDMS, when solving problems, in various departments of production are listed. As examples, EDMS Directum, Microsoft sharepoint and Delo are considered. From the range of existing computer-aided design systems, Compass-3D, Altium designer and AutoCAD are considered. I carried out the analysis of their functionality, advantages and disadvantages of systems, when using them in the design and production of solid relays. I also analyzed their compatibility with each other, and the difficulties that arise when exchanging information and translating documents from one system to another. The article provides a comparative table of the functionality of modern CAD and EDMS. The article also discusses options for solving the problem of data transfer between various CAD and EDMS, and concludes that it is expedient to expand the functionality of one of the existing EDMS or CAD systems to ensure the relationship between various project documents, and possibly, in the future, the automatic release of individual documents, if available in previous documents all the necessary information to form a new document

Key words: electronic document management system, computer-aided design

References

1. Statistics of CAD systems and CAD functionality of Directum RX, available at: <https://www.directum.ru/products/directum> (date of access 10.04.2022)
2. Functionality of Microsoft sharepoint EDMS, available at: <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/business?market=ru> (date of access 12.04.2022)
3. CAD Delo functionality, available at: <https://www.microsoft.com/ru-ru/microsoft-365/business?market=ru> (date of access 12.04.2022)
4. The functionality of the Compass-3D CAD, available at: <https://kompas.ru/publications/video/?cat=3> (date of access 13.04.2022)
5. Altium designer CAD functionality, available at: <https://www.altium.com/ru/altium-designer> (date of access 14.04.2022)
6. Functionality of AutoCAD, available at: <https://www.autodesk.ru> (date of access 14.04.2022)

Submitted 05.06.2022; revised 15.08.2022

Information about the authors

Denis N. Trubitsyn, graduate student, Turgenev Oryol State University (29 Naugorskoe Highway, Orel 302020, Russia), e-mail: dragonclaw.hook@yandex.ru, tel.: +7 (909)-229-4037, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6232-0363>

АЛГОРИТМ ОБУЧЕНИЯ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ ДЛЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ МНОГОАГЕНТНЫХ СИСТЕМ, ОСНОВАННЫЙ НА ОБМЕНЕ ОПЫТОМ И ОБУЧЕНИИ АГЕНТОВ СЛУЧАЙНОМУ ВЗАИМОДЕЙСТВИЮ

Ю.В. Дубенко, Н.А. Рудешко

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия

Аннотация: представлен разработанный новый алгоритм обучения с подкреплением для децентрализованных многоагентных систем, основанный на обмене опытом и обучении агентов случайному взаимодействию. Определены основные проблемы многоагентного обучения с подкреплением. Описан класс децентрализованных многоагентных систем, основанных на случайном взаимодействии агентов, которое приводит к возникновению интеллектуального глобального поведения, не контролируемого отдельными агентами. Определена актуальная задача для децентрализованных систем, реализованных на основе парадигмы обучения с подкреплением. Указано, что конечная цель обучения взаимодействию между собой – максимизация среднего подкрепления. Предложены алгоритмы, применение которых ведёт к достижению этой цели, такие как алгоритм обучения агентов случайному взаимодействию, а также алгоритм формирования подгрупп агентов-подчиненных на основе «области видимости» агента-лидера. Для проверки эффективности предложенного алгоритма обучения с подкреплением для децентрализованных многоагентных систем, основанного на обмене опытом и обучении агентов случайному взаимодействию, была выбрана задача поиска агентами выхода из лабиринта. Приведены результаты выполнения алгоритма на модели, разработанной в среде Microsoft Unity. От имеющихся аналогов алгоритм отличается применением способа формирования подгрупп агентов-подчиненных на основании «области видимости» агента-лидера с целью снижения размерности «информационных сообщений» и с учетом аппаратной составляющей агента при реализации обмена опытом

Ключевые слова: обучение с подкреплением, многоагентные системы, случайное взаимодействие, агенты-лидеры, агенты-подчинённые, лабиринты

Введение

Существует класс задач, при решении которых лучших результатов возможно добиться путем применения организованной группы агентов – многоагентной системы. При этом одним из перспективных вариантов реализации поведенческих стратегий отдельных агентов является применение методов и алгоритмов парадигмы обучения с подкреплением. В данном случае на первый план выходит задача обеспечения координации между агентами в рамках выбранной парадигмы. Подробный анализ данной предметной области был проведен ранее в следующих наших работах:

- в статье [1] выполнен анализ проблем многоагентного обучения с подкреплением, предложены пути их решения;

- в статье [2] рассмотрены основные проблемы иерархического обучения с подкреплением;

- в статье [3] выполнен системный анализ иерархической интеллектуальной многоагентной системы в общем виде, а также ее основной структурной единицы - интеллектуального агента, определены его основные подсистемы.

По результатам анализа, проведенного в [1-3], определено, что к числу проблем многоагентного обучения с подкреплением относятся:

1. Проблема нестационарности внешней среды, возникающей вследствие действий других агентов.

2. Проблема экспоненциального роста количества возможных комбинаций совместных действий с увеличением количества агентов.

3. Проблема обмена и воспроизведения опыта, сгенерированного различными агентами.

В данной статье рассматриваются методы и алгоритмы, направленные на решение обозначенных проблем в децентрализованных многоагентных системах.

Исходный алгоритм

Существует класс децентрализованных многоагентных систем, основанных на «случайном взаимодействии агентов, которое приводит к возникновению интеллектуального глобального поведения, не контролируемого отдельными агентами» [4]. При этом архитектура отдельных интеллектуальных агентов, как правило, является технически не сложной,

благодаря чему возможно выполнение агентами лишь примитивных действий.

Пусть $G = \{\alpha_1, \dots, \alpha_{\alpha_N}\}$ – некоторая группа, состоящая из N гетерогенных равноправных агентов, сформированная для решения некоторой задачи T , поставленной ЛПР, $\alpha_N \in \mathbb{N}$. При этом каждый агент способен к выполнению некоторого набора примитивных действий $A = \{A_1, A_2, \dots, A_{A_N}\}$ (A_N – число примитивных действий, допустимых к выполнению агентами группы G , $A_N \in \mathbb{N}$), реализация которых может привести к осуществлению перехода $S_a \rightarrow S_b$ (где S_a, S_b – некоторые состояния, $S_a \in S, S_b \in S, S$ – множество допустимых состояний агентов $\alpha_i \in G, i = \overline{1, \alpha_N}$), за который агенту будет назначено подкрепление $r \in [-1, 1]$, на основании которого может быть вычислена величина ценности действия $Q(S_a, A_j)$ [5]. Однако в системах подобного рода величина подкрепления, полученного на некотором временном промежутке t подкрепления одним агентом, например, $\alpha_1 \in G$, может находиться в зависимости от величины подкрепления другого агента, α_2 , т.е. в этом случае $r_{\alpha_1}^t \rightarrow \min, r_{\alpha_2}^t \rightarrow \max$. Таким образом, максимизация подкрепления агентом α_2 выполняется за счет агента α_1 против его воли (как следствие проблемы нестационарности внешней среды, возникающей в результате действий других агентов), при этом не факт, что в данном случае среднее подкрепление, полученное агентами группы G на временном промежутке t (r_G^t), является максимальным. Таким образом, актуальной задачей для децентрализованных систем, реализованных на основе парадигмы обучения с подкреплением, является обучение агентов взаимодействию между собой, конечной целью которого является максимизация среднего подкрепления, т.е. $r_G^t \rightarrow \max$. В данной работе предлагаются алгоритмы, применение которых ведет к достижению этой цели.

Алгоритм обучения агентов «случайному взаимодействию»

Реализация обучения «случайному взаимодействию» для группы G может сводиться к выполнению следующего алгоритма:

1. Идентификация агентами своих текущих состояний $S_t^{\alpha_i}$, определение действий $A_t^{\alpha_i}$, при этом

$$\forall A_t^{\alpha_i} \exists p(C) = \varepsilon, i = 1, \dots, N, \varepsilon \in (0, 1), \quad (1)$$

где p – вероятность того, что будет выбрано действие, для которого выполняется условие $C = Q(S_t^{\alpha_i}, A_t^{\alpha_i}) \rightarrow \max$.

2. Формирование агентами $\alpha_i \in G$ «информационных сообщений» $M_t^{\alpha_i}$ следующего вида:

$$M_t^{\alpha} = \langle S_{t-1}^{\alpha}, A_{t-1}^{\alpha}, r_{t-1}^{\alpha}, S_t^{\alpha}, A_t^{\alpha} \rangle, \quad (2)$$

где S_{t-1}^{α} – состояние, в котором находился агент α на предыдущем шаге в момент времени $t - 1$; A_{t-1}^{α} – действие, которое агент α выбрал, находясь в состоянии S_{t-1}^{α} ; r_{t-1}^{α} – подкрепление, которое агент α получил за выполнение перехода $\langle S_{t-1}^{\alpha}, A_{t-1}^{\alpha}, S_t^{\alpha} \rangle$; S_t^{α} – состояние, в котором агент α находится в текущий момент времени t ; A_t^{α} – действие, которое агент α выберет, находясь в состоянии S_t^{α} , в соответствии с текущей политикой.

3. Обмен «информационными сообщениями» $M_t^{\alpha_i}$ между агентами $\alpha_i \in G$.

4. Каждый агент $\alpha_i \in G$ осуществляет следующие действия:

- выполнение $\forall \alpha_i$ случайной выборки из $\bigcup_{j=1}^{N-1} M_t^{\alpha_j}$ ($\alpha_j \in G, \alpha_j \neq \alpha_i$) множества данных

$$D_{M_t^{\alpha_i}}: D_{M_t^{\alpha_i}} \subset \bigcup_{j=1}^{N-1} M_t^{\alpha_j} \wedge |D_{M_t^{\alpha_i}}| \in$$

$[1, |\bigcup_{j=1}^{N-1} M_t^{\alpha_j}|]$, содержащих информацию о текущем состоянии и намерениях других агентов группы G (агенты α_j);

- формирование «дополненных» состояний $S_t^{\alpha_{i'}} = \langle S_t^{\alpha_i}, D_{M_t^{\alpha_i}} \rangle$;

- выполнение действия $A_t^{\alpha_{i'}}$, для которого выполняется условие (2) (при этом в C вместо $S_t^{\alpha_i}$ подставляется $S_t^{\alpha_{i'}}$), в случае, если $\forall \langle S_t^{\alpha_{i'}}, A_t^{\alpha_{i'}} \rangle: Q(S_t^{\alpha_{i'}}, A_t^{\alpha_{i'}}) = \gamma$ (т.е. для всех пар $\langle S_t^{\alpha_{i'}}, A_t^{\alpha_{i'}} \rangle$ Q -функции принимают значения по умолчанию), действие $A_t^{\alpha_{i'}}$ выбирается случайным образом, где $\gamma \in \mathbb{R}$;

- формирование подкреплений $r_{S_t^{\alpha_{i'}} | A_t^{\alpha_{i'}} | S_{t+1}^{\alpha_i}}$ за выполненные пары «состояние-действие» $\langle S_t^{\alpha_{i'}}, A_t^{\alpha_{i'}} \rangle$;

- вычисление $Q(S_t^{\alpha_{i'}}, A_t^{\alpha_{i'}})$ согласно [5].

Представленный выше алгоритм обладает недостатком, который заключается в зависимости размерности множества характеристик состояния $S_t^{\alpha_{i'}}$ от $|G|$ – чем больше мощность группы G , тем больше размерность множества $D_{M_t^{\alpha_i}}$, содержимое которого необходимо учитывать агентам при выборе действий $A_t^{\alpha_i}$.

Далее предложим основные варианты устранения представленного недостатка.

Снижение размерности «информационных сообщений» с помощью алгоритма формирования подгрупп агентов-подчиненных на основе «области видимости» агента-лидера

Для устранения первого недостатка (зависимость размерности множества характеристик состояния агента от количества полученных «информационных сообщений» формата (1) от иных агентов группы (т.е. чем меньше агентов в группе, тем меньше размерность «информационного сообщения»)) может быть осуществлено разбиение группы G на отдельные подгруппы $sG_{\alpha_i} \subset G$ на основании некоторой функции $f_{frag}(G)$, для реализации которого в искусственных многоагентных системах может быть использовано ранее понятие «области видимости» агента [6]. Исходя из этого, принцип построения подгрупп $sG_{\alpha_i} \subset G$ может заключаться в выполнении каждым агентом $\alpha_i \in G$ следующих действий [6]:

1. Пусть G – группа агентов, $G = \{\alpha_i\}$, где α_i – некоторый интеллектуальный агент, $i = \overline{1, \alpha_N}$, $\alpha_N \in \mathbb{N}$. Для $\forall \alpha_i \in G$ выполняется расчет оценок $p_{\alpha_i}^A = f(p_{\alpha_i}^{ac}, p_{\alpha_i}^{sn})$ (оценка аппаратных характеристик агента), где

а) $p_{\alpha_i}^{ac} = f(p_{\alpha_i}^{cs}, p_{\alpha_i}^{tp}, p_{\alpha_i}^e)$ – оценка аппаратных характеристик интеллектуального агента: $p_{\alpha_i}^{cs}$ – оценка вычислительной системы (учитываются вычислительные возможности центрального и графического процессоров, объем оперативной и постоянной памяти, мощность коммуникационного оборудования); $p_{\alpha_i}^{tp}$ – оценка транспортной платформы (максимальная скорость, ускорение); $p_{\alpha_i}^e$ – оценка объема энергозатрат при различных режимах работы вычислительной системы и транспортной платформы;

б) $p_{\alpha_i}^{sn}$ – оценка текущего состояния интеллектуального агента (объем заряда аккумуляторной батареи).

2. Для $\forall \alpha_i \in G$ выполняется расчет оценок $p_{\alpha_i}^M = f(p_{\alpha_i}^A, |Vis(\alpha_i)|)$ (оценка характеристик агента как потенциального лидера группы), где $|Vis(\alpha_i)|$ – количество других агентов, находящихся в области видимости агента α_i .

3. Во множество A_M (множество агентов-лидеров, при этом под агентом-лидером понимается исключительно агент, вокруг которого формируется подгруппа, не обладающий при этом никакими дополнительными полномочиями в сравнении с другими агентами) добав-

ляются агенты $\alpha_i: p_{\alpha_i}^M > \theta$, где $\theta \in \mathbb{R} \wedge \theta = const$.

4. Для $\forall \alpha_i \in A_M$ формируются множества $E_{\alpha_i} = Vis(\alpha_i)$.

5. Выполняется ранжирование элементов множества A_M по значению $p_{\alpha_i}^M$.

6. Из множества A_M выбираются агенты

$$\alpha_i: p_{\alpha_i}^M \rightarrow \max \wedge \left| E_{\alpha_i} \cap \bigcup_{i=1}^{\alpha_N-1} (E_{\alpha_j} | \alpha_j \in A_M) \right| \rightarrow \min, \quad (3)$$

где $j = \overline{1, \alpha_N - 1}$, $\alpha_N \in \mathbb{N}$.

Достижение условия (3) возможно путем выполнения следующих действий:

- выбор $\alpha_i \in A_M$, выбор $\alpha_j \in E_{\alpha_i}$;

- если выполняется условие $\alpha_j \in A_M \wedge E_{\alpha_i} \subset \bigcup_{j=1}^{\alpha_N-1} E_{\alpha_j} \wedge \alpha_j \neq \alpha_i$, то $A_M = A_M \setminus \alpha_i$ (из множества A_M исключается агент α_i), $A_M^R = A_M^R + \alpha_i$, где A_M^R – множество резервных агентов-лидеров (данный этап необходим для формирования множества «свободных» агентов, которые в дальнейшем будут назначены агентами-лидерами более высокого уровня иерархии);

- если выполняется условие $\alpha_j \notin A_M \wedge \alpha_j \in E_{\alpha_i} \wedge |\alpha| > 1 \wedge \min(D_{\alpha_i}) \neq d_{\alpha_i}^{\alpha_j}$, где α – множество агентов, в области видимости которых находится агент α_j (включая α_i), $\alpha \subset A_M$, $\min(D_{\alpha_i}) \neq d_{\alpha_i}^{\alpha_j}$ – расстояние между α_i и α_j ,

$$D_{\alpha_j} = \{d_{\alpha_i}^{\alpha_j}\}, \quad \text{то}$$

$E_{\alpha_i} = E_{\alpha_i} \setminus \alpha_j$ (из множества E_{α_i} исключается агент α_j);

- $\forall \alpha_i \in A_M$ на основании множества E_{α_i} формируется подгруппа sG_{α_i} .

7. Если агент $\alpha_j: \alpha_j \in A_M^R \wedge \alpha_j \in E_{\alpha_i}$, то он добавляется в подгруппу sG_{α_i} в качестве агента-подчиненного путем выполнения множества действий, обозначенных в рамках этапа 6.

8. Агенты $\alpha_i \in G \wedge \alpha_i \notin sG_{\alpha_i}$ записываются во множество G^{wm} и передаются в подчинение непосредственно ЛПР.

Блок-схема алгоритма формирования подгрупп на основе «области видимости» агента-лидера представлена на рис. 1.

Рассмотренный принцип формирования подгрупп на основании «областей видимости» агентов также поясняется на рис. 2.

Замечание: рассмотренный принцип разбиения группы агентов G на подгруппы sG_i для децентрализованных многоагентных систем применяется лишь с целью снижения размерности «информационных сообщений», а агенты-лидеры исполняют исключительно

роль «центров», вокруг которых осуществляется формирование этих подгрупп.

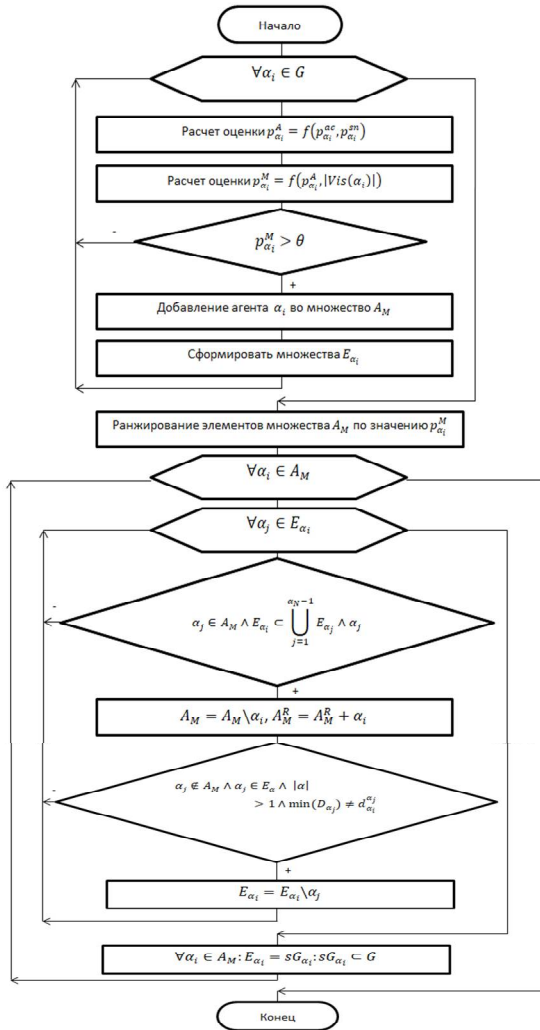


Рис. 1. Блок-схема алгоритма формирования подгрупп на основе «области видимости» агента-лидера

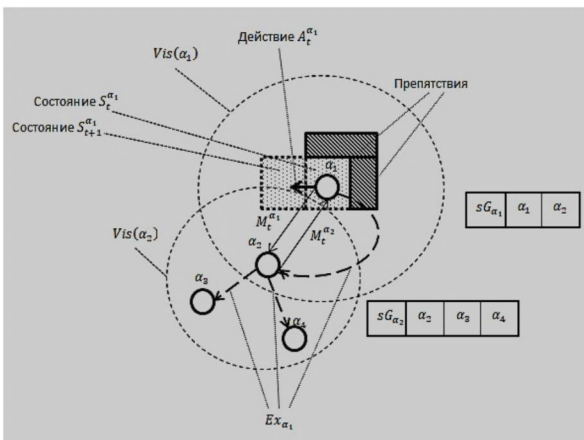


Рис. 2. Пояснение принципа формирования подгрупп на основе «областей видимости» агентов

Для определения максимального количества агентов в подгруппе используется следу-

ющее соотношение $t_{response} < \tau$, где $t_{response}$ – среднее время отклика агента-лидера на запрос (в мс), предполагающий назначение подкрепления агенту-подчиненному, а также новой задачи, $t_{response} = f(p_M^{cS}, p_M^e, p_M^c, |Vis(M)|)$, p_M^{cS} – оценка характеристик вычислительной системы агента-лидера M , p_M^e – оценка объема энергозатрат при различных режимах работы вычислительной системы, p_M^c – оценка производительности системы связи, $Vis(M)$ – количество других агентов, находящихся в области видимости агента-лидера; τ – некоторое пороговое значение, $\tau \in \mathbb{R}$.

Обозначенный подход к реализации интеллектуальных многоагентных систем обладает следующими преимуществами: повышение эффективности управления большим числом агентов за счет иерархической структуры, позволяющим выполнить распределение вычислительных мощностей агентов-лидеров; снижение стоимости реализации системы за счет снижения множества выполняемых функций и упрощение комплектации агентов-подчиненных; в структуру системы могут войти подгруппы агентов с различной степенью централизации; снижение риска потери информации за счет использования агентов-лидеров в качестве хранилищ; в случае потери связи с ЛПР либо с агентом-лидером высшего уровня иерархии подгруппы агентов могут продолжить работу в автономном режиме.

Реализация обмена опытом в децентрализованных многоагентных системах

Синхронность действий в природных системах роевого интеллекта достигается в т.ч. путем повторения успешных действий соседей, которое может быть осуществлено путем выполнения «алгоритма обмена опытом в децентрализованных многоагентных системах»:

1. Агент α_i , находясь в состоянии S_t , выполняет действие A_t , в результате которого переходит в состояние S_{t+1} , получая за это положительное подкрепление $r_{S_t|A_t|S_{t+1}}$.

2. Агент α_i загружает «кортеж опыта»

$$Ex_{\alpha_i} = \langle S_t, A_t, S_{t+1}, r_{S_t|A_t|S_{t+1}} \rangle, \quad (4)$$

в свой буфер опыта B_{α_i} .

3. Агент α_i транслирует кортеж Ex_{α_i} агентам $\alpha_j \in sG_{\alpha_i}$, которые загружают его в собственные «буферы опыта» B_{α_j} .

4. Агенты $\alpha_j \in sG_{\alpha_i}$ транслируют кортежи (124) агентам $\alpha_k \in sG_{\alpha_j}$ и т.д.

5. В случае достижения агентом α_k состояния S_t , он может применить действие A_t для получения максимального подкрепления (в случае, если $r_{S_t|A_t|S_{t+1}} > 0$).

При реализации обозначенного алгоритма необходимо учитывать, что в кортежах опыта (4) содержатся данные о возможном подкреплении, необходимо определить, как эти сведения могут учитываться при реализации Q-обучения. В этом случае кортежи (4) могут быть модифицированы следующим образом:

$$Ex_{\alpha_i} = \langle S_t, A_t, S_{t+1}, r_{S_t|A_t|S_{t+1}}, Q(S_t, A_t, S_{t+1}) \rangle \quad (5)$$

Замечание: агент α_j может применить кортеж опыта Ex_{α_i} , полученный от агента α_i , только в том случае, если $A_t^{\alpha_i}: A_t^{\alpha_i} \in A_\varphi \wedge A_\varphi \in \varphi \wedge \varphi \in \Phi_c \wedge \alpha_j \in c$, где c – класс агента α_j ; Φ_c – множество типов обязанностей или действий, доступных для выполнения агенту, принадлежащему к классу c ; φ – тип выполняемых действий, которому соответствует множество примитивных действий A_φ .

Более подробно используемый принцип реализации обмена опытом между агентами изложен в [6].

В итоге может быть сформирован новый «алгоритм обучения с подкреплением для децентрализованных многоагентных систем, основанный на обмене опытом и обучении агентов случайному взаимодействию», предусматривающий выполнение следующих этапов:

1. Разбиение агентов на подгруппы в соответствии с «алгоритмом формирования подгрупп на основе «области видимости» агента-лидера».

2. Обучение агентов «случайному взаимодействию» в соответствии с предложенным алгоритмом.

3. Применение в процессе функционирования системы алгоритма обмена опытом в децентрализованных многоагентных системах.

Эксперимент

Для проверки эффективности предложенного алгоритма обучения с подкреплением для децентрализованных многоагентных систем, основанного на обмене опытом и обучении агентов случайному взаимодействию, была выбрана задача поиска агентами выхода из лабиринта. Для сравнения были взяты следующие системы:

- децентрализованная многоагентная система, функционирование которой осуществляется в соответствии с предложенным алгоритмом обучения с подкреплением для децентрализованных многоагентных систем, основанным на обмене опытом и обучении агентов случайному взаимодействию (s1);

- децентрализованная многоагентная система без обучения агентов случайному взаимодействию и обмена опытом (s2);

- децентрализованная многоагентная система с обучением случайному взаимодействию, но без обмена опытом между агентами (s3).

Для моделирования была использована среда Microsoft Unity. В качестве критерия оценки применялось время перемещения всех агентов в состояние, соответствующее выходу из лабиринта. Для проведения испытаний было сгенерировано восемь карт различной размерности (15x15, 30x30, 45x45, 60x60, 75x75). Для каждой карты были сгенерированы сценарии, различающиеся количеством агентов, определяемым случайным образом в зависимости от размеров карты (для карты 15x15 – три агента, 30x30 – от трех до пяти, 60x60 – от трех до десяти, 75x75 – от трех до двенадцати), а также начальным положением агентов. При этом условная область покрытия коммуникационных систем агентов была ограничена семью ячейками (т.е. соответствует области 7x7). Число проводимых опытов (итераций) – 200. Пример применяемой карты размерности 15x15 представлен на рис. 3.



Рис. 3. Применяемая карта размерности 15 × 15

Результаты, полученные в ходе выполнения эксперимента для трех агентов (для карты 15x15), представлены на рис. 4.

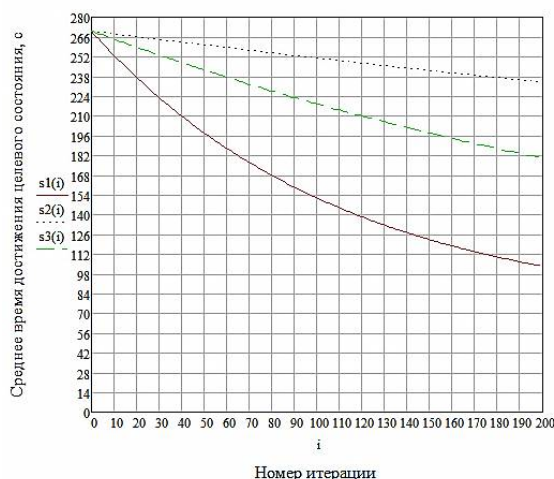


Рис. 4. Результаты эксперимента, проводимого для карты 15x15 и трех агентов

Как видно на рис. 4, к двухсотой итерации достигнуто улучшение показателей системы s1 (в результате обучения) по критерию времени на 61,5 %. Для систем s2 и s3 были достигнуты следующие результаты: 13,4 %, 33,2 %.

Таким образом, обучение агентов случайному взаимодействию позволяет ускорить процесс обучения в 2,5 раза к двухсотой итерации. При этом комбинированное применение обучения случайному взаимодействию и обмена опытом между агентами позволяет ускорить процесс обучения в 4,7 раза.

Однако рассмотренные результаты из-за небольшого количества агентов не позволяют дать оценку эффективности разбиения группы агентов на отдельные подгруппы на основе «области видимости» агента-лидера при реализации обмена информационными сообщениями. Для этого приведем результаты эксперимента, проводимого для карты 75x75 для группы, состоящей из двенадцати агентов (см. рис. 5).

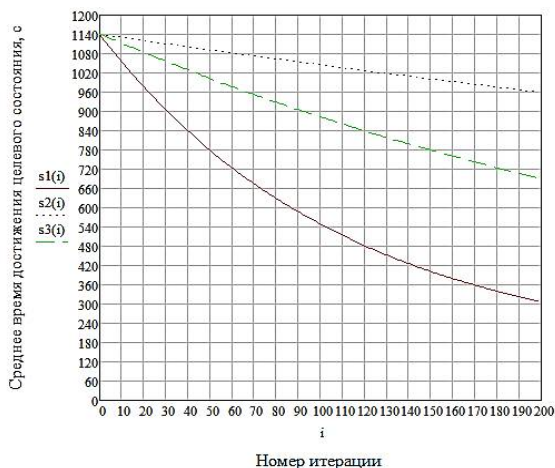


Рис. 5. Результаты эксперимента, проводимого для карты 75x75 и двенадцати агентов

Как видно на рис. 5, применение разработанного алгоритма обучения с подкреплением для децентрализованных многоагентных систем, основанного на обмене опытом и обучении агентов случайному взаимодействию (система s1), позволило улучшить показатели по критерию времени к двухсотой итерации на 72,9 % (для s2 на 15,8 %, для s3 – на 39,4 %).

Полученные экспериментальные результаты свидетельствуют о более высокой эффективности по критерию времени разработанного алгоритма обучения с подкреплением для децентрализованных многоагентных систем, основанного на обмене опытом и обучении агентов случайному взаимодействию в сравнении с рассмотренными аналогами.

Заключение

В работе представлен разработанный новый алгоритм обучения с подкреплением для децентрализованных многоагентных систем, основанный на обмене опытом и обучении агентов случайному взаимодействию, отличия которого от аналогов заключаются в следующем:

- применение алгоритма формирования подгрупп агентов-подчиненных на основании «области видимости» агента-лидера с целью снижения размерности «информационных сообщений»;
- учет аппаратной составляющей агента (информация о которой формализована в виде множества типов обязанностей или действий, доступных для выполнения агенту) при реализации обмена опытом.

Результаты эксперимента, выполненного в среде Microsoft Unity, подтвердили эффективность предложенного гибридного алгоритма по критерию времени.

Литература

1. Дубенко Ю.В. Аналитический обзор проблем многоагентного обучения с подкреплением // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. Т. 17. № 6 (192). С. 48-56.
2. Дубенко Ю.В., Дышкант Е.Е., Гура Д.А. Анализ иерархического обучения с подкреплением для реализации поведенческих стратегий интеллектуальных агентов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. Т. 17. № 9 (195). С. 35-45.
3. Симанков В.С., Дубенко Ю.В. Системный анализ в иерархических интеллектуальных многоагентных системах // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2021. Т. 18. № 3 (201). С. 33-46.
4. Славин Б.Б. Технологии коллективного интеллекта // Проблемы управления. 2016. № 5. С. 2-9.

5. Саттон Р.С., Барто Э.Дж. Обучение с подкреплением: Введение. 2-е изд. М.: ДМК Пресс, 2020. 552 с.

6. Гибридный алгоритм формирования кратчайшей траектории, основанный на применении многоагентного

обучения с подкреплением и обмена опытом / Ю.В. Дубенко, Е.Е. Дышкант, Н.Н. Тимченко, Н.А. Рудешко // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2021. Т. 18. № 11 (209). С. 13-26.

Поступила 17.06.2022; принята к публикации 19.08.2022

Информация об авторах

Дубенко Юрий Владимирович - канд. техн. наук, доцент кафедры информатики и вычислительной техники, Кубанский государственный технологический университет (350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2), e-mail: scorpioncool1@yandex.ru, тел.+7-918-675-4251, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3205-994X>

Рудешко Никита Андреевич - аспирант кафедры информатики и вычислительной техники, Кубанский государственный технологический университет (350072, Россия, г. Краснодар, ул. Московская, 2), e-mail: nikita.rudeshko@yandex.ru, тел.+7-929-832-92-13

REINFORCEMENT LEARNING ALGORITHM FOR DECENTRALIZED MULTI-AGENT SYSTEMS BASED ON EXCHANGE OF EXPERIENCE AND TRAINING OF AGENTS IN RANDOM INTERACTION

Yu.V. Dubenko, N.A. Rudeshko

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Abstract: here we present the developed new reinforcement learning algorithm for decentralized multi-agent systems based on the exchange of experience and training agents for random interaction. We listed the main problems of multi-agent reinforcement learning. We described a class of decentralized multi-agent systems based on random interaction of agents, which leads to the emergence of intelligent global behavior not controlled by individual agents. We defined an urgent task for decentralized systems implemented on the basis of the reinforcement learning paradigm. We indicated that the ultimate goal of learning to interact with each other is to maximize the average reinforcement. We proposed algorithms, the application of which leads to the achievement of this goal, such as the algorithm for training agents in random interaction, as well as the algorithm for forming subgroups of subordinate agents based on the “visibility area” of the leader agent. To test the effectiveness of the proposed reinforcement learning algorithm for decentralized multi-agent systems, based on the exchange of experience and training agents for random interaction, we chose the task of finding agents to exit the maze. We presented the results of the algorithm execution on a model developed in the Microsoft Unity environment. The algorithm differs from the existing analogs by using the method of forming subgroups of subordinate agents based on the “visibility area” of the leader agent in order to reduce the dimension of “information messages” and taking into account the agent’s hardware component when implementing the exchange of experience

Key words: reinforcement learning, multi-agent systems, random interaction, agents-leaders, agents-subordinates, labyrinths

References

1. Dubenko Yu.V. “Analytical review of the problems of multi-agent reinforcement learning”, *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy)*, 2020, vol. 17, no. 6 (192), pp. 48-56.
2. Dubenko Yu.V., Dyshkant E.E., Gura D.A. “Analysis of hierarchical reinforcement learning for the implementation of behavioral strategies of intelligent agents”, *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy)*, 2020, vol. 17, no. 9 (195), pp. 35-45.
3. Simankov V.S., Dubenko Yu.V. “System analysis in hierarchical intelligent multi-agent systems”, *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy)*, 2021, vol. 18, no. 3 (201), pp. 33-46.
4. Slavin B.B. “Technologies of collective intelligence”, *Problems of Management (Problemy upravleniya)*, 2016, no. 5, pp. 2-9.
5. Sutton R.S., Barto E.J. “Reinforcement Learning: An Introduction”, Moscow: DМК Press, 2020, 552 p.
6. Dubenko Yu.V., Dyshkant E.E., Timchenko N.N., Rudeshko N.A. “A hybrid algorithm for the formation of the shortest trajectory based on the use of multi-agent reinforcement learning and experience exchange”, *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy)*, 2021, vol. 18, no. 11 (209), pp. 13-26.

Submitted 17.06.2022; revised 19.08.2022

Information about the authors

Yuriy V. Dubenko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya str., Krasnodar 350072, Russia), e-mail: scorpioncool1@yandex.ru, tel.: +7-918-675-4251, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3205-994X>
Nikita A. Rudeshko, graduate student, Kuban State Technological University (2 Moskovskaya str., Krasnodar 350072, Russia), e-mail: nikita.rudeshko@yandex.ru, tel.: +7-929-832-92-13

РАСЧЕТ ФУНКЦИИ НЕВЯЗКИ В БАЗИСНОМ ПРОСТРАНСТВЕ ДЛЯ ПОИСКА ОБЛАСТЕЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЕЙ КОНСТАНТ СКОРОСТЕЙ ПОЛИМЕРИЗАЦИОННОГО ПРОЦЕССА

Э.Р. Гиззатова¹, А.Р. Шагиахметов², Г.К. Хисаметдинова¹, С.Л. Подвальный³

¹Башкирский государственный университет, г. Уфа, Россия

²Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета,
г. Стерлитамак, Россия

³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: предлагается к рассмотрению математическая модель процесса полимеризации на катализаторах Циглера-Нагга, в предположении существования только трех элементарных стадий: роста полимерной цепи, передачи цепи на мономер и передачи цепи на алюминийорганическое соединение при условии отсутствия стадии инициирования активных центров. Приведены постановки прямой и обратной кинетической задач, последняя из которых заключается в поиске областей неопределенных для констант скоростей стадий роста и передач цепи. Показано, что для рассматриваемого процесса значения констант могут быть определены в базисном пространстве, построенном на векторах констант. В отличие от исходного трехмерного пространства базисное пространство позволяет рассчитывать и визуализировать сеточные поверхности по функции невязки для среднечисленной молекулярной массы. При условии расчета невязки как максимума отклонений или суммы квадратов отклонений получают разные поверхности. Показано, как наложение поверхностей друг на друга локализует области минимума, которые впоследствии можно характеризовать как решение обратных кинетических задач. При этом такой подход позволяет оценить форму и вид «овражных» минимумов и, в целом, определять оптимальные наборы констант, идентифицирующие точки минимума

Ключевые слова: полимеризация, кинетическое моделирование, математическая модель, кинетические константы, метод моментов

Введение

Изучение процессов полимеризации, предполагающее кинетическое исследование, сводится либо к определению механизма процесса, либо к поиску кинетических параметров, характеризующих и идентифицирующих его в сравнении с другими полимеризационными системами [1, 2]. Определяя механизм процесса, выстраивается логическая связь реакций-переходов полимерной цепи, подчиняемая устанавливаемым законам изменения взаимодействия всех компонентов смеси с этой цепью. В этом случае важно найти такой минимальный набор элементарных реакций, который необходим для получения конечного продукта реакций [3, 4]. Можно отметить, что знание законов протекания процесса позволяет предсказывать свойства получаемого полимерного материала, такие как эластичность, термостойкость.

Напротив, при поиске кинетических параметров логическая связь известна и представлена кинетической схемой процесса. Требуемая задача нахождения констант ведет к построению модели и последующему сравнительному анализу с имеющимся экспериментальным аналогом.

Стоит отметить, что задача эксперимента, связанная с получением значений констант скоростей всех возможных реакций процессов полимеризации, является невыполнимой, поскольку удается определить лишь небольшой процент искомых величин, при этом точность определения напрямую зависит от эмпирического метода анализа.

Для преодоления вышеуказанной проблемы создаются методики решения, которые ведут к устранению или минимизации неопределенности в значениях констант скоростей процесса [5-7].

Важным аспектом в подходе к решению задачи поиска становится способ представления расчетных данных, так как с появлением мощных инструментов, объединяющих графические модули с модулями анализа данных, исследователи имеют возможность одновре-

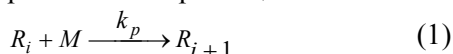
менного решения задачи и визуализации получаемых объектных структур.

Таким образом, решение обратных кинетических задач, сводящихся к поиску значений констант скоростей процесса полимеризации, должно предполагать совместное использование аппарата математического моделирования и технологий построения проектных поверхностей в пространстве кинетических констант.

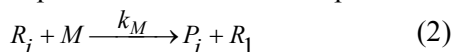
Математическое моделирование процесса полимеризации на катализаторах Циглера-Натта

Полимерные реакции, характеризующие процесс получения диеновых каучуков на катализаторах Циглера-Натта, можно разделить на три типа [2, 3], в общем случае записываемые как элементарные стадии процесса. К таковым относят:

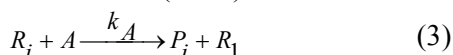
стадию роста полимерной цепи



стадию передачи цепи на мономер M



стадию передача цепи на алюминийорганическое соединение A (АОС)



В данной кинетической схеме приняты следующие обозначения:

$R(\text{adical})_i$ – растущая полимерная цепь с i -звеньями в полимерной цепи;

$P(\text{product})_i$ – неактивная полимерная цепь с i -звеньями в полимерной цепи;

M – мономер;

A – АОС;

k_p, k_M, k_A – константы скоростей стадий роста цепи, передачи цепи на мономер и АОС, соответственно.

Естественно предполагать, что присутствие или отсутствие какой-либо элементарной стадии в кинетической схеме должно соответствовать химизму рассматриваемого полимеризационного процесса.

Применяя аппарат математического моделирования, строится автономная система из бесконечного числа обыкновенных дифференциальных уравнений, при этом каждое уравнение системы показывает логику взаимосвязей выбранного реагента с другими компонентами смеси. Утверждение о бесконечной размерности системы основано на предположе-

нии о бесконечном образовании глобул полимера (до исчерпания мономера в реакторе), поскольку активные растущие цепи не претерпевают дезактивацию, то их концентрация не зависит от времени, то есть стабильная на протяжении всего процесса. Переводя на математический язык последнее замечание, можно выписать выражение для концентрации активных цепей (4):

$$C_a(t_0) = \sum_{i=1}^{\infty} R_i = C_a(t) \quad (4)$$

С учетом (4), система дифференциальных уравнений будет иметь вид:

$$\begin{aligned} \frac{dM}{dt} &= -(k_p + k_M)MC_a \\ \frac{dA}{dt} &= -k_AAC_a \\ \frac{dR_1}{dt} &= -k_pMR_1 + (k_MM + k_AA)(C_a - R_1) \\ \frac{dP_1}{dt} &= (k_MM + k_AA)R_1 \\ \frac{dR_i}{dt} &= k_pM(R_{i-1} - R_i) - (k_MM + k_AA)R_i, \quad i \geq 2 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dP_i}{dt} = (k_MM + k_AA)R_i, \quad i \geq 2$$

Начальные данные для которой:

$$\begin{aligned} M^{(0)} &= M(0), \quad A^{(0)} = A(0), \quad R_1^{(0)} = R_1(0), \quad P_1^{(0)} = 0, \\ R_i^{(0)} &= P_i^{(0)} = 0, \quad i \geq 2 \end{aligned} \quad (6)$$

На основании полученной системы дифференциальных уравнений (5)-(6) можно поставить прямую кинетическую задачу, заключающуюся в следующем: при известных значениях констант скоростей элементарных стадий процесса рассчитать концентрации всех участвующих в системе реагентов, среднечисленную M_N и среднемассовую M_W молекулярные массы полимера и определить молекулярно-массовое распределение q_w .

Само молекулярно-массовое распределение можно рассчитать как [1]:

$$q_w = \int_0^{\infty} W(M)dM \quad (7)$$

где $W(M^*)$ – доля веса полимеров с массой M^* в общей массе образца, тогда массовое распределение полимерных цепей по массе:

$$q_w = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(R_i + P_i)i}{\sum_{i=1}^{\infty} (R_i + P_i)i} \quad (8)$$

Наряду с ним рассматривают q_n – числовое распределение полимерных цепей по массе и, соответственно, $N(M^*)$ – доля concentra-

ции полимеров с массой M^* в общей концентрации полимерного образца:

$$q_n = \int_0^{\infty} N(M)dM$$

$$q_w = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(R_i+P_i)}{\sum_{i=1}^{\infty} (R_i+P_i)} \quad (9)$$

Тогда среднечисленная и среднемассовая молекулярные массы – это нормированные моменты, соответственно, числового q_n и массового q_w распределений, рассчитываемые как:

$$M_N = \int_0^{\infty} M \cdot N(M)dM$$

$$M_W = \int_0^{\infty} M \cdot W(M)dM$$

или в терминах (1)-(3):

$$M_N = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} (R_i+P_i)i}{\sum_{i=1}^{\infty} (R_i+P_i)} \quad (10)$$

$$M_W = \frac{\sum_{i=1}^{\infty} (R_i+P_i)i^2}{\sum_{i=1}^{\infty} (R_i+P_i)i} \quad (11)$$

Именно кривые (8), (10) и (11) входят в совокупность экспериментально получаемых зависимостей, поэтому обратная кинетическая задача, связанная с восстановлением значений констант скоростей элементарных стадий процесса, решается методом сравнения экспериментальных и расчетных значений, получаемых при решении системы (5)-(6) [1, 2].

Стоит отметить, что основным методом решения обратных кинетических задач в этом случае является метод многократного решения прямой кинетической задачи при разных наборах значений кинетических констант скоростей [7]. Также необходимо указать, что решаемая система (5)-(6) в общем случае бесконечна, но для применения численных методов ее приводят к конечному виду, ограничивая число уравнений значением $k_p \cdot t_{кон}$, где $t_{кон}$ – конечное время численного расчета.

Следовательно, применяя методы математического моделирования и законы химической кинетики, составляют математическую модель процесса полимеризации на катализаторах Циглера-Натта в виде системы дифференциальных уравнений (5)-(6). На ее основании можно поставить прямую и обратную кинетические задачи.

Определение базисного пространства для процесса полимеризации

Кинетический анализ процессов полимеризации связан с нахождением функциональных зависимостей, характеризующих процесс целиком. Сюда можно отнести зависимости материального баланса, зависимости, возникающие при описании стационарных и нестационарных режимов процесса. Для рассматриваемого процесса тоже можно вывести уравнение материального баланса, но интересным представляется нахождение базисных функций [5, 6], поскольку они, являясь функциональными характеристиками процесса, определяют, во-первых, взаимосвязь констант скоростей друг с другом, во-вторых, зависимость констант от начальных параметров процесса.

В работе [6] показано применение метода поиска нелинейных базисных функций для рассматриваемого процесса. Получены две базисные функции в пространстве кинетических констант:

$$\rho_1(k_p, k_M, k_A) = k_A \quad (12)$$

$$\rho_2(k_p, k_M, k_A) = k_p \cdot k_M \quad (13)$$

Их вид не случаен, поскольку именно константа скорости роста цепи k_p и константа скорости передачи цепи на мономер k_M связаны с изменением концентрации мономера, поэтому и их взаимосвязь сильна. Отдельно стоящая функция ρ_2 , представляющая собой константу скорости передачи цепи на АОС, не зависит от двух предыдущих констант и ведет к изменению только концентрации АОС.

При этом сами функции ρ_1 и ρ_2 не зависят друг от друга. Следовательно, они могут являться взаимонезависимыми векторами, на которых можно построить базисное пространство и в нем вычислять значения молекулярных характеристик полимера.

Расчет функции невязки для среднечисленной молекулярной массы в базисном пространстве

При выборе функций построения в базисном пространстве исходят из задачи, которую требуется решить.

Расчетные функции, найденные как результат прямой кинетической задачи, не представляют того интереса, который возникает при переходе к поиску решения обратной кинетической задачи, поскольку функционалы

соответствия, по которым определяются оптимальные наборы констант, имеют большую значимость, чем сами молекулярные характеристики полимера. Так, для количественного анализа образованного полимерного продукта помогает значение среднечисленной молекулярной массы полимера, которое характеризует полимерную цепь со среднестатистическим числом звеньев. Поэтому функционал соответствия или функция невязки между расчетными и экспериментальными значениями среднечисленной молекулярной массы, построенный в базисном пространстве, имеет не только математическую интерпретацию.

Расчет невязки можно проводить разными способами, один из них через суммарную квадратичную погрешность, другой – через максимум из отклонений.

В первом случае «рабочая» формула имеет вид:

$$Z_1 = \int_{t_0}^{t_{\text{кон}}} (M_N^{\text{exp}}(t) - M_N^{\text{calc}}(t))^2 dt \quad (14)$$

Во втором невязку рассчитывают как:

$$Z_2 = \max_t |M_N^{\text{exp}}(t) - M_N^{\text{calc}}(t)| \quad (15)$$

Минимизация функции Z_1 является одним из этапов решения обратной кинетической задачи [7] для исследуемого процесса полимеризации. Поэтому вид выбранной функции невязки для построения в базисном пространстве может определяться как функционал соответствия между расчетными и экспериментальными данными при поиске решения обратной кинетической задачи.

Нахождение областей неопределенностей констант скоростей в базисном пространстве

Определение значений констант скоростей при решении обратных кинетических задач иногда является единственным способом установления областей их допустимого изменения. Конечно, не все искомые области будут находиться в пределах 20 %, но, по крайней мере, значения длин интервалов соизмеримы со средней величиной.

В работе [2] были определены значения областей неопределенностей по кинетическим константам для процесса полимеризации на каталитической системе $\text{NdCl}_3 - \text{ЗТБФ} - \text{ТОА}$. Начальными условиями процесса являются: $M(0) = 1,5$ моль/л, $A(0) = 0,03$ моль/л, $C_a = 0,00065$ моль/л (концентрация активных цепей полимера постоянна в ходе процесса). Резуль-

таты решения обратной кинетической задачи приведены в табл. 1.

Таблица 1

Области неопределенностей кинетических констант, найденных при решении обратной кинетической задачи

k_p	k_M	k_A
[17,3;22,9]	[0,021;0,055]	[1,3;2,9]

По табл. 1 видно, что допустимая область изменения константы k_M составляет почти 50%, это достаточно большая величина, чтобы можно было оперировать понятием точного значения. Но стоит отметить, что эти константы были найдены при минимизации функционала (14) в области одновременного изменения всех трех констант. Поэтому и возникла задача определения такой методики, которая позволила бы сузить область поиска неопределенностей по константам.

Одна из таких методик – расчет (14) и (15) в базисном пространстве. В качестве сравниваемых экспериментальных значений были выбраны значения M_N^{exp} до времени 60 мин.

Ниже приведены рисунки, показывающие вид сеточной функции Z_1 на области (k_p, k_M, k_A) . Сеточная функция была построена на указанной области изменения значений констант, причем видно, что области пиков перемежаются областями минимумов.

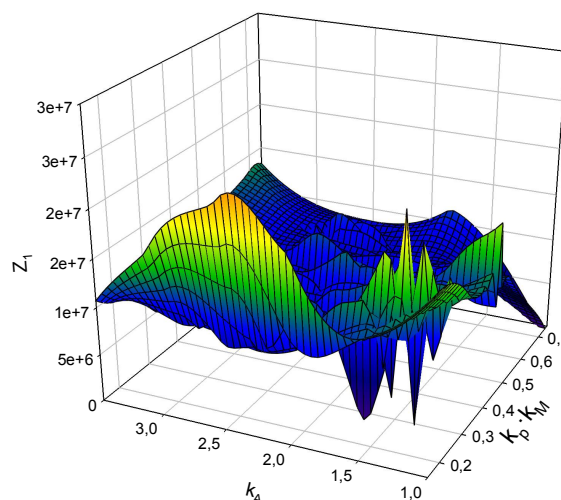


Рис. 1. Вид сеточной функции Z_1 в пространстве констант $([15;25] \times [0.01;0.03]) \times [1.0;3.5]$

По рисунку видно, что хорошо прослеживается область минимума, центрируемая набором (0,3;1,5). При рассмотрении этой же поверхности в контурном виде количество областей минимумов увеличивается до трех, что показывает рис. 2.

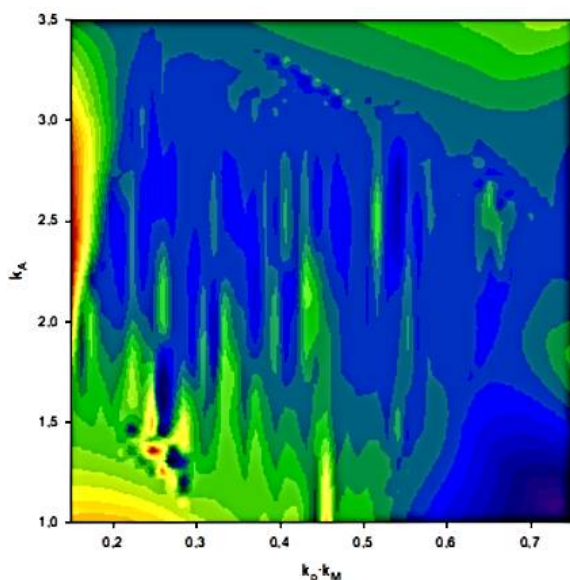


Рис. 2. Контурный график Z_1 в пространстве констант $([15;25] \times [0.01;0.03]) \times [1.0;3.5]$

Светлые цвета отмечают наиболее высокие по значению Z_1 участки. Пиковые минимумы (темные участки) центрируемы в точках (0,3;1,5), (0,55;2,5), (0,7;1,0). Появление первой точки, видимо, характеризует решение эксперимента, поскольку согласно экспериментальным данным, что показывает табл. 2, положение точки (0,3;1,5) максимально приближено к экспериментальному набору.

Таблица 2

Значения кинетических констант, найденных в ходе эксперимента

k_p	k_M	k_A
17.34	0.024	1.47

Относительно второго и третьего минимумов конкретных данных по эксперименту нет, следовательно, можно отнести их к существованию других решений обратной кинетической задачи, которые были не учтены в табл. 1.

Следующий рис. 3 совмещает рис. 2 и области из табл. 1.

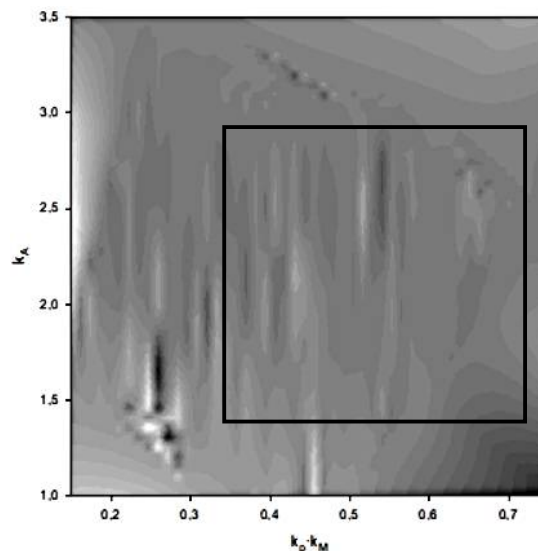


Рис. 3. Контурный график Z_1 в пространстве констант $([15;25] \times [0.01;0.03]) \times [1.0;3.5]$ с совмещением области из табл. 1

В совмещенную область попадают второй и третий минимумы, но игнорируется первый минимум. Объяснить такое поведение функции Z_1 можно лишь тем, что при использовании оптимальных методов исследуется направление антиградиента и оно при $0,5 \leq k_p \cdot k_M \leq 0,7$ наиболее максимально.

Чуть иная картина появляется и при исследовании поведения функции невязки (15) в этом же базисном пространстве $(k_p \cdot k_M) \cdot k_A$, что показывает рис. 4.

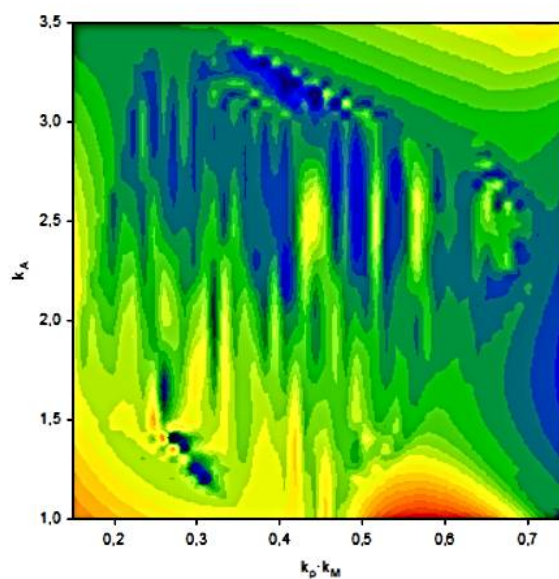


Рис. 4. Контурный график Z_2 в пространстве констант $([15;25] \times [0.01;0.03]) \times [1.0;3.5]$

Здесь темным цветом указаны области минимальных значений функции Z_2 , а белым – области максимального отличия. Можно отметить четкое прослеживание минимального значения в $(0,3;1,5)$ и минимум с центром в $(0,4;3,0)$. Последний из них не появлялся ранее при анализе Z_1 , но должен быть учтен в дальнейшем.

Проводя последовательное сравнение рис. 2 и рис. 4, можно заметить, что: 1) сохранилось положение точки минимума с центром в $(0,3;1,5)$; 2) появление области, возможно не связной, в пределах $0.3 \leq k_p \cdot k_M \leq 0.6$ и $2,0 \leq k_A \leq 3,0$, но одновременно содержащей точки минимума Z_1 и Z_2 . Однако минимум характерен не для всей указанной области, а лишь для полосы, представляющей собой диагональ прямоугольника.

Заключение

Таким образом, построенные функции невязки Z_1 и Z_2 в базисном пространстве представляют собой двуслойную поверхность, при совмещении слоев которой можно определить смежные области минимумов. Именно они позволят оперировать оптимальными наборами констант. Причем, эти минимумы могут быть взяты как готовое решение обратной кинетической задачи или представлять собой начальные наборы для запуска процедуры оп-

тимизации применением прямых или случайных численных методов.

Литература

1. Подвальный С.Л. Моделирование промышленных процессов полимеризации. М.: Химия, 1979. 350 с.
2. О решении обратной задачи формирования молекулярно-массовых распределений при ионно-координационной полимеризации / Т.С. Усманов, И.К. Гатауллин, С.М. Усманов, С.И. Спивак, Ю.Б. Монаков // Доклады АН. 2002. Т. 385. № 3. С. 368–371.
3. Гатауллин И.К. Математическое моделирование кинетически неоднородных неодимсодержащих каталитических систем в ионно-координационной полимеризации бутадиена: автореф. дис. ... канд. хим. наук: 02.00.17. Уфа, 2004. 22 с.
4. Математическое моделирование процесса синтеза бутадиенового каучука на неодимсодержащей каталитической системе / Г.А. Аминова, Г.В. Мануйко, В.В. Бронская, Т.В. Игнашина, А.И. Исмагилова, Г.С. Дьяконов // Высокомолекулярные соединения. Сер. А. 2006. Т. 48. № 8. С. 1495-1501.
5. Хурсан С.Л., Исмагилова А.С., Ахметьянова А.И. Определение базиса гомодесмотических реакций циклических органических соединений с использованием теории графов // Журнал физической химии. 2018. Т. 92. № 7. С. 1076-1085
6. О методе поиска базиса нелинейных параметрических функций для полимеризационных процессов / Э.Р. Гиззатова, А.С. Исмагилова, С.И. Спивак, С.Л. Подвальный // Химическая физика. 2018. Т.37. №12. С.58-62.
7. Гиззатова Э.Р., Подвальный С.Л., Спивак С.И. Поиск кинетических констант при моделировании процессов полицентровой безобрывной полимеризации диенов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 14-18.

Поступила 20.06.2022; принята к публикации 15.08.2022

Информация об авторах

Гиззатова Эльвира Раисовна – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры математического моделирования, Башкирский государственный университет (450076, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32), e-mail: makella@rambler.ru, тел.: +7(917)424-15-55

Шагиахметов Андрей Ринатович - аспирант, Стерлитамакский филиал Башкирского государственного университета (453103, Россия, Республика Башкортостан, г. Стерлитамак, Проспект Ленина, 49), e-mail: slakis210195@gmail.com, тел.: +7(925)274-34-31

Хисаметдинова Гульназ Курбангалеевна - канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры математического моделирования, Башкирский государственный университет (450076, Россия, Республика Башкортостан, г. Уфа, ул. Заки Валиди, 32), e-mail: gulli_rgk@mail.ru, тел.: +7(927)306-46-56

Подвальный Семен Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, тел.: +7(929)011-21-53

CALCULATION OF THE RESIDUAL FUNCTION IN THE BASIS SPACE TO SEARCH FOR AREAS OF UNCERTAINTY OF THE RATE CONSTANTS OF THE POLYMERIZATION PROCESS

E.R. Gizatova¹, A.R. Shagiakhmetov², G.K. Khisametdinova¹, S.L. Podvalny³

¹Bashkir State University, Bashkortostan Republic, Ufa, Russia

²Sterlitamak Branch of Bashkir State University, Bashkortostan Republic, Sterlitamak, Russia

³Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper proposes a mathematical model of the polymerization process on Ziegler-Natt catalysts, assuming the existence of only three elementary stages: the growth of the polymer chain, the transfer of the chain to the monomer and the transfer of the chain to the organoaluminium compound, provided there is no stage of initiation of active centers. We give the statements of direct and inverse kinetic problems, the latter of which consists in finding the regions of the chain growth stages and gears that are indeterminate for the rate constants. We show that for the process under consideration, the values of the constants can be determined in the basis space constructed on the vectors of the constants. Unlike the original three-dimensional space, the basis space allows calculating and visualizing grid surfaces by the residual function for the average calculated molecular weight. If the discrepancy is calculated as the maximum of deviations or the sum of the squares of deviations, different surfaces are obtained. We show the way the superposition of surfaces on each other localizes the minimum regions, which can subsequently be characterized as the solution of inverse kinetic problems. At the same time, this approach allows us to evaluate the shape and appearance of "gully" minima and, in general, to determine the optimal set of constants identifying the minimum points

Key words: polymerization, kinetical modeling, mathematical model, kinetic constants, method of moments

References

1. Podvalnyy S.L. "Industrial polymerization process modeling" ("Modelirovanie promyshlennykh protsessov polimerizatsii"), Moscow, Khimiya, 1979, 350 p.
2. Usmanov T.S., Monakov Yu.B., Gataullin I.K., Usmanov S.M., Spivak S.I. "Solution of the inverse problem on the formation of molecular-weight distributions in ionic-coordination polymerization", *Doklady AN*, 2002, vol. 385., no. pp. 181-184.
3. Gataullin I.K. "Mathematical modeling of kinetically inhomogeneous neodim-based catalytic systems in ion-coordination polymerization of butadiene" ("Matematicheskoe modelirovanie kineticheski neodnorodnykh neodimsoderzhashchikh kataliticheskikh sistem v ionno-koordinatsionnoy polimerizatsii butadiena"), Cand. of Chemical Sci. diss., 02.00.17, Ufa, 2004, 22p.
4. Aminova G.A., Manuyko G.V., Bronskaya V.V., Ignashina T.V., Ismagilova A.I., D'yakonov G.S. "Mathematical modeling of butadiene rubber synthesis process on neodymium-containing catalyst system", *Polymer Science. Series A. (Vysokomolekulyarnye soyedineniya)*, 2006, vol. 48., no. 8, pp. 881-886.
5. Khursan S.L., Ismagilova A.S., Akhmet'yanova A.I. "Determining the basis of homodesmotic reactions of cyclic organic compounds by means of graph theory", *Russian Journal of Physical Chemistry. A. (Zhurnal fizicheskoy khimii)*, 2018, vol. 92, no. 7, pp.1312-1320.
6. Gizzatova E.R., Ismagilova A.S., Spivak S.I., Podvalnyy S.L. "On the method of searching for the basis of nonlinear parametric functions for polymerizations", *Russian Journal of Physical Chemistry. B. (Khimicheskaya fizika)*, 2018, vol.12, no. 6, pp. 1061-1065.
7. Gizzatova E.R., Podvalnyy S.L., Spivak S.I. "Search for kinetic constants in modeling the processes of polycenters non-break polymerization of dienes", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5, pp. 14-18.

Submitted 20.06.2022; revised 15.08.2022

Information about the authors

Elvira R. Gizzatova, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Bashkir State University (32 Zaki Validi str., Ufa 450076, Bashkortostan Republic, Russia), e-mail: makella@rambler.ru, tel.: +7(917)424-15-55
Andrey R. Shagiakhmetov, graduate student, Sterlitamak Branch of Bashkir State University (49 Prospekt Lenina, Sterlitamak 453103, Bashkortostan Republic, Russia), e-mail: slakis210195@gmail.com, tel.: +7(925)274-34-31
Gulnaz K. Khisametdinova, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Bashkir State University (32 Zaki Validi str., Ufa 450076, Bashkortostan Republic, Russia), e-mail: gulli_rgk@mail.ru, tel.: +7(927)306-46-56
Semyon L. Podvalny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394016, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel.: +7(929)011-21-53

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТРАЕКТОРИИ ДВИЖЕНИЯ РОБОТА В ОГРАНИЧЕННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

А.В. Каляшина, Т.С. Евдокимова, В.Ю. Ерхов

Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ,
г. Казань, Россия

Аннотация: исследование посвящено проектированию траектории движения робота в ограниченном пространстве с использованием современных средств робототехники и сенсорных устройств. Цель исследования – обеспечение автономного движения мобильного робота по пути следования с препятствиями, с использованием алгоритмов движения, основанных на графах. Предварительно был проведен анализ существующих алгоритмов движения мобильных роботов, отражены их достоинства и недостатки. Для достижения цели была разработана структурная схема мобильного робота, которая демонстрирует связь контроллера с внешними устройствами сбора информации и управления движением. Получение сигналов и их предварительная обработка проведены бортовыми сенсорными устройствами. Предварительно обработанный сигнал передается с уровня аппаратной логики на верхний уровень контроллера. Для этого реализована информационная система, включающая прием сигналов от датчиков и их передачу на уровень контроллера. Разработан алгоритм построения траектории движения. Благодаря реализации алгоритма поиска кратчайшего пути на основе известной карты местности обеспечено точное следование мобильного робота к заданной конечной точке в условиях складского помещения. Вопрос навигации решен с помощью карты черных линий, которая формирует сеть возможных маршрутов. Результаты прошли тестирование в условиях инженерного полигона

Ключевые слова: роботизация, автоматизированные устройства, мобильный робот, складская логистика, бортовые датчики, микроконтроллер, кинематика, алгоритм поиска

Введение

Существующие актуальные задачи совершенствования научно-технического прогресса Российской Федерации в условиях перехода к цифровому производству связаны с автоматизацией и роботизацией. Важное значение имеет достижение максимальной автономности роботизированных систем и комплексов при выполнении работ в неблагоприятных условиях [1]. В базовом функционале мобильных роботов заложен сам факт движения робота к цели для выполнения различных операций, его способность прокладывать маршрут, подвижность и автономность, обеспечение которых лежит в плоскости комплексных задач. Решение таких задач предполагает проектирование и внедрение автоматизированных устройств для движения, а также выполнения поставленных задач в замкнутом пространстве. Такие условия подразумевают под собой работу в сложных условиях, например перемещение в отделениях больниц, обеспечение поисковых работ в разрушенных зданиях и т.д. Однако подобные роботы могут использоваться и на открытых пространствах.

Цель данного исследования: обеспечение автономного движения робота по пути следования с препятствиями, с использованием алгоритмов движения, основанных на графах.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Разработана структурная схема мобильного робота.
2. Разработан алгоритм построения траектории движения.
3. Реализована информационная система, включающая прием сигналов от датчиков, их предобработку (нижний уровень аппаратной логики), передачу полученных сигналов на уровень контроллера.
4. Разработана программа управления движением робота.
5. Проведено тестирование экспериментальной модели робота.

Обзор алгоритмов построения траектории

Большинство алгоритмов построения траектории опираются на представление окружающего пространства, некоторые алгоритмы, такие как алгоритм Дейкстры или алгоритм A*, требуют в качестве входных данных граф расстояний. Граф расстояний не содержит всей информации, касающейся окружения, но поз-

воляет построить траекторию с возможностью последующей корректировки.

Проведено исследование и сравнение следующих алгоритмов:

1. Алгоритм Дейкстры. Данный алгоритм находит кратчайшие пути от одной из вершин графа до всех остальных. Алгоритм работает только для графов без рёбер отрицательного веса.

2. Алгоритм A star. A* — это модификация алгоритма Дейкстры, оптимизированная для единственной конечной точки. Алгоритм Дейкстры может находить пути ко всем точкам, A star находит путь к одной точке. A* пошагово просматривает все пути, ведущие от начальной вершины в конечную, пока не найдёт минимальный. Он просматривает сначала те маршруты, которые ближе к цели. При выборе вершины он учитывает весь пройденный до неё

путь. Порядок обхода вершин определяется эвристической функцией.

3. Алгоритм поиска в глубину. Алгоритм поиска (или обхода) в глубину позволяет построить обход ориентированного или неориентированного графа, при котором посещаются все вершины, доступные из начальной вершины. Результатом алгоритма поиска в глубину является некоторый маршрут, следуя которому можно обойти последовательно все вершины графа, доступные из начальной вершины. Поиск в глубину не находит кратчайших путей, зато он применим в ситуациях, когда граф неизвестен целиком, а исследуется каким-то автоматизированным устройством. Если же граф ориентированный, то поиск в глубину строит дерево путей из начальной вершины во все доступные из нее.

В таблице представлен сравнительный анализ алгоритмов.

Алгоритмы на графах	Достоинства	Недостатки
Алгоритм Дейкстры	<ul style="list-style-type: none"> - возможность нахождения кратчайшего пути от выбранной вершины до остальных - удобство применения при матричном представлении графа 	<ul style="list-style-type: none"> - работает только для графов без рёбер отрицательного веса - громоздкая программная реализация
Алгоритм A star	<ul style="list-style-type: none"> - улучшает алгоритм Дейкстры по времени вычислений - является оптимально эффективным для заданной эвристики 	<ul style="list-style-type: none"> - требует внимательного обращения в программе: если в организации данных используется принцип “последним пришёл — первым ушёл” – при одинаковой оценке вершин A star реализует поиск в глубину, в обратном случае применит поиск в ширину, что может сказаться на общей производительности - одна и та же вершина графа не должна дважды встречаться в очереди
Алгоритм поиска в глубину	<ul style="list-style-type: none"> - полезен при отсутствии полных данных о графе 	<ul style="list-style-type: none"> - данный метод не фокусируется на цели маршрута, а предлагает поиск “вслепую”

Для решения поставленных задач и выбора траектории по кратчайшему пути был выбран алгоритм A*. Данный алгоритм является весьма гибким и существуют вариации данного метода для различных условий. Также следует отметить, что у алгоритма A* имеется ряд недостатков, но по сравнению с вышеперечисленными

алгоритмами является одним из наиболее эффективных [2, 3].

Алгоритм A* является одним из наилучших алгоритмов, предназначенных для поиска кратчайшего пути. Эвристический поиск классифицирует все имеющиеся узлы по приближению наилучшего маршрута, идущего через

этот узел. Выражается эвристической функцией:

$$f(n) = g(n) + h(n)$$

- $f(n)$ – значение оценки, назначенное узлу n ,
- $g(n)$ – наименьшая стоимость прибытия в узел n из точки старта,
- $h(n)$ – эвристическое приближение стоимости пути к цели от узла n .

Аппаратная и программная реализация следования роботом по траектории

Структурная схема (рис. 1) демонстрирует связь контроллера с внешними устройствами. Пара инфракрасных датчиков (ИД) закреплена на нижней части корпуса – любой возможный маршрут для робота представлен черной линией на белом фоне, а установленные ИД предназначены для распознавания границы линии.

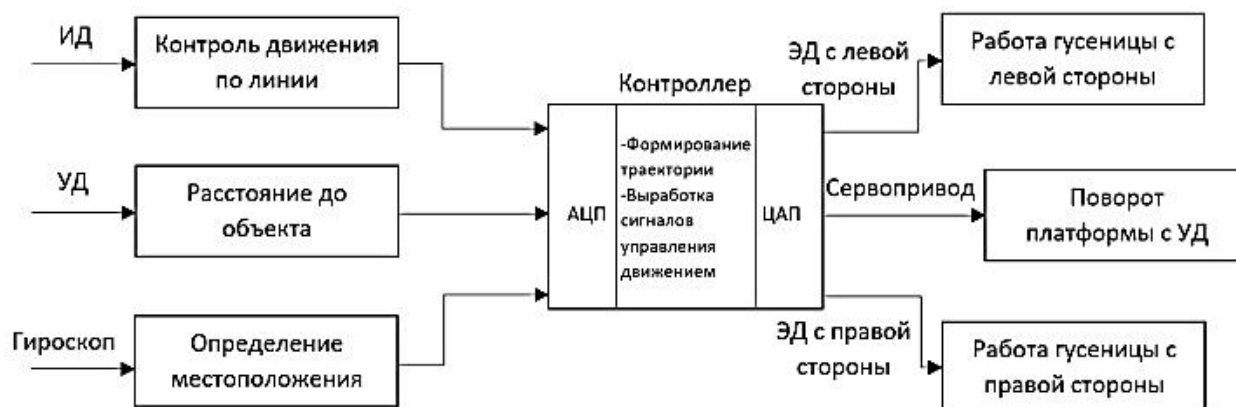


Рис. 1. Структурная схема робота

Вопрос навигации решен с помощью карты черных линий - она формируют сеть возможных маршрутов. Решающим фактором в определении конечной траектории явился выбор между директивами «поворот налево – прямолинейное движение – поворот направо».

При этом ультразвуковой датчик (УД), расположенный на горизонтально поворачивающейся платформе, оценивает расстояние до препятствий. Гироскоп позволяет системе определить текущий угол поворота относительно начального состояния.

Контроллер обладает отдельными портами для подключения устройств ввода и вывода (рис. 1). Благодаря встроенному аналого-цифровому преобразователю (АЦП) и цифро-аналоговому преобразователю (ЦАП) контроллер отвечает за формирование траектории и генерацию сигналов управления движением. Программный код загружается напрямую в память контроллера.

Двигатели на левой и правой сторонах устройства обеспечивают подвижность гусениц. Поворот платформы с УД производится серводвигателем.

В процессе всего движения эвристическая функция кратчайшего пути определялась перечнем пройденных и предстоящих поворотов в узлах карты черных линий. Обобщающий алгоритм представлен диаграммой (рис. 2).

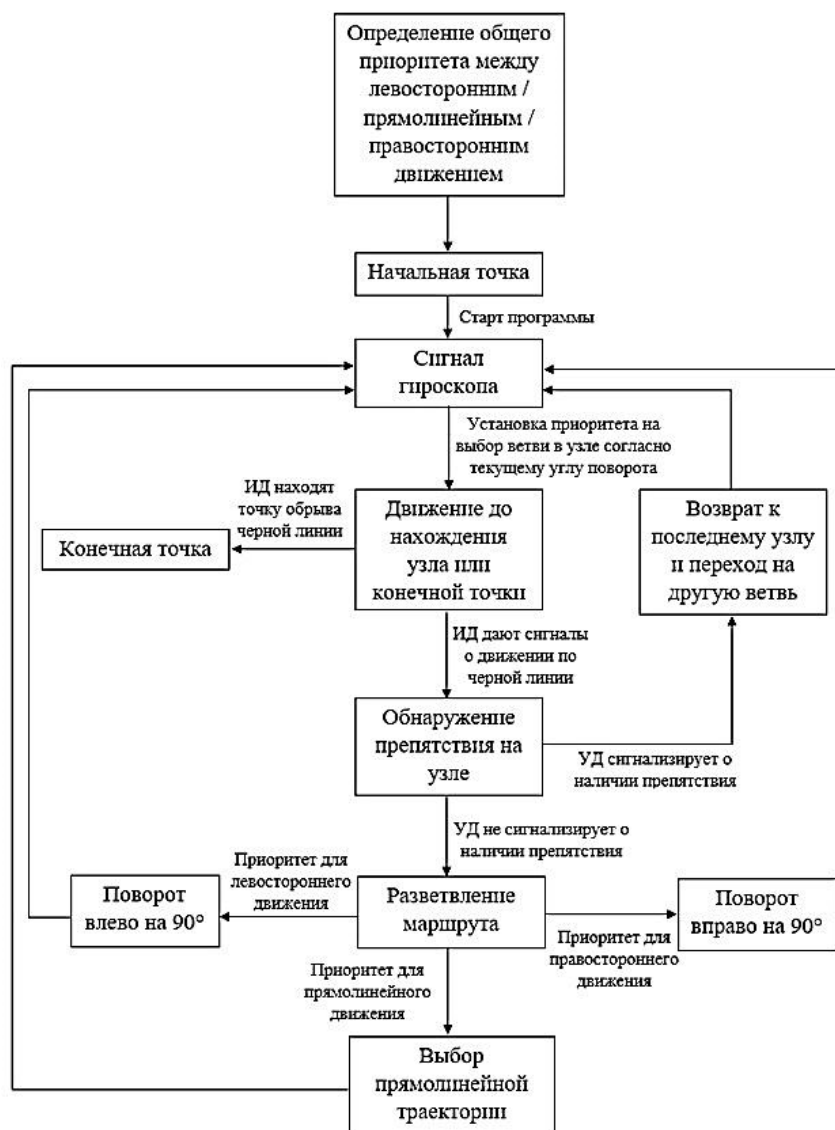


Рис. 2. Алгоритм движения робота по кратчайшему пути

Программный код реализован в среде Robotracker IDE 1.3.1 в виде скрипта, составленного C++ - подобном языке. Основная часть программы адаптирует скорости моторов по мере поступления сигналов с датчиков. Прямолинейное движение выполняется, когда оба ИД улавливают близкое к одинаковому соотношение черного и белого цвета перед собой. Все остальные варианты настройки скоростей были определены либо для выравнивания положения мобильного робота на прямолинейном участке маршрута, либо для поворота на дугах и разветвленных узлах [4].

Для реализации алгоритма движения по кратчайшему пути с учетом разнообразных препятствий использована информационная система, включающая 3 датчика.

Работа УД связана с детектированием препятствий, встречающихся на траектории

следования робота на расстоянии 12 см и менее – тестирование показало, что большее расстояние не всегда гарантировало достоверный отклик, а меньшее не обеспечивало своевременное реагирование системы для предотвращения столкновения с препятствием. В случае обнаружения препятствия робот также должен проверять возможное присутствие окружающих объектов. По этой причине дополнительно активируется серводвигатель, если робот движется в обратную от препятствия сторону. Данный мотор поочередно устанавливает положение платформы с УД на 20° влево, вправо и по центру относительно исходного состояния (с задержкой 500 мс). После определения роботом новой траектории движения сервопривод также возвращает платформу с УД в начальное положение. На рис. 3 представлен

момент изменения маршрута в узле при обнаружении препятствия.

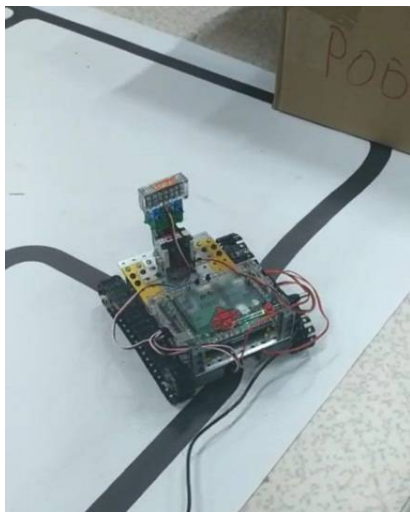


Рис. 3. Изменение траектории движения

Задача гироскопа заключается в оценке горизонтального угла поворота относительно начального положения робота.

Применялись ИД датчики с разным диапазоном чувствительности. Поэтому их программная реализация включает отдельную калибровку (настройку) каждого датчика. Добавлена проверка численного соотношения параметров ИД в нескольких операторах условия (где от робота требуется выполнить поворот по дуге или вернуться с края полосы в ее центр). Введенный набор интервалов компенсирует недостаток информации, ограниченный указанием диапазона самих допустимых значений для данного вида движения.

Реализация задач данного исследования иллюстрирует полный цикл разработки от «теории к практике»: в комплексе кинематики, электроники и информационных систем был разработан мобильный робот, способный находить препятствия и осуществлять движение по кратчайшему маршруту в замкнутых помещениях. Испытания в условиях инженер-

ного полигона показали, что мобильный робот может быть использован как прототип для решения задач интеллектуальной маршрутизации в ограниченном пространстве.

Заключение

Для решения задачи движения робота по кратчайшему пути был выбран алгоритм построения траектории движения на графах как оптимальный метод для заданных условий.

Разработана структурная схема робота, отражающая связь между уровнем аппаратной логики контроллера и верхним уровнем системы управления.

Разработанный алгоритм следования робота по кратчайшему маршруту до конечной точки с обходом непредвиденных препятствий проверен экспериментально на территории инженерного полигона. Проведен анализ системы в динамике, выявлено существенное влияние ряда параметров на движение робота, обеспечен устойчивый режим работы при непрерывном саморегулировании системы.

Литература

1. Alfred A.R., Ralph L. Hollis. Opportunities for Increased Intelligence and Autonomy in Robotic Systems for Manufacturing, Robotics Research, 1998. pp. 141-151
2. Система позиционирования и идентификации мобильной робототехнической платформы в ограниченном и открытом пространстве / Т.С. Евдокимова, А.А. Синодкин, Л.О. Федосова, М.И. Тюриков. Н. Новгород: НГТУ им. Р.Е. Алексева, 2018. №2(121). С. 16-25
3. Алгоритм построения глобальной траектории движения и планирования маршрута автоматической парковки беспилотного транспортного средства / Т.С. Евдокимова, А.А. Синодкин, Л.О. Федосова, М.И. Тюриков // Вестник МГТУ «Станкин». 2020. №4 (55). С. 61-67
4. Информационное обеспечение траектории движения мобильного робота в ограниченном пространстве / А.В. Каляшина, Т.С. Евдокимова, Л.Ф. Фаткуллина, Д.З. Валиева // Вестник МГТУ «Станкин». 2021. №4(59). С. 74-79.
5. Каляшина А.В., Кузнецов А.П. Методы оценки эффективности промышленного оборудования // Технология машиностроения. 2020. № 5. С. 66-75.

Поступила 17.05.2022; принята к публикации 16.08.2022

Информация об авторах

Каляшина Анна Викторовна – канд. техн. наук, доцент кафедры лазерных и аддитивных технологий, Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10), тел. 8-927-459-85-41, e-mail: anna_vik@mail.ru

Евдокимова Татьяна Сергеевна – аспирант кафедры автоматизации и управления, Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10), тел. +7-920-111-99-14, e-mail: evdokimovats97@gmail.com

Ерхов Владимир Юрьевич – магистр кафедры автоматизации и управления, Казанский национальный технический университет им. А.Н. Туполева – КАИ (420111, Россия, Республика Татарстан, г. Казань, ул. Карла Маркса, д. 10), тел. +7-963-917-57-46, e-mail: molovlad@gmail.ru

DESIGNING THE TRAJECTORY OF THE ROBOT IN A CONFINED SPACE

A.V. Kalyashina, T.S. Evdokimova, V.Yu. Erkhov

Kazan National Technical University named after A.N. Tupolev – KAI, Kazan, Russia

Abstract: this study is devoted to designing the trajectory of a robot in a confined space using modern robotics and sensor devices. The aim of the study is to provide autonomous movement of a mobile robot along the route with obstacles, using motion algorithms based on graphs. Previously, we carried out an analysis of existing algorithms for the movement of mobile robots and reflected their advantages and disadvantages. To achieve this goal, we developed a block diagram of a mobile robot, which demonstrates the connection of the controller with external devices for collecting information and controlling movement. We carried out reception of signals and their preliminary processing by on-board sensor devices. The preprocessed signal is transmitted from the hardware logic level to the upper level of the controller. To do this, we implemented an information system that includes receiving signals from sensors and transmitting them to the controller level. We developed an algorithm for constructing a motion trajectory. Thanks to the implementation of the shortest path search algorithm based on a well-known terrain map, the exact following of the mobile robot to a given endpoint in a warehouse environment is ensured. We solved the issue of navigation with the help of a map of black lines, which forms a network of possible routes. We tested the results in the conditions of an engineering landfill

Key words: robotics, automated devices, mobile robot, warehouse logistics, onboard sensors, microcontroller, kinematics, search algorithm

References

1. Alfred A.R., Ralph L. Hollis, "Opportunities for increased intelligence and autonomy in robotic systems for manufacturing", *Robotics Research*, 1998, pp. 141-151.
2. Evdokimova T.S., Sinodkin A.A., Fedosova L.O., Tyurikov M.I. "Positioning and identification system of a mobile robotic platform in a limited and open space", NSTU named after R.E. Alekseev, Nizhny Novgorod, 2018, no. 2(121), pp. 16-25
3. Evdokimova T.S., Sinodkin A.A., Fedosova L.O., Tyurikov M.I. "Algorithm for constructing a global trajectory of movement and route planning for automatic parking of an unmanned vehicle", *Bulletin of MSTU Stankin (Vestnik MGTU "Stankin")*, 2020, no. 4 (55), pp. 61-67
4. Kalyashina A.V., Evdokimova T.S. Fatkullina L.F., Valieva D.Z. "Information support of the trajectory of movement of a mobile robot in a confined space", *Bulletin of MSTU Stankin (Vestnik MGTU "Stankin")*, 2021, no. 4(59), pp. 74-79.
5. Kalyashina A.V., Kuznetsov A.P. "Methods of evaluating the effectiveness of industrial equipment", *Engineering Technology (Tekhnologiya mashinostroeniya)*, 2020, no. 5, pp. 66-75

Submitted 17.05.2022; revised 16.08.2022

Information about the authors

Anna V. Kalyashina, Cand. Sc. (Technical), Professor, Kazan National Technical University named after A.N. Tupolev (10 Karl Marx str., Kazan 420111, Republic of Tatarstan, Russia), tel.: 8-927-459-85-41, e-mail: anna_vik@mail.ru
Tat'yana S. Evdokimova, graduate student, Kazan National Technical University named after A.N. Tupolev (10 Karl Marx str., Kazan 420111, Republic of Tatarstan, Russia), tel.: +7 (920) 111 9914, e-mail: evdokimovats97@gmail.com
Vladimir Yu. Erkhov, MA, Kazan National Technical University named after A.N. Tupolev (10 Karl Marx str., Kazan 420111, Republic of Tatarstan, Russia), tel.: +7-963-917-57-46, e-mail: molovlad@gmail.ru

РАЗРАБОТКА РАСШИРЕНИЯ КОНФИГУРАЦИИ СПЕЦИАЛЬНОГО ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ

Н.М. Жевандров, А.Д. Данилов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: приведены результаты разработки программного расширения конфигурации для ПО, реализующего модули взаимодействия с различными типами приборов линейки ARINST. Многие аспекты функционала ПО должны быть настроены под задачи и нужды пользователя: как графические представления, так и режимы обработки данных. Для удобства работы пользователя необходимо предоставить возможность сохранения и восстановления заданной пользователем конфигурации ПО между рабочими сессиями и подключениями приборов ARINST в автоматическом режиме, а также в любой момент рабочей сессии по заданному пользователем пути. При этом для разрабатываемого ПО были установлены следующие требования: обеспечить автоматические сохранения и восстановление данных конфигурации ПО между рабочими сессиями и подключениями приборов ARINST, а также в любой момент рабочей сессии по заданному пользователем пути; разделить данные конфигурации по модулям взаимодействия; хранить данные конфигурации на машине пользователя в виде файлов; вне зависимости от операционной системы файлы конфигураций располагать в каталогах файловой системы, для доступа к которым на чтение и запись не требуются повышенные привилегии. Описаны формат данных конфигурации, система конфигурации и устройство менеджера конфигурации как в предыдущей, так и в текущей реализации. Определены направления развития разработанного модуля конфигурации

Ключевые слова: ARINST, специальное ПО, модули взаимодействия, программное расширение, конфигурация ПО

Введение

В настоящее время широкое применение находят различные измерительные приборы линейки ARINST (Компания «Крокс Плюс») [1]. В результате этого возникла проблема разработки специального программного обеспечения для приборов, реализующих протокол взаимодействия.

В качестве интерфейса взаимодействия был использован последовательный порт (RS-232). Передача данных реализована в пакетном режиме в бинарном представлении.

Также для приборов, применяющих разработанный протокол взаимодействия, потребовалось создание программного обеспечения (ПО), работающего на персональных компьютерах [2] (Windows 7 и выше архитектур x86 и x64, различные дистрибутивы Linux) и мобильных устройствах [3] (Android 4.0 и выше). Для разработки ПО была выбрана программная платформа Qt [4].

Данное ПО должно предоставлять возможности идентификации (например, по идентификационному номеру) и обновления микропрограммы, подключаемого прибора с помощью команд протокола взаимодействия. Некоторым отдельным типам приборов требуется

особый функционал. Для портативных моделей возможности прибора дополняются удобствами персонального компьютера (например, больший дисплей с большим разрешением). Взаимодействие со стационарными моделями реализовано исключительно посредством персонального компьютера.

Многие аспекты функционала ПО могут быть настроены под задачи и нужды пользователя: как графические представления (например, количество и расположение графиков, локализация ПО), так и режимы обработки данных (например, выбор трансформаций исходных данных, источников данных и данных вывода).

Таким образом, пользователю для работы с каким-либо прибором приходится между рабочими сессиями ПО каждый раз конфигурировать все необходимые ему аспекты функционала ПО. В результате этого возникла проблема разработки расширения конфигурации специального ПО.

При этом для удобства работы пользователя необходимо предоставить возможность сохранять и восстанавливать заданную пользователем конфигурацию ПО между рабочими сессиями и подключениями приборов ARINST в автоматическом режиме, а также в любой момент рабочей сессии по заданному пользователем пути.

Данная статья посвящена разработке программного расширения конфигурации для ПО, реализующего модули взаимодействия с различными типами приборов ARINST.

Функциональные требования к разрабатываемому расширению ПО

Для разрабатываемого модуля конфигурации ПО установлены следующие требования:

- обеспечить автоматические сохранения и восстановление данных конфигурации ПО между рабочими сессиями и подключениями приборов ARINST, а также в любой момент рабочей сессии по заданному пользователем пути;
- разделить данные конфигурации по модулям взаимодействия;
- хранить данные конфигурации на машине пользователя в виде файлов;
- вне зависимости от операционной системы (далее – ОС) файлы конфигураций располагать в каталогах файловой системы, для доступа к которым на чтение и запись не требуются повышенные привилегии.

Поскольку данные конфигурации хранятся в виде файлов, необходимо определить требования для их формата:

- должен быть текстовым;
- легко восприниматься пользователями без специальной подготовки работы с персональными компьютерами (минимальное количество используемых спецсимволов и синтаксических конструкций);
- осуществлять поддержку многоуровневых структур данных (например, вложенные списки).

Предыдущая реализация модуля конфигурации. Формат и система конфигурации

В качестве формата файлов данных конфигурации был выбран INI [5], так как программная платформа, используемая для разработки ПО, имеет свою реализацию системы конфигурации – QSettings [6]. Данная система для хранения данных конфигурации в виде файлов использует формат INI, указанный ранее.

На рис. 1 представлен пример содержания файла конфигурации по умолчанию на машине под управлением ОС семейства Windows в формате INI.

```

1 [Default]
2 com_port=COM-9
3 language=:/translation/vectorgui_en.qm
4 interpolation_enabled=false
5
6 [Window.Main]
7 menu_page=0
8 menu_visible=true
    
```

Рис. 1. Содержание файла конфигурации по умолчанию в формате INI

Однако при использовании данной системы с этим форматом файлов с течением времени были выявлены некоторые недостатки:

- формат файлов INI оказался неудачным для решения подобной задачи, поскольку лишь частично реализует многоуровневые структуры данных. Данный формат для иерархии данных определяет секции, но не определяет какой-либо способ выделения подсекций;
- данная система конфигурации реализует поддержку многоуровневых структур данных для этого формата с помощью конкатенирования «подсекций» в единый ключ, из-за чего запись ключей становится громоздкой и сложной для восприятия;
- система QSettings навязывает свое поведение при ее использовании с некоторыми ОС. Например, для ОС семейства Windows данная система старается использовать системный реестр в качестве как запасного хранилища данных конфигурации, так и источника восстановления этих данных, что неприемлемо при решении данной задачи.

На рис. 2 представлен пример представления многоуровневой структуры данных с использованием данной системы конфигурации.

Также эта система конфигурации является частью модуля ядра программной платформы, в связи с чем не может быть использована без данной программной платформы, т.е. отсутствует гибкость интеграции системы.

Предыдущая реализация модуля конфигурации. Менеджер конфигурации

Для использования системы конфигурации другими объектами ПО с целью сохранения и восстановления их конфигурации, а также для удовлетворения выдвинутых к модулю требований, необходимо было создать некоторый «управляющий» объект. Этот же объект должен управлять процессами сохранения и восстановления конфигурации, а также формирования конфигурации по умолчанию в рамках

всех объектов ПО, которым необходим данный функционал. Таким объектом стал менеджер конфигурации – MSettings.

```

15 [Charts]
16 chart_arrange=0
17 selected_chartview=0
18 use_opengl=false
19
20 [Charts.UL]
21 type=0
22 DTF\domain=0
23 DTF\start=0
24 DTF\stop=250
25 DTF\velocity_factor=1
26 LOG\grid_step=20
27 LIN\grid_step=200
28 LOSS\domain=0
29 LOSS\cable_length=1
30 SMITH\limit_line_val=0
31 SMITH\is_enabled=0
32 POLAR\limit_line_val=0
33 POLAR\is_enabled=0
34 SWR\limit_line_val=0
35 SWR\is_enabled=0
36 use_opengl=false
    
```

Рис. 2. Фрагмент содержания файла конфигурации с примером многоуровневой структуры данных при использовании системы конфигурации QSettings

На рис. 3 представлена диаграмма класса данного менеджера.

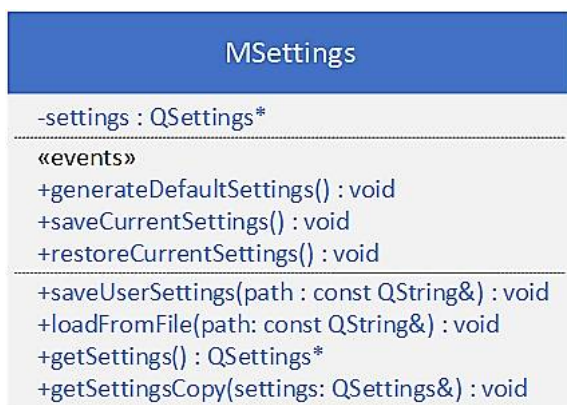


Рис. 3. Диаграмма класса менеджера конфигурации MSettings

Как видно из диаграммы, объект менеджера конфигурации содержит объект системы конфигурации – settings. В используемой для разработки программной платформы реализована система событий [7]. Поэтому для организации управления процессами сохранения и восстановления конфигурации, а также формирования конфигурации по умолчанию используются соответствующие события (на диаграмме они перечислены под подзаголовком

«events»). Также данный менеджер позволяет в любой момент рабочей сессии ПО сохранять и восстанавливать данные конфигурации с помощью соответствующих методов saveUserSettings и loadFromFile.

Любые объекты ПО, которым требуется функционал сохранения и восстановления конфигурации, должны реализовать интерфейс ISettingsRestorable.

На рис. 4 представлена диаграмма этого интерфейса с примером реализации.

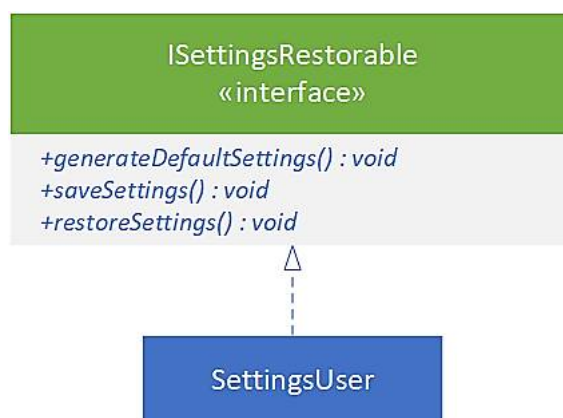


Рис. 4. Диаграмма интерфейса ISettingsRestorable с примером реализации классом SettingsUser

Таким образом, в ситуации сохранения конфигурации любому объекту требовалось получить от менеджера конфигурации объект системы конфигурации с помощью метода getSettings. Данный метод возвращает изменяемый объект системы конфигурации.

Вместе с тем, в ситуации восстановления конфигурации объекту необходимо было запросить у менеджера конфигурации копию объекта системы конфигурации с помощью метода getSettingsCopy. Этот метод возвращает не сам объект системы конфигурации, а его точную копию. Такой подход применялся с той целью, чтобы не допустить во время восстановления конфигурации каким-либо объектом изменений, поскольку эти изменения отразятся для остальных объектов, которым требовалось восстановить свою конфигурацию.

Одним из функциональных требований к разрабатываемому модулю конфигурации было обеспечить автоматическое сохранение и восстановление данных конфигурации ПО между рабочими сессиями и подключениями приборов ARINST.

На рис. 5 представлена диаграмма процесса рабочей сессии ПО.

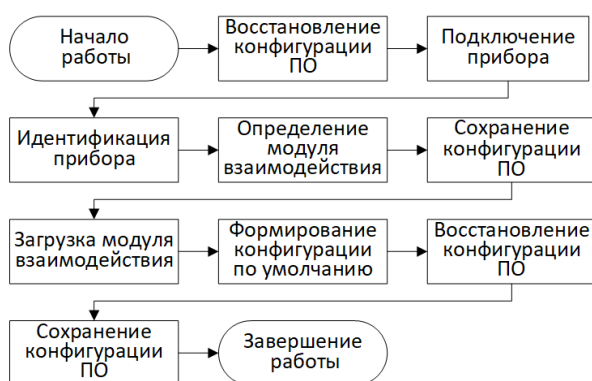


Рис. 5. Диаграмма процесса рабочей сессии ПО

После начала и перед завершением рабочей сессии ПО происходит восстановление конфигурации базового модуля взаимодействия и сохранение конфигурации последнего загруженного модуля взаимодействия соответственно. В случае успешного подключения прибора выполняется процедура идентификации, по результатам которой определяется подходящий модуль взаимодействия. Перед загрузкой модуля взаимодействия и после формирования его конфигурации по умолчанию выполняется сохранение конфигурации предыдущего модуля взаимодействия и восстановление конфигурации нового модуля взаимодействия соответственно. На протяжении рабочей сессии и между подключениями приборов множество раз выполняется сохранение и восстановление конфигурации ПО ввиду необходимости поддержания данных конфигурации в актуальном состоянии для всех загруженных модулей взаимодействия.

Итогом первой итерации разработки модуля конфигурации стала разработка менеджера конфигурации и успешная интеграция его функционала в рамках разработанного ПО. Были удовлетворены все поставленные требования к разработке данного модуля. Для хранения файлов конфигурации был выбран каталог данных приложений данного пользователя ОС, в котором ПО создает собственные подкаталоги.

Текущая реализация модуля конфигурации

Функционал разработанного ранее менеджера конфигурации был доработан: в файлах конфигурации указывается версия ПО, которую при попытке восстановления данных из указанного файла менеджер проверяет. В случае несовпадения версии указанный файл конфигурации отвергается в пользу конфигурации по умолчанию. Данное нововведение значительно

упростило процесс установки новых версий ПО на машины пользователей, поскольку оно исключает ситуации несовместимости данных конфигурации с новой версией ПО. На данный момент какая-либо миграция данных конфигурации между версиями ПО возможна лишь в ручном режиме с помощью любого текстового редактора на усмотрение пользователя.

Из-за выявленных ранее недостатков при использовании предыдущей итерации модуля конфигурации было решено заменить систему конфигурации, равно как и формат хранимых файлов.

Существует несколько программных библиотек [8] для языка C++, на котором ведется разработка ПО для данной программной платформы, реализующих систему конфигурации ПО (например, Boost.Program_options, libconfig и прочие), но данные решения являются громоздкими и предоставляют избыточные решения поставленных задач, либо так же, как и QSettings, являются частью программной платформы. В результате было решено разработать собственную систему конфигурации без зависимости от какой-либо программной платформы для упрощения процесса интеграции данной системы.

Среди наиболее часто используемых текстовых форматов файлов для конфигурации ПО можно выделить следующие: JSON [9], XML [10], YAML [11], TOML [12]. Форматы JSON и XML тяжело воспринимаются неподготовленными пользователями. Формат TOML синтаксически похож на неподходящий формат INI, но имеет ряд доработок. Однако данный формат также оказался менее удобен при формировании многоуровневых структур.

В итоге был выбран формат YAML, учитывая предъявленные ранее требования. Конфигурационный файл в данном формате представляет собой обыкновенный многоуровневый список.

На рис. 6 представлен пример содержания файла конфигурации по умолчанию на машине под управлением ОС семейства Windows в формате YAML.

Для чтения и записи данных конфигурации в формате YAML используется программная библиотека yaml-cpp [13]. Данная библиотека позволяет расширять [14] список поддерживаемых типов объектов для чтения и записи в этом формате с помощью реализации объектов конверсии из произвольных типов в объекты библиотеки. Были реализованы объекты конверсии для некоторых типов программной платформы,

которая используется для разработки ПО, с целью повышения удобства и упрощения исполь-

зования данной библиотеки.

```

1  General:
2  app_ver: 2.5.936
3  language_NOTE: "application currently supports following languages: ru, en"
4  language: en
5  profile_save_path: C:/Users/user/AppData/Roaming/Kroks/ArinstVL-DEBUG/profiles/DEFAULT
6  profile_load_path: C:/Users/user/AppData/Roaming/Kroks/ArinstVL-DEBUG/profiles/DEFAULT
7  Window:
8  Main:
9  menu_page: 0
10 menu_visible: true
11 Charts:
12 chart_arrangement: 0
13 selected_chartview: 0

```

Рис. 6. Содержание файла конфигурации по умолчанию в формате YAML

На рис. 7 представлен пример представления многоуровневой структуры данных с использованием собственной системы конфигурации.

```

18 Charts:
19 chart_arrangement: 0
20 selected_chartview: 0
21 UL:
22 chart_type: 2
23 marks_visible: true
24 DTF:
25 domain: 0
26 start: 0
27 stop: 50
28 velocity_factor: 1
29 LOG_MAG:
30 grid_step: 20
31 LIN_MAG:
32 grid_step: 200
33 LOSS:
34 domain: 0
35 cable_length: 1
36 SMITH:
37 limit_line_val: 0
38 is_limit_line_enabled: 0
39 POLAR:

```

Рис. 7. Фрагмент содержания файла конфигурации с примером многоуровневой структуры данных при использовании собственной системы конфигурации

Заключение

В результате применения на практике разработанного программного расширения конфигурации для ПО приборов линейки ARINST была решена задача реализации модулей взаимодействия между разнородными устройствами данного типа. При этом исключена проблема устранения несовместимости гетерогенных

данных конфигурации при использовании предлагаемой версии ПО.

Данная разработка позволила пользователю при работе с каким-либо прибором избежать многократной конфигурации необходимого функционала ПО каждый раз между рабочими сессиями, так как сохранение и восстановление данных конфигурации ПО осуществляется в автоматическом режиме на протяжении всей рабочей сессии и между подключениями приборов ARINST.

Литература

1. О компании ООО «Крокс Плюс». URL: <https://kroks.ru/about/>
2. Dalheimer M.K. Programming with QT. O'Reilly, 2002. 520 с.
3. Potter L. Hands-On Mobile and Embedded Development with Qt 5: Build apps for Android, iOS, and Raspberry Pi with C++ and Qt. Packt Publishing, 2019. 355 с.
4. Qt Framework. URL: <https://www.qt.io/product/framework>
5. Configuration files specification. URL: <https://moz-services-docs.readthedocs.io/en/latest/server-devguide/confspec.html>
6. QSettings Class. URL: <https://doc.qt.io/archives/qt-5.12/qsettings.html>
7. Signals & Slots. URL: <https://doc.qt.io/archives/qt-5.12/signalsandslots.html>
8. A list of open source C++ libraries. URL: <https://en.cppreference.com/w/cpp/links/libs#Configuration>
9. JSON. URL: <https://www.json.org/json-en.html>
10. Extensible Markup Language. URL: <https://www.w3.org/TR/xml/>
11. YAML Ain't Markup Language. URL: <https://yaml.org/spec/1.2.2/>
12. TOML. URL: <https://toml.io/en/v1.0.0>
13. yaml-cpp. URL: <https://github.com/jbeder/yaml-cpp>
14. Converting To/From Native Data Types. URL: <https://github.com/jbeder/yaml-cpp/wiki/Tutorial#converting-tofrom-native-data-types>

Информация об авторах

Жевандров Никита Михайлович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: heraldgersdorff@yandex.ru

Данилов Александр Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

DEVELOPMENT OF SPECIAL SOFTWARE CONFIGURATION EXTENSION

N.M. Zhevandrov, A.D. Danilov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents the results of the development of a configuration extension for the specialized software that implements interaction modules with different types of ARINST product line devices. Many aspects of the software functionality can be customized to suit user's tasks and needs: such as graphical representations and data processing modes. For convenience of a user it is necessary to provide a feature of automatic saving and restoring configuration of the software set by the user from one working session to another and from one connection of ARINST device to another, as well as at any moment of a work session using a user-defined path. At that the following requirements were set for the software under development: to provide automatic saving and restoring of software configuration data from one working session to another and from one connection of ARINST device to another, as well as at any moment of a work session using a user-defined path; to split configuration data according to interaction modules; to store configuration data on the user's system in the form of files; to place configuration files in directories of a file system that do not require elevated privileges for read and write access regardless of the operating system. The format of configuration data, configuration system and the mechanism behind configuration manager in both previous and current implementations are described. The directions of development of the developed configuration module are defined

Key words: ARINST, specialized software, interaction modules, software extension, software configuration

References

1. About the company Kroks Plus LLC, available at: <https://kroks.ru/about/>
2. Dalheimer M.K. "Programming with QT", O'Reilly, 2002, 520 p.
3. Potter L. "Hands-on mobile and embedded development with Qt 5: Build apps for Android, iOS, and Raspberry Pi with C++ and Qt", Packt Publishing, 2019, 355 p.
4. Qt Framework, available at: <https://www.qt.io/product/framework>
5. Configuration files specification, available at: <https://moz-services-docs.readthedocs.io/en/latest/server-devguide/confspec.html>
6. QSettings Class, available at: <https://doc.qt.io/archives/qt-5.12/qsettings.html>
7. Signals & Slots, available at: <https://doc.qt.io/archives/qt-5.12/signalsandslots.html>
8. A list of open source C++ libraries, available at: <https://en.cppreference.com/w/cpp/links/libs#Configuration>
9. JSON, available at: <https://www.json.org/json-en.html>
10. Extensible Markup Language, available at: <https://www.w3.org/TR/xml/>
11. YAML Ain't Markup Language, available at: <https://yaml.org/spec/1.2.2/>
12. TOML, available at: <https://toml.io/en/v1.0.0>
13. yaml-cpp, available at: <https://github.com/jbeder/yaml-cpp>
14. Converting to/from Native Data Types, available at: <https://github.com/jbeder/yaml-cpp/wiki/Tutorial#converting-tofrom-native-data-types>

Submitted 31.05.2022; revised 16.08.2022

Information about the authors

Nikita M. Zhevandrov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 324006, Russia), e-mail: heraldgersdorff@yandex.ru

Aleksandr D. Danilov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 324006, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ НА БАЗЕ РАСШИРЯЕМЫХ ПЛАТФОРМ С ОТКРЫТЫМ ИСХОДНЫМ КОДОМ

О.В. Минакова, Н.В. Акамсина, О.В. Курипта

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлен анализ известных архитектурных подходов и моделей анализа архитектуры с целью быстрой разработки приложений на готовой технологической платформе. Выбранные методы были использованы для проектирования системы управления фондом оценочных средств как примера программного инструмента для профессиональной деятельности. Последовательность этапов разработки программной системы на основе архитектурного подхода детально проанализирована. Обоснован выбор распространённой технологической платформ Visual Studio Code с открытым исходным кодом и набором стандартных расширений. Для основной функциональности – редактирования текста и интероперабельности с LMS и необходимых перспектив – распространённость, удобство использования и модифицируемость, проведено архитектурное проектирование. Представлено описание реализации необходимых расширений, в частности, навигации по банку тестовых заданий. Проведенные исследования позволили предложить методологию быстрой разработки программных инструментов на базе расширяемых платформ на основе архитектурного подхода. Описание технологии представлено в работе для обсуждения. Поскольку в современных условиях необходимы быстрая разработка новых программных средств, исследования возможностей использования расширяемых платформ, стандартизация подходов к использованию открытого исходного кода, проектирование шаблонов жизненно важно. Возможные решения этих ключевых задач предложены в работе на примере специального программного обеспечения

Ключевые слова: разработка программ, gift-файл, микроядерная архитектура, реализация расширений, открытый исходный код

Введение

В любой профессиональной деятельности возникает необходимость в собственных программных инструментах, что влечет за собой инициализацию разработки программного обеспечения. Естественно, это процесс трудоемкий и требует значительных затрат, и существует множество облегченных решений. В настоящее время большинство компаний разработчиков ПО превращают свои продукты в полноценную экосистему, имеющую различные возможности для расширения функциональности и конфигурирования под различные потребности пользователя. Модульное построение с открытыми прикладными интерфейсами (API), микроядерная и микросервисная архитектуры становятся стандартами разработки, направленными на непрерывную модификацию распространяемого ПО [1].

Согласно закону Лемана, эволюционирующие программы повышают свою сложность, что приводит к нарушению функционирования и ограничению использования. Поэтому альтернативой стратегии сопровождения становится конструирование программы по потреб-

ности [2], когда есть легковесное ядро, к которому подключают только необходимые для данного сценария использования модули расширения. Опыт применения этого подхода для создания программного инструмента для профессиональной деятельности преподавателя представлен в данной работе.

Сравнение нашего опыта этой разработки с созданием других инструментов профессиональной деятельности с помощью собственного фреймворка [3] и полностью нативной разработки [4] позволяет предложить методологию быстрой разработки приложений на основе расширяемых программных платформ. Предложенная практика полезна для дальнейшего ее развития членами профессионального IT-сообщества и получения обратной связи при построении проблемно-ориентированных инструментов.

Цель работы – исследование методов создания инструментов профессиональной деятельности на базе расширяемых программных платформ с открытым исходным кодом на примере разработки редактора фонда оценочных средств (ФОС).

Задачи исследования:

– архитектурное проектирование и анализ практической реализации программных инструментов;

- анализ особенностей построения расширяемых программных платформ;
- представление методологии разработки программных систем на готовом ядре.

Постановка задачи

Основой для разработки программного обеспечения является техническое задание или спецификация, которые отражают пользовательские требования и являются контрактом между разработчиком и заказчиком. Современные технологии позволяют пользователям самим создавать собственные инструменты профессиональной деятельности, опираясь на расширяемые платформы либо репозитории открытого исходного кода. Но в таком случае при отсутствии опыта, профподготовки требуется надежное и простое руководство.

Его основой может стать архитектурная спецификация. Обычно деятельность по проектированию состоит из архитектурного и детального проектирования. В последнем этапе нет необходимости, поскольку предполагается использовать готовую технологическую платформу или кодовую базу. Следовательно, достаточно создать архитектурное представление.

История архитектурного подхода в разработке ПО начинается с конференции ICSE2000, когда была определена дорожная карта [5] исследований архитектуры. Ранее считалось, что «программные системы имеют множество структур, которые служат разным инженерным целям», и любая система изобреталась заново. Появление шаблонов проектирования GoF, а затем архитектурных стилей, позволило осуществлять формальный анализ существующих систем. Развитие принципов архитектурного анализа привело к выделению компромиссов архитектуры, увязывающих архитектурные решения и показатели качества [6]. Развитие и исследование этих методов привело к созданию архитектурных оценок [7] и техник документирования архитектуры [8].

Сейчас коммерчески успешные многоуровневые клиент-серверные и сервис-ориентированные архитектуры совместно с прикладными программными интерфейсами и языками спецификаций, а также полностью реализованными компонентами и даже подсистемами являются распространёнными примерами архитектурного подхода к разработке программного обеспечения. На их базе возникло множество фреймворков, позволяющих автоматизировать создание линеек программных

продуктов по тому или иному стандартному архитектурному стилю, с поддержкой сквозной модели жизненного цикла во множестве предметных областей.

Но зачастую хорошие архитектурные решения теряются из-за невозможности установить формальное соответствие с кодом. Известные модели архитектурных представлений облегчают понимание архитектуры, но не позволяют генерировать код. Наши исследования ставят целью определить возможности использовать распространённые и успешные методы анализа архитектур для синтеза программных решений.

Выбор метода архитектурного анализа

Модель представления архитектуры «4+1» [9] возникла из традиционной каскадной разработки, выраженной методологией Rational Unified Process. Четыре представления описывают архитектуру с разных точек зрения: логическое представление (например, объектная модель и поток обработки данных), представление процессов (например, аспекты параллелизма и синхронизации), физическое представление (схема программных уровней и функций в распределенной аппаратной среде) и представление для разработчиков, описывающее реализацию. Сценарии использования («+1») связывают все эти представления воедино. Такие модели максимально полно специфицируют систему и используются в классических методологиях.

Модель C4 [10] используется для документирования архитектуры программного обеспечения в легковесных методологиях. Идея состоит в том, чтобы использовать четыре различных уровня детализации (или масштабирования) для документирования архитектуры программного обеспечения.

На начальном уровне строится контекстная диаграмма, описывающая взаимодействия с внешними системами и пользователями. На следующем - контейнерная диаграмма, включающая независимые части приложения (контейнеры – это приложения, БД, сервисы). Далее с помощью диаграммы компонентов определяется взаимодействие компонентов внутри контейнера, затем на последнем уровне кода описывается реализация в виде диаграммы классов каждого программного компонента.

Этот подход был использован в [11], но обоснование многих технических решений находилось за рамками модели. То есть модель

С4 оказалась пригодной до уровня компонентов, но не достаточной для генерации кода, а также принятия решений о функциональности компонентов и необходимых характеристиках разрабатываемого программного средства.

Архитектурный подход к разработке помимо множества точек зрения и, соответственно, множества архитектурных представлений оперирует и ожидаемыми характеристиками качества архитектуры [12]. Используемое понятие – перспектива развития архитектуры, определяет, какое конкретное свойство качества будет достигнуто, предлагает набор проверенных действий и методов и описывает вероятные проблемы, с которыми может столкнуться разработчик. Диаграмма деятельности, отражающая этот подход, на рис. 1.

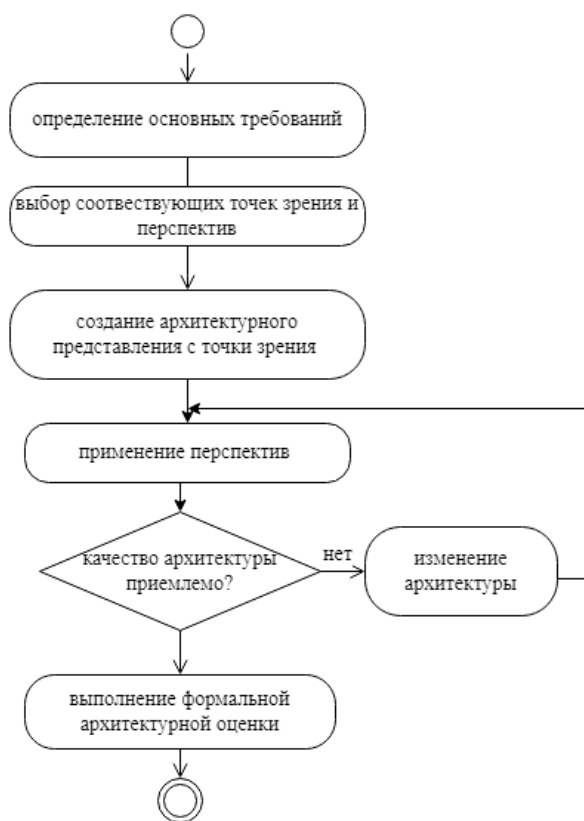


Рис. 1. Алгоритм применения перспектив для проектирования систем

Применение этого метода к практической задаче является предметом текущего исследования.

Практическое решение

Современные образовательные стандарты требуют создания оценочных материалов по каждой дисциплине или учебному модулю. Интерактивно поддерживают управление банком заданий современные LMS, которые имеют разнообразные средства создания учебного контента и предоставления обратной связи о результатах. Но зачастую при разработке самих тестовых вопросов и заданий быстрее и комфортнее пользоваться привычными текстовыми редакторами или облачными сервисами создания опросов типа Google Form.

При этом вне зависимости от предпочтения разработчика ФОС при редактировании заданий требуется постоянно экспортировать задания в LMS, а также определять и пометить проблемные вопросы при ответном импорте. Эти проблемы позволяют сформулировать основные требования к системе управления ФОС – редактирование текстовым редактором и интероперабельность с LMS.

Контекстное представление (рис. 2) позволяет определить механизм взаимодействия со сторонними системами, а для подчиненных систем, к которым относится разрабатываемая – это дает предпосылки для построения модели данных. Простой механизм обмена – файл в простом и распространенном gift-формате был выбран.

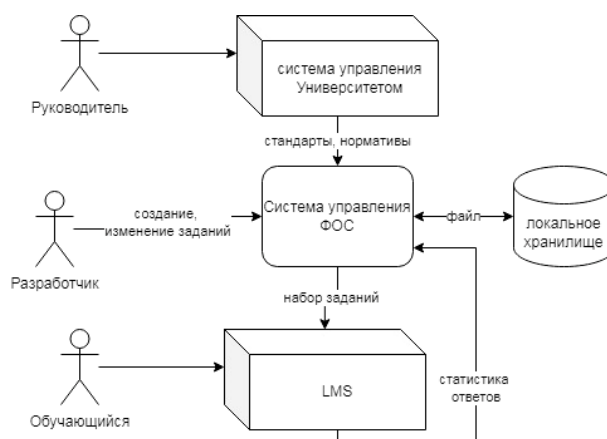


Рис. 2. Контекстное представление управлением ФОС

Согласно структуре gift-файла, составлена иерархическая модель данных базы тестовых заданий, представленная на рис. 3. Каждое тестовое задание – это запись в специальной разметке. В файле содержится произвольное число подкатегорий, которые состоят из заданий различного вида.

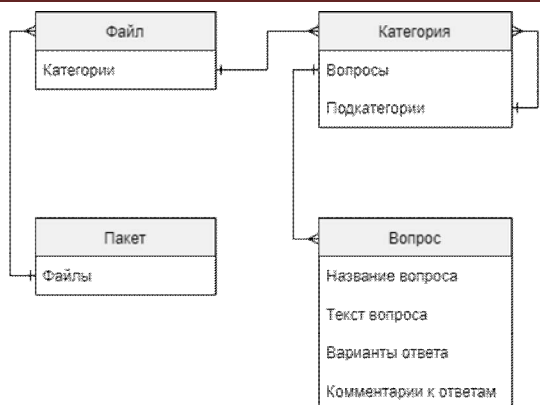


Рис. 3. Модель данных ФОС

Ввиду этого в системе будет два потока управления – для тестового задания, включающего стандартные операции редактирования (рис. 4), и для всего набора, составляющего основной поток (рис. 5). Их определение позволило выявить требуемую дополнительную функциональность разрабатываемой системы.

Для быстрой разработки системы необходимо выбрать технологическую платформу.

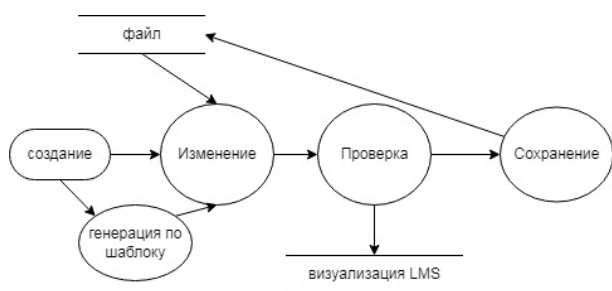


Рис. 4. Поток управления тестовым заданием

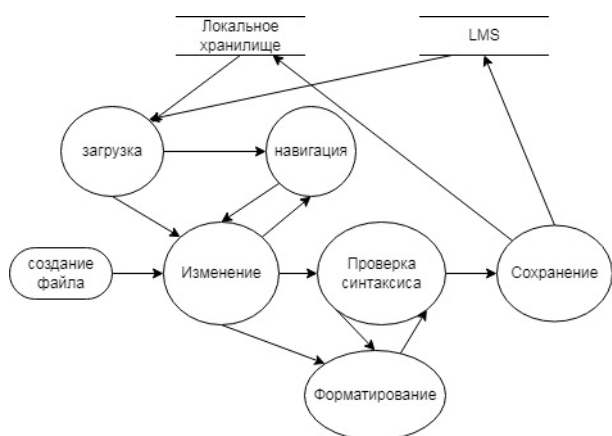


Рис. 5. Поток управления ФОС

Помимо ключевой функциональности – редактирования текстовых файлов, руковод-

ствовались следующими принципами (перспективами):

- распространенность;
- расширяемость;
- открытый исходный код с возможностью переиспользования.

В данном случае под распространённостью понимается привычность интерфейса пользователя как функций по редактированию текста. На сегодняшний день наиболее привычным и массово используемым является интерфейс Microsoft Word, который кроме обычных функций редактирования и форматирования (в том числе и ускоренного, такого как автозамена и ввод автотекста), позволяет работать с таблицами и изображениями, поддерживает стили и шаблоны для ускоренного создания однотипных документов, имеет средства проверки орфографии и грамматики, множество настраиваемых панелей для выбора необходимых операций и режимов навигации.

Способность к расширению в современном ПО обеспечивается возможностью включения сторонних плагинов, наличием и доступностью интерфейсов прикладного программирования (API) для расширения. API — один из наиболее распространенных способов интеграции с технологической платформой. Поэтому общедоступный, открытый и документированный API позволяет широко изменять функциональность и качественные характеристики программного обеспечения.

Политика использования ПО, заключающаяся в доступности исходного кода, его добровольной поддержке сообществом разработчиков и разрешения его переиспользования есть основа для быстрой и надежной разработки ПО в собственных целях. Это принципиальный базис вне индустриальной разработки, быстрого конструирования собственного программного инструментария, а также потенциальная возможность для всех стартапов и инновационных прототипов.

На сегодняшний день многие распространённые программные системы поддерживают архитектуру расширений: браузеры, IDE, из них имеются и доступные под разными лицензиями решения. Выбранный редактор кода Visual Studio Code (VSC) для кроссплатформенной разработки веб- и облачных приложений отличается легковесным ядром. По необходимости оно может расширяться за счет имеющегося полноценного набора компонентов — инструментов разработчика ПО, включающего синтаксический анализатор, отладчик,

средства для работы с системами контроля версий, интеллектуальных подсказок и автодополнения кода IntelliSense. Архитектура VSC идеальный пример микроядерной архитектуры, задействующей в качестве плагинов другие полнофункциональные средства – текстовый редактор Monaco, инструмент контроля версий git, среду выполнения chromium.

Анализ marketplace.visualstudio.com и доступных репозиториях ПО показал, что имеются плагины для решения задач по проверке синтаксиса GIFT Format и интерактивному отображению задания GIFT Format Preview. Разработка плагинов для покрытия остальной требуемой функциональности была выполнена самостоятельно [13, 14].

Было разработано четыре программных модуля расширения – навигации по банку тестовых заданий, слияния двух файлов, контроля версий и генерации задания по шаблону. На рис. 6 представлена проектная детализация расширения навигации по банку тестовых заданий. Компонент-класс TreeItem API VSC используется для представления модели данных (рис. 3) в виде иерархического списка, класс управления NavigationProvider реализует логику загрузки и синхронизации с редактируемым текстом, главный класс плагина extension отвечает за связывание с платформой и оперативное обновление.

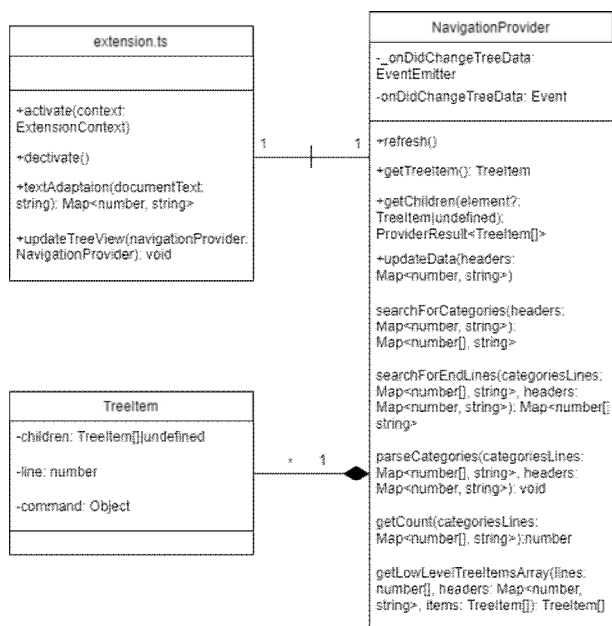


Рис. 6. Представление уровня кода модуля навигации

Аналогичным образом реализованы другие плагины. Фактически написание кода требовалось только для выполнения преобразований gift-файла во внутреннюю структуру данных и специфики взаимодействия с API.

Архитектура разработанной системы управления ФОС представлена на рис. 7, серым выделены заимствованные плагины, белым — написанные конкретно для данной системы.

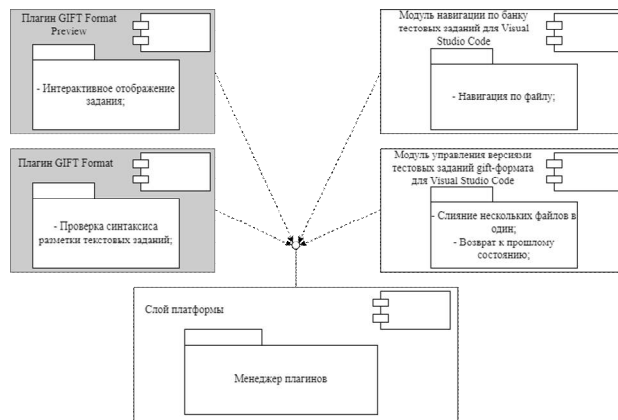


Рис. 7. Структура системы управления ФОС

Для удобства установки все плагины были объединены в интегратор, который позволяет загружать сразу весь набор в установленный VSC [15].

Методология быстрой разработки приложений на основе расширяемых программных платформ

Представленное практическое решение, а также наш опыт по созданию других программных инструментов для решения профессиональных задач позволяет определить основные шаги и рекомендации по разработке.

Ключевая цель подобных инструментов – это интеграция с основными профессиональными системами, поэтому необходимо определить механизм и формат обмена данными. Для этого необходимо построение контекстной диаграммы. Наиболее универсальным, легко трансформируемым является файл и его формат, альтернатива – API, в любом случае можно говорить о входном и выходном интерфейсах разрабатываемой системы.

На следующем этапе детализируется сам процесс обработки с целью выявления необходимого функционала (как преобразуются и изменяются данные из входного интерфейса, чтобы достигнуть результата). Как правило, наиболее эффективно построение диаграммы

потока данных или функциональной декомпозиции для выявления необходимой функциональности. По наибольшему числу функций в сочетании с выделенными интерфейсами выбирается класс технологических платформ.

Критериями выбора технологической платформы являются предпочтение пользователя, расширяемость, доступность исходного кода либо наличие экосистемы, а также возможные ограничения, связанные с техническим и программным окружением операционного применения.

После выбора технологической платформы остается ее развернуть, установить функциональные плагины и реализовать необходимые расширения при необходимости.

Предлагаемая методология представлена на рис. 8.

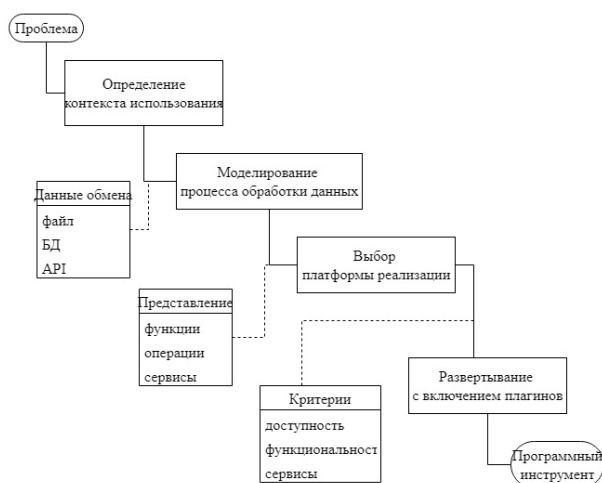


Рис. 8. Процесс быстрой разработки приложений на основе расширяемых программных платформ

Зрелые инженерные дисциплины характеризуются справочниками и наличием различных справочных материалов, которые предоставляют инженерам систематизированное знание области. По аналогии с каталогизацией архитектурных паттернов следует шаблонизировать и детали проектирования. Так CRUD (акроним операций – создание (create), чтение (read), модификация (update), удаление (delete)), описывающий четыре основные операции с базами данных и REST API, может использоваться для определения минимального набора функций с любыми хранимыми вычислительными сущностями (файлы, записи об элементах предметной области, сообщения). Если сущности характеризуются состоянием, то необходимо управление версиями. Для удобства работы с множеством сущностей необходим механизм

навигации, маркирования или выделения, а также проверок на возможные ошибки. Такие решения при кажущейся простоте должны быть отслеживаемыми и проверяемыми.

Пример шаблона для определения функциональности на основе анализа имеющихся плагинов и основного функционала VSC в стиле диаграмм причинно-следственных связей представлен на рис. 9.

Проведенные исследования показывают, что необходима разработка нормативов для анализа реализованных архитектур и оценки существующих программных проектов, чтобы прогнозировать свойства их реализации.

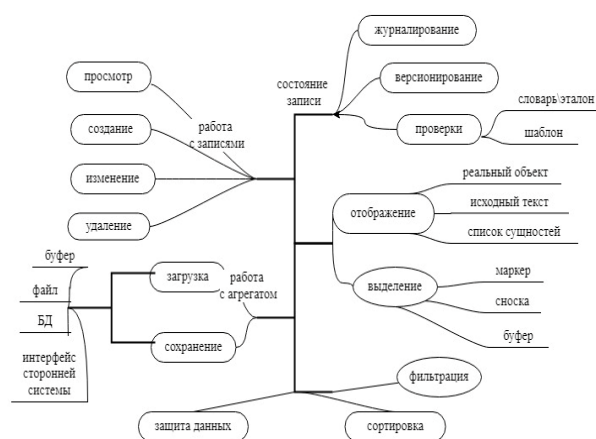


Рис. 9. Карта для определения функциональности ПО

Разрабатывается архитектурная поддержка для систем, которые динамически адаптируются к изменениям в ресурсах, ожиданиям и предпочтениям каждого пользователя. По мере того, как вычисления становятся повсеместными и интегрируются в повседневные устройства, базовые ресурсы, такие как пропускная способность и информационные ресурсы, данные о местоположении, изменяются динамически. Более того, у каждого отдельного пользователя разные потребности, которые меняются со временем. Разработка архитектур, которые могут динамически предвидеть эти изменения и реагировать на них, поможет максимизировать выгоду, которую может получить каждый пользователь. Для достижения этого потребуются не только адаптивные архитектуры, но и спецификации компонентов, отражающие изменчивость потребностей пользователей, а также оценки внутренних свойств компонента.

Выводы

1. В сложных экономических условиях, когда требуется воспроизведение различного рода программного обеспечения, использование расширяемых программных платформ с открытым исходным кодом наиболее эффективно. Это позволит ускорить процесс разработки при наименьших затратах.

2. Представленные практические результаты разработки системы управления фондом оценочных средств демонстрируют эффективность предлагаемой методологии быстрой разработки и позволяют предложить использовать ее как основу для разработки стандартного фреймворка.

3. Следует детально исследовать возможности расширяемых программных платформ с открытым исходным кодом для составления каталога перспектив – шаблонов выбора решения по известным характеристикам качества и контекста использования.

Литература

1. Форд Н., Парсонс Р., Куа П. Эволюционная архитектура. Поддержка непрерывных изменений. СПб.: Питер, 2019. – 272 с.
2. Wolfinger R. Plug-in architecture and design guidelines for customizable enterprise applications //Companion to the 23rd ACM SIGPLAN conference on Object-oriented programming systems languages and applications. 2008. p. 893-894.
3. Минакова О.В., Трубников И.В., Курипта О.В. Построение генератора программного кода для решения инженерных задач //Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. №. 3. С. 14-19.

4. Десятирикова Е.Н., Минакова О.В. Программное обеспечение мониторинга комплекса проектов студентов инженерных специальностей //Всероссийская научная конференция по проблемам управления в технических системах. СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет ЛЭТИ им. В.И. Ульянова (Ленина), 2021. Т. 1. С. 190-193.

5. Garlan D. Software architecture: a roadmap. The Future of Software Engineering 2000, Proceedings 22nd International Conference on Software Engineering, ACM Press 2000.

6. Experience with Performing Architecture Tradeoff Analysis/ R. Kazman, M. Barbacci, at all// Proc ICSE '99. 1999. pp. 54-63.

7. Clements P., Kazman R., Klein M. Evaluating Software Architectures: Methods and Case Studies, Addison Wesley, 2001

8. Documenting Software Architectures: Views and Beyond/ P. Clements, F. Bachmann, at all. Addison Wesley, 2002

9. Kruchten P. The 4+1 View Model of Software Architecture. IEEE Software (Nov. 1995): 42-50

10. Brown S. The C4 model for software architecture //The C4 Model, verkkosivu. URL: <https://www.infoq.com/articles/C4-architecture-model> (дата проверки 07.06.2022). 2018.

11. Бойцов Б.В., Минакова О.В., Поцбенева И.В. Архитектурный подход к созданию программного инструментария для работы с оценочными средствами информационной системы по параметрам качества //Качество и жизнь, 2022. №(1). С. 23-30.

12. Rozanski N., Woods E. Software systems architecture: working with stakeholders using viewpoints and perspectives. Addison-Wesley, 2012.

13. А.с. №2022619134. Модуль управления версиями тестовых заданий gift-формата для Visual Studio Code/ О.В. Минакова, К.К. Петров. 19.05.2022

14. А.с. №2022619134. Модуль навигации по банку тестовых заданий для Visual Studio Code/ Н.В. Акамсина, К.К. Петров. 19.05.2022

15. Инструментарий по работе с банком тестовых заданий. URL: <https://github.com/olgmina/MentorTools/tree/main/BankTest> (дата проверки 07.06.2022) - 2022

Поступила 16.06.2022; принята к публикации 17.08.2022

Информация об авторах

Минакова Ольга Владимировна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: olgmina@gmail.com

Акамсина Надежда Валериевна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: akamsina@vgasu.vrn.ru

Курипта Оксана Валериевна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kuripta-okcana@mail.ru

DEVELOPMENT OF SOFTWARE TOOLS BASED ON EXPANDABLE OPEN SOURCE PLATFORMS

O.V. Minakova, N.V. Akamsina, O.V. Kuripta

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article presents an analysis of well-known architectural approaches and architecture analysis models for the purpose of rapid development of applications on a ready-made technological platform. We used the selected methods to design a management system for the fund of appraisal funds, as an example of a software tool for professional activities. We ana-

lyzed in detail the sequence of stages in the development of a software system based on the architectural approach. For the implementation, we justified the choice of the microkernel architecture of the widespread technological platform Visual Studio Code with open source code and a set of standard extensions. We designed the architecture for the core functionality - text editing and interoperability with LMS and perspectives - prevalence, usability and modifiability. We present a description of the implementation of the necessary extensions, in particular, navigation through the bank of test items. The conducted research allowed us to propose a methodology for the rapid development of software tools based on extensible platforms based on an architectural approach. We present the description of the technology in the paper for discussion. Since the rapid development of new software tools is necessary in modern conditions, research on the possibilities of using extensible platforms, standardizing approaches to using open source code, and designing patterns is vital. We proposed possible solutions to these key tasks in the work on the example of special software tools

Key words: software development, gift-file, microkernel architecture, implementation of extensions, open source

References

1. Ford N., Parsons R., Kua P. "Building evolutionary architectures: support constant change", O'Reilly Media, Inc., 2019, 272 p.
2. Wolfinger R. "Plug-in architecture and design guidelines for customizable enterprise applications", *Companion to the 23rd ACM SIGPLAN Conf. on Object-oriented Programming Systems Languages and Applications*, 2008, pp. 893-894.
3. Trubnikov I.V., Minakova O.V., Kuripta O.V. "Building a program code generator for solving engineering problems", *2019 Int. Multi-Conf. on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. IEEE, 2019.
4. Desyatirikova E.N., Minakova O.V. "Monitoring software for project based learning tasks", *2021 IV Int. Conf. on Control in Technical Systems (CTS)*. IEEE, 2021, pp. 154-157.
5. Garlan D. "Software architecture: a roadmap", *Proc. 22nd Int. Conf. on Software Engineering: The Future of Software Engineering 2000*, ACM Press 2000.
6. Kazman R., Barbacci M. et al. "Experience with performing architecture tradeoff analysis", *Proc ICSE '99*, May 1999, pp. 54-63.
7. Clements P., Kazman R., Klein M. "Evaluating Software Architectures: Methods and Case Studies", Addison Wesley, 2001
8. Clements P., Bachmann F. et al. "Documenting Software Architectures: Views and Beyond", Addison Wesley, 2002
9. Kruchten P. "The 4+1 View Model of Software Architecture", *IEEE Software*, Nov. 1995, pp. 42-50
10. Brown S. "The C4 model for software architecture", The C4 Model, available at: <https://www.infoq.com/articles/C4-architecture-model>, 2018. (date of access 07.06.2022)
11. Boytsov B.V., Minakova O.V., Potsebneva I.V. "An architectural approach to the creation of software tools for working with evaluation tools of an information system in terms of quality parameters", *Quality and Life*, 2022, no. 1, pp. 23-30.
12. Rozanski N., Woods E. "Software Systems Architecture: Working with Stakeholders Using Viewpoints and Perspectives", Addison Wesley, 2012.
13. Minakova O.V., Petrov K.K. "Version control module for gift-format test tasks for Visual Studio Code" ("Modul' upravleniya versiyami testovykh zadaniy gift-formata dlya Visual Studio Code"), Certificate of state registration of the computer program No. 2022619134 dated May 19, 2022
14. Akamsina N.V., Petrov K.K. "Test bank navigation module for Visual Studio Code" ("Modul' navigatsii po banku testovykh zadaniy dlya Visual Studio Code"), Certificate of state registration of the computer program No. 2022619134 dated May 19, 2022.
15. Test bank toolkit, available at: <https://github.com/olgmima/MentorTools/tree/main/BankTest> (date of access 06/07/2022)

Submitted 16.06.2022; revised 17.08.2022

Information about the authors

Ol'ga V. Minakova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: olgmima@gmail.com
Nadezhda V. Akamsina, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: akamsina@vgasu.vrn.ru
Oksana V. Kuripta, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya Str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kuripta-okcana@mail.ru

ОСНОВНЫЕ ЭТАПЫ ЭВОЛЮЦИОННОГО ЧИСЛЕННОГО МЕТОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МНОГОСТАДИЙНОЙ СТОХАСТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

С.А. Олейникова, И.А. Селищев, Д.А. Тюников

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: объектом исследования является многостадийная система, отличительная особенность которой заключается в случайной длительности последовательно-параллельных работ, которая зависит не только от случайных факторов, но и от выбора исполнителя. Таким образом, необходимо одновременно решить две задачи: задачу о назначениях, заключающуюся в определении зависимости между работами и специалистами, и задачу планирования, позволяющую назначить оптимальное время начала каждой работе. Для каждого класса этих задач существуют свои методы, однако они неприменимы для случая, когда данные задачи необходимо решать одновременно. В связи с этим требуется разработка собственных методов, отличительной особенностью которых является возможность получения комплексного решения двух задач. Анализ возможных подходов к решению исследуемой задачи позволил остановиться на эволюционных алгоритмах для ее решения. В частности, экспериментальные исследования показали, что генетические алгоритмы являются достаточно эффективными для случаев, когда классические методы не применимы. Однако для получения близких к оптимальным решений необходимо разработать такие этапы, как скрещивание и мутация с учетом всех особенностей решаемой задачи. Именно этим вопросам будет посвящена данная работа. Научная новизна заключается в разработке подхода к скрещиванию, основанного на одноточечном кроссинговере и обеспечивающего возможность доопределения времени начала и окончания в хромосоме потомка с учетом графика занятости специалистов, а также мутации, позволяющей случайным образом менять гены исполнителя, начиная со случайно выбранной работы и доопределять гены начала и окончания работ. Практическая значимость заключается в возможности использования разработанных алгоритмов для любых многостадийных систем, требующих определения графика выполнения работ и закрепления за ними специалистов.

Ключевые слова: генетический алгоритм, скрещивание, мутация, сетевое планирование, задача о назначениях

Введение

Рассматривается задача формирования план-графика для системы, предназначенной для выполнения множества последовательно-параллельных работ. Длительность каждой отдельной операции является случайной величиной, которая зависит, кроме различных случайных факторов, также от исполнителя. Кроме того, выполнение работы может потребовать одного или нескольких «типов» ресурсов (специалистов, оборудования и т.д.). В зависимости от выбора ресурса (исполнителя, материалов и т.д.) работа может быть выполнена с разной степенью эффективности и за разное время. Завершение обслуживания заявки приносит определенный объем прибыли, которая зависит от качества выполнения работы, наличия или отсутствия штрафных санкций и т.д. Необходимо для каждой поступающей заявки подобрать такой график обслуживания и такие ресурсы для каждой работы, чтобы итоговая прибыль была бы максимальной.

Данная задача одновременно относится к двум классам задач: задаче о назначениях и задаче сетевого планирования и управления. Задача о назначениях позволяет поставить соответствие между исполнителями и выполняемыми ими работами с точки зрения некоторого критерия. Классический вариант предполагает одинаковое число работ и исполнителей и отсутствие какой-либо взаимной зависимости между работами. Исследуемая задача сложнее, поскольку исполнитель, выполняя некоторую работу в данный момент времени, не может одновременно выполнять другую работу, но освободившись, опять может быть закреплен за каким-либо заданием. Существующие алгоритмы (Венгерский метод и другие методы линейного программирования) не учитывают такую специфическую особенность.

Задача определения времени начала работ может быть решена методом критического пути или методом PERT [1]. Однако их использование предполагает заранее известную информацию о длительности выполнения каждой работы, что невозможно без решения задачи о назначениях.

Таким образом, задачу о назначениях и задачу сетевого планирования и управления необходимо решать одновременно на каждой итерации. На такую особенность исследуемой задачи ни один из существующих подходов ни ориентирован. В связи с этим необходима разработка собственного метода ее решения.

Особенности задачи и обзор методов ее решения

Рассмотрим более подробно следующую задачу. Пусть имеется некоторый проект, включающий в себя множество последовательно-параллельных работ, каждая из которых характеризуется случайной длительностью. Пусть данная случайная величина зависит не только от внешних факторов, но и от исполнителя, которого назначают на выполнение данной работы. Иными словами, имеется множество взаимно-зависимых работ, окончательную длительность которых можно определить, лишь назначив им определенных исполнителей.

Необходимо сформировать график выполнения работ и назначить им исполнителей таким образом, чтобы минимизировать общее время выполнения всего проекта.

Проанализируем специфику данной задачи. Определение времени начала взаимно-зависимых работ относится к задачам сетевого планирования и управления или управления проектами [2]. В частности, существуют формулы метода СМР, позволяющие определить раннее начало каждой из взаимно-зависимых работ, затем оценить длительность всего проекта, а в завершении оценить длительность позднего начала работ. Это позволяет для каждой работы установить временной резерв и выделить среди всего множества работ, так называемые, критические работы, сдвиг начала выполнения которых приведет к увеличению срока выполнения всего проекта. Формулы метода СРМ представлены в [1, 2, 3].

Однако для данной задачи они не могут быть применены в связи с тем, что длительность выполнения каждой работы и, как следствие, время ее завершения будут зависеть от выбранного для этой работы исполнителя. В связи с этим, рассмотрим задачу соответствия между определенным множеством работ и исполнителями. Эта задача в классическом варианте является задачей о назначениях. Классический вариант подразумевает множество работ и множество (такой же мощности) испол-

нителей, между которыми необходимо установить соответствие с точки зрения некоторого критерия. Для такой задачи разработан Венгерский метод, который, отличаясь небольшой вычислительной сложностью, позволяет получить оптимальное решение [4].

Рассматриваемая задача назначения работ исполнителям сложнее, поскольку:

- количество исполнителей и работ в общем случае не совпадает;
- задача является многостадийной, и к началу данного этапа определен исполнитель может быть занят выполнением других работ, однако через некоторое время он может освободиться.

Таким образом, очевидно, что существующие методы не могут быть применены к решению поставленной задачи. В связи с этим, требуется либо разработка алгоритма, разработанного на базе их синтеза, либо реализация совершенно другого подхода к ее решению.

В данной работе предложена попытка решения задачи с помощью эволюционных алгоритмов. В частности, в случаях, когда классические методы дискретной оптимизации по той или иной причине невозможно применить к исследуемым задачам, можно использовать подходы, отличающиеся достаточно быстрой сходимостью и обеспечивающие возможность получения решения, близкого к оптимальному. Ярким примером эволюционных методов являются генетические алгоритмы [5]. По аналогии с такими этапами развития популяции людей, как скрещивание, мутация и, как следствие, получение нового поколения, генетические алгоритмы позволяют на каждом шаге получать особи, отличающиеся улучшенными значениями целевой функции (поскольку особи с худшими значениями к следующей популяции будут отброшены). Как только в течение нескольких поколений улучшения целевой функции не происходит, алгоритм заканчивает свою работу.

Общий алгоритм решения задачи

Исходя из специфики имеющейся задачи, разработаем основные этапы генетического алгоритма для ее решения. Под хромосомой будем понимать множество генов, каждый из которых хранит информацию об отдельной работе (идентификатор работы, идентификатор назначенного для ее исполнения специалиста, время начала и время окончания).

Таблица 1

Пример гена для решаемой задачи

Идентификатор работы	Исполнитель	Время начала	Время окончания
1-2	3	0	4

Определив, таким образом, гены, получим хромосому, представляющую собой полную информацию о времени начала всех работ и их исполнителей. Эта хромосома может выглядеть, например, следующим образом (табл. 2).

Таблица 2

Пример хромосомы

Идентификатор работы	Исполнитель	Время начала	Время окончания
1-2	3	0	4
1-3	2	0	6
1-4	1	0	8
2-5	4	6	12
2-6	5	4	8
3-5	4	6	11
3-6	1	6	15
3-7	2	6	12
4-6	5	8	16
4-7	3	11	18
5-8	4	11	14
6-8	1	16	24
7-8	5	18	25

Общий генетический алгоритм решения данной задачи был представлен в [6]. Выделим следующие его этапы:

- формирование начальной популяции;
- пока не завершится работа алгоритма в цикле:
 - выполнить операцию скрещивания;
 - выполнить операцию мутации;
- отобрать особей для следующего поколения.

В [6] также был представлен алгоритм формирования начальной популяции. Разработаем операцию скрещивания и мутации, исходя из специфических особенностей хромосомы.

Операция скрещивания

Для выполнения операции скрещивания необходимо выбрать родителей и разработать специфику обмена генами между родителями для получения потомков [7].

Родителей будем выбирать случайным образом. Обмен генами будем производить с помощью одноточечного кроссовера, делящего хромосому ориентировочно пополам (если в

хромосоме нечетное число генов N, то первому потомку достанутся $[N/2]+1$ генов от родителя 1 и $[N/2]$ генов от родителя 2, а второму потомку - наоборот). Таким образом, будем разбивать массив хромосомой точкой K:

$$K = \begin{cases} N/2, & N \text{ четное} \\ N/2 + 1, & N \text{ нечетное} \end{cases} \quad (1)$$

Опишем схему обмена генами. Наиболее простым вариантом является полный обмен всеми генами между родителями при операции скрещивания. Иллюстрация данного вида кроссовера приведена на рис. 1.

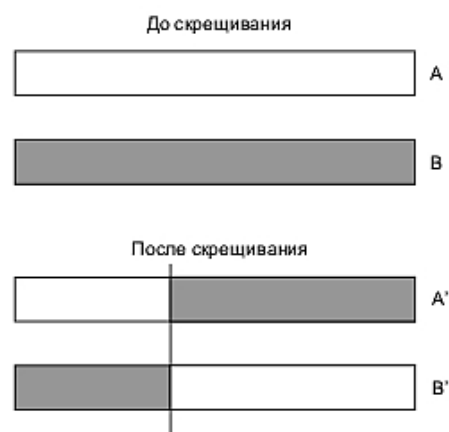


Рис. 1. Иллюстрация одноточечного кроссовера

Однако в данной задаче полный обмен генами невозможен, поскольку время выполнения данной работы данным исполнителем будет зависеть от следующих факторов:

- времени начала данной работы;
- времени, когда данный исполнитель освободится от выполнения других работ.

Поскольку работы связаны зависимостью типа «финиш»-«старт», время начала работы (без учета исполнителя) будет зависеть от времени завершения всех непосредственно предшествующих ей работ. Поэтому при операции скрещивания вторая часть хромосомы должна быть заполнена следующим образом. После назначения исполнителей всем работам необходимо с учетом указанных ранее факторов определить возможное время начала каждой работы и ее длительность. Таким образом, алгоритм скрещивания будет следующим.

Шаг 1. В цикле пока не получено заданное количество потомков.

Шаг 2.1. Выбрать случайным образом двух претендентов на родителей.

Шаг 2.2. Разделить массив, описывающий хромосому, точкой K.

Шаг 2.3. Скопировать в первого потомка все элементы от родителя 1 для элемента K включительно.

Шаг 2.4. Скопировать в первого потомка идентификаторы исполнителей в элементы, начиная от номера $K+1$ до N включительно.

Шаг 2.5. В цикле по i от $K+1$ до N .

Шаг 2.5.1. Оценить время начала работы i

Шаг 2.5.2. Оценить время окончания работы i .

Таким образом, разработан алгоритм скрещивания. Он состоит из двух этапов. На первом этапе происходит стандартный обмен генами между двумя родительскими хромосомами за исключением того, что второй родитель передает информацию лишь об исполнителях (поскольку начало работы, которую будет выполнять данный исполнитель, может быть задержано из-за того, что согласно первой части хромосомы, он занят выполнением некоторой другой работы). На втором этапе происходит доопределение второй части потомка, исходя из занятости исполнителей и ограничения работ на взаимную зависимость.

Операция мутации

В первую очередь, оператор мутации в генетических алгоритмах необходим для защиты от схождения решений к некоторому локальному экстремуму. Кроме того, при достаточно небольшом числе особей на каждом шаге будут получаться однотипные потомки, с помощью которых в принципе невозможно будет получить наилучший результат. В связи с этим, замена отдельных генов позволяет получить новую особь, отличающуюся некоторыми генами, которые отсутствуют у родителей, и которая как сама может выступать в роли более качественного решения, так и потомки, созданные на ее основе, могут отличаться наилучшими значениями фитнес-функции. Мутация всегда должна носить некоторый вероятностный характер, чтобы в поколении потомков были особи с уникальным набором генов.

Предложим следующий алгоритм мутации.

Шаг 1. Выбираем случайным образом номер гена L , начиная с которого будут вноситься изменения в хромосому.

Шаг 2. В цикле по i от L до N .

Шаг 2.1. С помощью некоторого вероятностного распределения выбираем исполнителя для работы i .

Шаг 2.2. С учетом длительности выполнения работы i данным исполнителем выбираем время ее окончания.

Как видно из данного алгоритма, мутация одного гена изменит большинство последующих генов, потому что:

- исполнитель, которого выбрали для выполнения данной работы, может быть назначен для выполнения некоторой другой работы, пересекающейся по времени с текущей работой, что приведет к невозможности выполнения второй работы в заданный срок;

- поскольку изменение исполнителя для работы автоматически меняет ее длительность, может измениться время начала всех непосредственно следующих за данной работой других работ.

В связи с этим, необходимо изменить гены, соответствующие всем работам, которые будут следовать за выбранной работой. В частности, как отмечено в шаге 2.2 алгоритма, будут вноситься изменения в ген, отвечающий за время окончания работы.

Пример реализации описанных этапов алгоритма

Рассмотрим действие каждого из предложенных этапов генетического алгоритма на следующем примере. Пусть, без ограничения общности, имеется граф, представленный на рис. 2.

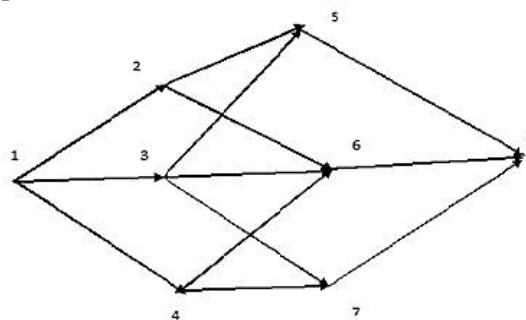


Рис. 2. Граф проекта

Пусть задана матрица, описывающая длительность выполнения каждой работы каждым из сотрудников.

Таблица 3

Длительность выполнения работ сотрудниками

Раб/исп	1	2	3	4	5
1-2	4	5	6	7	6
1-3	7	6	5	5	6
1-4	8	8	7	6	7
2-5	4	5	7	6	5
2-6	5	5	6	7	4

Продолжение табл. 3

3-5	7	7	6	5	5
3-6	9	8	7	8	7
3-7	7	6	5	4	6
4-6	8	8	7	9	8
4-7	6	6	7	7	5
5-8	5	4	4	3	5
6-8	8	8	7	4	4
7-8	7	6	5	6	7

В данной таблице по строкам отложены работы; по столбцам – исполнители. В ячейках указано время, требующееся данному исполнителю для выполнения данной работы.

Предположим, на этапе формирования начальной популяции сформировано N особей. Выделим две из них для скрещивания. Пусть особь 1 задана следующим набором генов (табл. 4).

Таблица 4

Особь 1

Раб/исп	исп	вр.нач	вр.ок.
1-2	3	0	6
1-3	5	0	6
1-4	2	0	8
2-5	4	6	12
2-6	1	6	11
3-5	5	6	11
3-6	2	6	14
3-7	3	6	11
4-6	4	12	21
4-7	3	11	18
5-8	2	14	18
6-8	1	21	29
7-8	5	18	25

Значение фитнес-функции для данной хромосомы равно 29.

Пусть вторая хромосома представлена следующим набором генов (табл. 5).

Таблица 5

Особь 2

Раб/исп	исп	вр.нач	вр.ок.
1-2	2	0	5
1-3	4	0	5
1-4	1	0	8
2-5	3	5	12
2-6	1	8	13
3-5	5	5	10
3-6	2	5	13
3-7	3	12	17
4-6	4	8	17
4-7	1	8	14
5-8	5	12	17
6-8	2	17	25
7-8	5	17	24

Значение фитнес-функции для данной хромосомы равно 25.

Выполним операцию скрещивания. Выпишем первую часть нового потомка. Она будет выглядеть следующим образом (табл. 6).

Таблица 6

Фрагмент первого потомка

Раб/исп	исп	вр.нач	вр.ок.
1-2	3	0	6
1-3	5	0	6
1-4	2	0	8
2-5	4	6	12
2-6	1	6	11
3-5	5	6	11
3-6	2	6	14

Для окончательного формирования потомка сначала запишем в столбец «исполнители» исполнителей из второй особи, а затем определим время, исходя из данного выбора. В результате получим следующего потомка.

Таблица 7

Потомок 1

Раб/исп	исп	вр.нач	вр.ок.
1-2	3	0	6
1-3	5	0	6
1-4	2	0	8
2-5	4	6	12
2-6	1	6	11
3-5	5	6	11
3-6	2	6	14
3-7	3	6	11
4-6	4	12	21
4-7	1	11	17
5-8	5	12	17
6-8	2	21	29
7-8	5	17	24

Значение фитнес-функции для первого потомка также равно 29.

Теперь выполним процедуру мутации. Выберем произвольным образом работу. Пусть это будет работа 4-6. В данный момент ее выполняет исполнитель 1. Выберем любого другого исполнителя (случайное число от 1 до 5, за исключением 4). Пусть это будет 3. Заменяем значение исполнителя в соответствующей ячейке на 3 и пересчитаем время завершения работы. После этого пересчитаем времена для всех последующих работ (в частности, для всех работ, которые позже будет выполнять исполнитель 3, или тех работ, которые являются взаимно-зависимыми с работой 4-6). Получим мутированную хромосому.

Таблица 8

Результат мутации			
Раб/исп	исп	вр.нач	вр.ок.
1-2	3	0	6
1-3	5	0	6
1-4	2	0	8
2-5	4	6	12
2-6	1	6	11
3-5	5	6	11
3-6	2	6	14
3-7	3	6	11
4-6	3	11	19
4-7	1	11	17
5-8	5	12	17
6-8	2	19	27
7-8	5	17	24

Значение фитнес-функции для модифицированного потомка равно 27.

Данный алгоритм был положен в основу работы программного средства, предназначенного для автоматизации процесса расчетов времени начала и окончания каждой из взаимно-зависимых работ и закрепления за ними исполнителей. Фрагмент результирующей формы с расчетами по исходным данным из табл. 3 приведен на рис. 3.

Таким образом, на основании данных алгоритмов было реализовано программное средство, автоматизирующее процесс расчетов характеристик работ и их исполнителей. Как видно из рис. 3, оно позволяет по исходным данным получить наилучшего исполнителя для каждой работы и, в соответствии с выбранным индивидуумом, определить время окончания.

ID	Работа	Исполнитель	Время начала	Время окончания
1	1-2	1	0	4
2	1-3	2	0	6
3	1-4	4	0	6
4	2-5	3	4	11
5	2-6	5	4	8
6	3-5	4	6	11
7	3-6	1	6	15
8	3-7	2	6	12
9	4-6	5	8	16

Критическое время:

Рис. 3. Результаты работы приложения

Выводы

Целью работы являлась разработка алгоритма для решения задачи определения времени начала каждой из взаимно-зависимых работ и назначения им исполнителя. Предложенный подход основывался на использовании генетических алгоритмов. Получены следующие результаты, отличающиеся научной новизной.

1. Предложен двухэтапный подход для скрещивания, отличающийся дополнением в особи-потомке генетической информации, соответствующей не только генам каждого родителя, но и взятой от взаимной зависимости работ и занятости исполнителей.

2. Предложен алгоритм мутации, изменяющий, начиная с некоторого номера, случайным образом исполнителя и корректирующий в соответствии с новым работником все последующие гены (время начала и время окончания работ).

3. Реализовано программное средство, автоматизирующее процесс работы разработанных алгоритмов.

Также приведены примеры работы каждого из этих этапов генетического алгоритма. В результате получен алгоритм решения задачи о назначении исполнителей и взаимной зависимости работ и определении их длительностей.

Литература

- Бурков В.Н., Новиков Д.А. Как управлять проектами. М.: Синтег, 1997. 188 с.
- Ковман А., Дебазей Г. Сетевые методы планирования и их применение. М.: Прогресс, 1968. 182с.
- Project Management ToolBox:Tools and Technics for the practicing Project Manager, 2nd Edition. New Jersey: John Willey& Sons. 2016. 460 p.
- Корбут А.А., Финкельштейн Ю.Ю. Дискретное программирование / под ред. Д.Б. Юдина. М.: Наука, 1969. 368 с.
- Dorigo M., Gambardella L.M. Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem// IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 1997. Vol. 1. No. 1. pp. 53-66. DOI: 10.1109/4235.585892.
- The general scheme of the genetic algorithm for solving the task scheduling problem for a multistage system and assigning time for jobs / S.A. Oleinikova, O.Ja. Kravets, I.A. Aksenov, O.Yu. Frantsisko, P.A. Rahman, I.V. Atlasov // International Journal on Information Technologies & Security. 2021. № 4 (vol. 13). pp. 47-58.
- Курейчик В.В. Эволюционные методы решения оптимизационных задач. Таганрог: ТГПУ, 1999. 95 с.

Информация об авторах

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

Селищев Иван Алексеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: selishcheviv@gmail.com

Тюников Дмитрий Алексеевич – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: tyunikov98@mail.ru

MAIN STAGES OF THE EVOLUTION OF NUMERICAL METHOD FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF A MULTI-STAGE STOCHASTIC SYSTEM

S.A. Oleynikova, I.A. Selishchev, D.A. Tyunikov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the object of research is a multi-stage system, the distinctive feature of which is the random duration of series-parallel work, which depends not only on random factors but also on the choice of the performer. Thus, it is necessary to solve two problems simultaneously: the assignment problem, which consists in determining the relationship between jobs and specialists, and the planning problem, which allows you to assign the optimal start time for each job. Each class of these tasks has its own methods, however, they are not applicable to the case when these tasks must be solved simultaneously. In this regard, we developed our own methods, a distinctive feature of which is the possibility of obtaining a comprehensive solution of two problems. An analysis of possible approaches to solving the problem under study made it possible to dwell on evolutionary algorithms for solving it. In particular, experimental studies have shown that genetic algorithms are quite efficient for cases where classical methods are not applicable. However, in order to obtain solutions, close to optimal, it is necessary to develop such stages as crossing and mutation, taking into account all the features of the problem being solved. It is these questions that this work will be devoted to. The scientific novelty lies in the development of an approach to crossing based on a single-point crossing over and providing the possibility of redefining the start and end times in the offspring chromosome, taking into account the employment schedule of specialists, as well as a mutation that allows you to randomly change the genes of the performer, starting from a randomly selected job and redefine the start genes and completion of work. The practical significance lies in the possibility of using the developed algorithms for any multi-stage systems that require the definition of a work schedule and the assignment of specialists to them

Key words: genetic algorithm, crossover, mutation, network planning, assignment problem

References

1. Burkov V.N., Novikov D.A. "How to manage projects" ("Kak upravlyat' proektami"), Moscow, Sinteg, 1997, 188 p.
2. Koffman A., Debazey G. "Network planning methods and its applications" ("Setevye metody planirovaniya i ikh primeneniye"), Moscow, Progress, 1968, 182 p.
3. "Project Management ToolBox: Tools and Technics for the practicing Project Manager", New Jersey: John Willey& Sons, 2016, 460 p.
4. Korbut A.A., Finkelshtein Yu.Yu. "Discrete programming" ("Diskretnoe programmirovaniye"), Moscow, Nauka, 1969, 368 p.
5. Dorigo M., Gambardella L.M. "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, April 1997, vol. 1, no. 1, pp. 53-66, doi: 10.1109/4235.585892.
6. Oleinikova S.A., Kravets O.Ja., Aksenov I.A., Frantsisko O.Yu., Rahman P.A., Atlasov I.V. "The general scheme of the genetic algorithm for solving the task scheduling problem for a multistage system and assigning time for jobs", *Int. J. on Information Technologies & Security*, 2021, vol. 13, no. 4, pp. 47-58.
7. Kureychik V.V. "Evolutionary methods for solving optimization problems" ("Evolutsionnye metody resheniya optimizatsionnyh zadach"), Taganrog: TGRU, 1999, 95 p.

Submitted 30.05.2022; revised 17.08.2022

Information about the authors

Svetlana A. Oleynikova, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 324006, Russia), e-mail: s.a.oleynikova@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0333-2313>

Ivan A. Selishchev, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 324006, Russia), e-mail: selishcheviv@gmail.com

Dmitriy A. Tyunikov, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 324006, Russia) e-mail: tyunikov98@mail.ru

РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПРОЦЕССОМ СУШКИ ЖОМА САХАРНОЙ СВЕКЛЫ В СУШИЛКЕ БАРАБАННОГО ТИПА

И.А. Болдырев, А.В. Любимов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: история развития промышленных регуляторов неразрывно связана с развитием техники и технологий. Изначально регуляторы создавались как исключительно механические системы. Реализация механических регуляторов была ограничена возможностями механики того времени. В качестве примера можно привести регулятор Уатта, который стал символом второй промышленной революции. Уравнения Вышнеградского, описывающие работу регулятора Уатта, по праву считаются фундаментом такой науки, как теория автоматического управления. Изобретение электронных ламп позволило создавать первые регуляторы на электронной платформе. Затем последовали транзисторные регуляторы, а за ними регуляторы на операционных усилителях. Все приведенные выше платформы аппаратной реализации регуляторов подразумевают, что логика принятых ими решений заложена в них на стадии их проектирования и в последующем возможна лишь подстроечная регулировка. Современные регуляторы реализованы на цифровой платформе, которая даёт безграничную возможность реализации алгоритмов управления без изменения схемотехнических решений аппаратной платформы, т.к. реализация алгоритмов закладывается на уровне кода программы. На сегодняшний день реализация программных алгоритмов управления очень часто попадает в руки специалистов, которых можно отнести, скорее, к программистам, чем к специалистам в теории управления. В связи с этим реализация программных алгоритмов ограничена комбинациями из П.И.Д. звеньев с учетом весовых коэффициентов, играющих роль подстроечных параметров. Таким образом, безграничные возможности реализации алгоритмов управления на современной программно-аппаратной платформе ограничены лишь квалификацией специалистов. Приведен синтез регулятора для управления влагосодержанием в технологическом процессе сушки жома сахарной свеклы на основе метода Q-параметризации. Код для реализации данного регулятора в контроллере представлен на языке ST в среде разработки CoDeSys 2.3. Данную работу можно считать примером использования последних достижений ТАУ при реализации алгоритмов управления для промышленных объектов управления на базе современных программно-аппаратных комплексов

Ключевые слова: САУ-система автоматического управления жомосушилкой, Q-параметризация, упредитель Смита

Введение

В сушилках сахарной промышленности осуществляются сложные, ответственные технологические процессы, связанные с сушением жома отработанной сахарной свеклы.

Значительное число отечественных предприятий испытывают острую необходимость в модернизации систем контроля и управления сушильного технологического оборудования.

Описание технологического процесса сушки жома

Рассмотрим общую схему технологического процесса сушки жома. Во вращающийся барабан дозатором из бункера подается влажный материал, где он постепенно перемещается вдоль по уклону барабана. В том же направлении в барабан поступает сушильный агент - горячий воздух, нагреваемый в топке за счет сжигания топливного газа [2]. Материал

нагревается и содержащаяся в нем влага испаряется. Выделяющиеся водяные пары удаляются из сушилки вместе с отработанным газом. Высушенный материал разгружается в конце барабана в бункер.

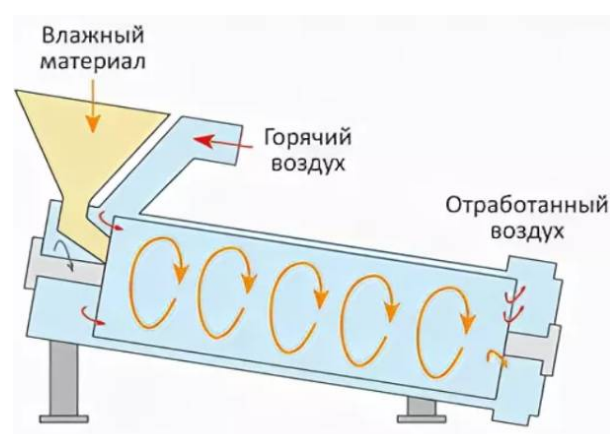


Рис. 1. Технологический процесс сушки жома

Общая схема автоматизации процесса сушки жома

Рассмотрим каскадную схему управления жомосушкой. Регулятор влагосодержания выходящего из жомосушки жома достигает требуемого содержания влаги путем корректировки температуры газа на входе жомосушки и занимает в каскадной схеме наивысшую позицию. Регулятор температуры газа на входе жомосушки по расходу воздуха на горелку является следующим подчинённым уровнем управления жомосушкой. И самым нижним уровнем управления технологическим режимом сушки жома является регулятор расхода воздуха на горелку и ведомый по датчику расхода воздуха, с учётом коэффициента соотношения, регулятор расхода газа на горелку [1].

Влагосодержание измеряется косвенным путем через разность температур на входе и выходе жомосушки.

В сравнении с контуром управления влагосодержания жома по температуре на входе жомосушки, процессы управления расходом газа и воздуха можно считать безынерционными. Процесс управления температурой на входе жомосушки по расходу воздуха на горелку занимает 3-4 секунды и поэтому считается малоинерционным, тогда как инерционность сушки жома в жомосушке измеряется величиной в 10 минут, а транспортное запаздывание в 30 минут. С учетом вышесказанного, разработка регулятора влагосодержания жома по температуре на входе жомосушки является наиболее существенной, т.к. использование стандартных регуляторов, состоящих из ПИД звеньев и их комбинаций, весьма эффективно для безынерционных и инерционных процессов при сравнительно малом запаздывании или полном его отсутствии, но при наличии канала управления, где процесс запаздывания существенно превосходит инерционность, стандартные комбинации ПИД звеньев не дают нужного результата, а также при наличии существенного запаздывания, измеряемого в десятки минут, не позволит произвести в приемлемые сроки наладку стандартного регулятора путем настройки его коэффициентов на объекте управления, в связи с чем требуется применение методики структурно-параметрического синтеза регулятора, которая бы позволила получить алгоритм управления для объекта с существенным транспортным запаздыванием и аналитически рассчитать параметры регулятора по параметрам

объекта управления, без необходимости настройки регулятора непосредственно на объекте [6].

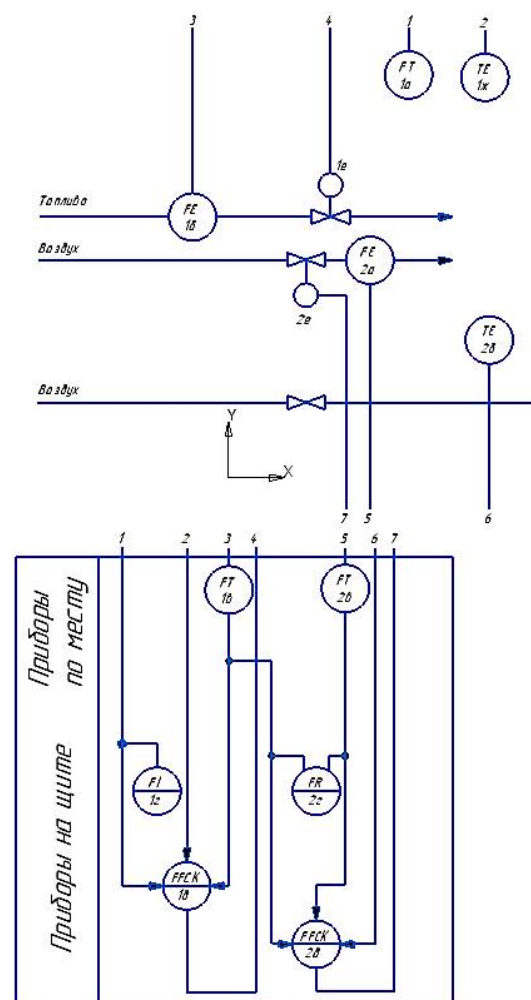


Рис. 2. Схема автоматизации

Применение метода Q-параметризации для синтеза алгоритма управления влагосодержанием жома в барабанной жомосушке

Рассмотрим структурно-параметрический метод синтеза системы автоматического управления, называемый методом Q-параметризации.

Основная идея этого метода заключается в том, чтобы, используя информацию о канале управления, заданную в виде передаточной функции $G_0(s)$, и информацию о желаемом поведении синтезируемой системы управления, заданную в виде передаточной функции $F(s)$, получить закон управления, связывающий регулируемую величину $Y(s)$ с задающим

воздействием $R(s)$, который будет иметь следующий вид [3, 4]:

$$Y(s) = [F(s)G_0^{inv}(s)G_0(s)]R(s). \quad (1)$$

А при выполнении условия $G_0^{inv}(s) = G_0^{-1}(s)$ выражение (1) вырождается в наилучший идеализированный случай:

$$Y(s) = [F(s)]R(s). \quad (2)$$

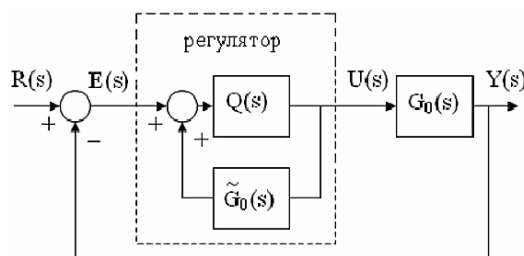


Рис. 3. Структурное представление метода Q-параметризации: $R(s)$ – сигнал задания; $U(s)$ – управляющий сигнал; $Y(s)$ – выход объекта управления (регулируемая величина); $E(s)$ – ошибка управления; $G_0(s)$ – эталонная модель объекта управления; $\tilde{G}_0(s)$ – номинальная модель объекта управления; $Q(s)$ – функция, определяющая вид параметризации

$$Q(s) = F(s)\tilde{G}_0^{inv}(s). \quad (3)$$

Жомосушилка, как объект управления по каналу «влажность жомы на выходе жомосушилки – температура газообразного теплоносителя на входе жомосушилки», представляет собой в динамическом смысле инерционное звено с транспортным запаздыванием [5]:

$$G_0(s) = \tilde{G}_0(s) = \frac{K_0}{T_0s + 1} \exp(-\tau s). \quad (4)$$

В соответствии с (4) и представленным на рис. 3 методом Q-параметризации, структура системы автоматического управления жомосушилкой, по упомянутому выше каналу, примет вид, изображенный на рис. 4, где при условии, что $F(s) = \frac{1}{As + 1}$ с учетом (3) и в соответствии с (4)

$$Q(s) = F(s)\tilde{G}_0^{inv}(s) = \frac{1}{As + 1} \frac{T_0s + 1}{K_0} = \frac{1}{K_0} \frac{T_0s + 1}{As + 1} \quad (5)$$

где $F(s) = \frac{1}{As + 1}$; $\tilde{G}_0^{inv}(s) = G_0^{inv}(s) = \frac{T_0s + 1}{K_0}$

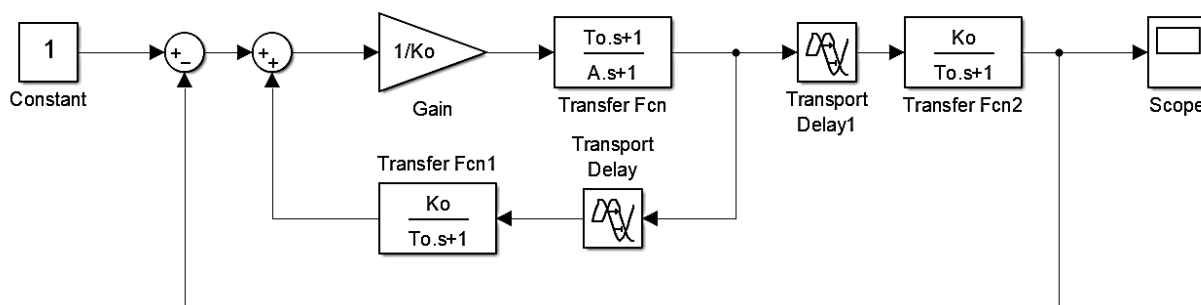


Рис. 4. Структура системы автоматического управления жомосушилкой по каналу «влажность жомы на выходе жомосушилки – температура газообразного теплоносителя на входе жомосушилки» в терминах интерфейса Simulink системы Matlab

Суть метода Q-параметризации, изображенного на рис. 3, лучше всего понять, осуществив серию упрощающих эквивалентных преобразований над его частным случаем, изображенным на рис. 4.

Вначале обратим внимание на то, что общая отрицательная обратная связь «запараллелена» внутренней по отношению к регулятору положительной обратной связью.

В этом случае при наличии идеализации $G_0(s) = \tilde{G}_0(s)$, которая означает, что эталонная и номинальная модели объекта управления друг другу эквивалентны, положительная и отрицательная обратные связи друг друга взаимонейтрализуют. И система, изображенная на рис. 4, упрощается до вида, изображенного на рис. 5.

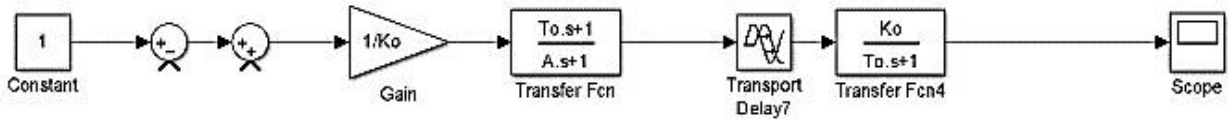


Рис. 5. Упрощенный вид системы, изображенной на рис. 4, после исключения из нее положительной и отрицательной обратных связей

В ходе дальнейших эквивалентных преобразований система, изображенная на рис. 5, примет окончательный упрощенный вид, изображенный на рис. 6, который соответствует (1):

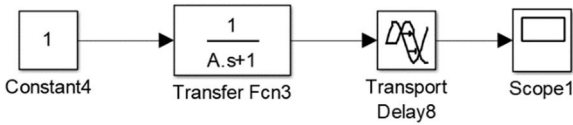


Рис. 6. Окончательный упрощенный вид системы, изображенной на рис. 4

На рис. 6 мы видим инерционное звено $F(s) = \frac{1}{As + 1}$ и звено транспортного запаздывания $\exp(-\tau s)$, которое, в соответствии с (1), было получено как результат произведения $G_0^{inv}(s)G_0(s) = \left(\frac{T_0s + 1}{K_0}\right)\left(\frac{K_0}{T_0s + 1}\exp(-\tau s)\right) = \exp(-\tau s)$ и стало результатом неидеальности $G_0^{inv}(s)$ по отношению к $G_0^{-1}(s)$, что привело к появлению звена транспортного запаздывания в структуре, изображенной на рис. 6.

Следует заметить, что для полной компенсации транспортного запаздывания $G_0^{inv}(s)$ должно было бы содержать в себе не реализуемое звено-предсказатель.

Инерционное звено $F(s) = \frac{1}{As + 1}$ определяет желаемый закон поведения регулируемой величины $Y(s)$ в зависимости от задающего воздействия $R(s)$, тогда как транспортное запаздывание $\exp(-\tau s)$ является нежелательной добавкой в случае решения задачи построения следящей задачи следящей системы, тогда как в случае программного управления величина запаздывания τ достаточно просто учитывается и упреждается, а в случае решения задачи стабилизации вообще не представляет никакой проблемы.

Далее, систему, изображенную на рис. 4, а точнее, ту часть, которая представляет собой регулятор, выразим через элементарные блоки, к которым относятся усилители (Gain), сумматоры (Sum), интегрирующие звенья (Integrator) и звено транспортного запаздывания (Transport Delay).

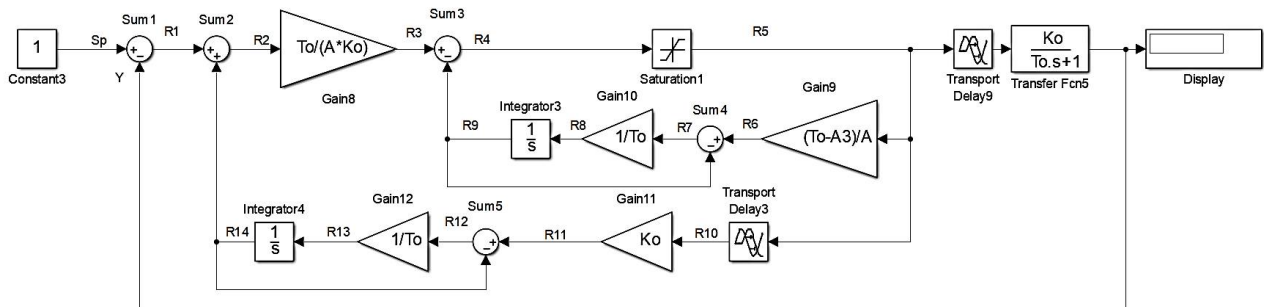


Рис. 7. Система автоматического управления, изображенная на рис. 4 с регулятором, представленным в виде элементарных блоков

В соответствии с математическими операциями, осуществляемыми элементарными блоками, изображенными на рис. 7, и с соблюдением последовательности этих операций был численно реализован на языке ST алгоритм управления жомосушилкой по каналу

«влажность содержания жомы на выходе жомосушилки – температура газообразного теплоносителя на входе жомосушилки». Текст данного алгоритма представлен ниже.

Реализация алгоритма управления влагосодержанием жома в барабанной жомосушилке на языке ST в среде разработки ПО ПЛК CoDeSys 2.3

$R13:=R12/T_0;$

$R14:=R14+R13*ddt$

Выводы

Перенесем предыдущий код в CoDeSys, он будет иметь следующий вид:

```
PROGRAM PLC_PRG
R1:=Sp-Y;
R2:=R1+R14;
R3:=R2*T0/(A*K0);
R4:=R3-R9;
R5:=R4;
IF (R4>Umax) THEN R5:=Umax;
(*Ограничитель*)
END_IF;
IF (R4<Umin) THEN R5:=Umin;
(*Ограничитель*)
END_IF;
R6:=R5*(T0-A)/A;
R7:=R6-R9;
R8:=R7/T0;
R9:=R9+R8*ddt;
i:=i+1; (*Счетчик*)
R10:=TD[i]; (*Блок запаздывания*)
TD[i]:=R5;
IF (i=N) THEN i:=1;
END_IF;
R11:=R10*K0;
R12:=R11-R14;
```

Подход, изложенный в данной статье, позволяет осуществить структурно параметрический синтез и численную реализацию алгоритма управления с применением математической модели канала управления и с учетом желаемого закона зависимости регулируемой величины от задающего воздействия.

Изложенный в работе теоретический материал был использован для практического решения задачи синтеза и реализации на языке ST алгоритма управления жомосушилкой по каналу «влажносодержание жома на выходе жомосушилки – температура газообразного теплоносителя на входе жомосушилки».

Решение подобной практической задачи с применением изложенной в работе методики позволяет значительно сократить время разработки и наладки систем автоматического управления для объекта со значительным транспортным запаздыванием, что, несомненно, подтверждает практическую значимость изложенного в работе теоретического материала.

Литература

1. Волошин З.С., Макаренко Л.Л., Янковский П.В. Автоматизация сахарного производства. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Агропромиздат, 1990. 271 с.
2. Сапронов А.Р. Технология сахарного производства. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Колос, 1999. 495 с.
3. Гудвин Г.К., Гребен С.Ф., Сальгадо М.Э. Проектирование систем управления. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2004. 911 с.
4. Суриков В.Н., Буйлов Г.П. Автоматизация технологических процессов и производств: учеб. пособие. СПб.: СПбГУПТД, 2011. 77 с.
5. Формирование каналов управления процессом комбинированной сушки свекловичного жома / А.В. Дранников, А.А. Шевцов, А.В. Квасов, А.Р. Бубнов // Автоматизация. Современные технологии. 2019. № 2. С. 69 – 73.
6. Hepbasli A. Exergoeconomic analysis of plum drying in a heat pump conveyor dryer // Drying Technology. 2010. Vol. 28. № 4. P. 1385-1395.

Поступила 26.05.2022; принята к публикации 16.08.2022

Информация об авторах

Болдырев Игорь Александрович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматики и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: boldyrev_igor@mail.ru, тел. 8(473)243-77-20

Любимов Андрей Владимирович – студент 4 курса факультета энергетики и систем управления, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8(920)443-51-70

DEVELOPMENT OF AN AUTOMATIC CONTROL SYSTEM FOR THE DRYING PROCESS OF SUGAR BEET PULP IN A DRUM-TYPE DRYER

I.A. Boldyrev, A.V. Lyubimov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the history of the development of industrial regulators is inextricably linked with the development of technology. Initially, regulators were created as exclusively mechanical systems. The implementation of mechanical regulators was limited by the possibilities of mechanics of that time. The Vyshnegradsky equations describing the operation of the Watt regulator are rightfully considered the foundation of such a science as the theory of automatic control. The invention of electronic lamps made it possible to create the first regulators on an electronic platform. This was followed by transistor regulators, and then regulators on operational amplifiers. All the above platforms for the hardware implementation of regulators imply that the logic of their decisions is embedded in them at the stage of their design and in the future only adjustment is possible. Modern regulators are implemented on a digital platform, which gives an unlimited opportunity to implement control algorithms without changing the circuit solutions of the hardware platform, since the implementation of algorithms is laid at the level of the program code. Such a democratic approach to the implementation of control algorithms has undoubted advantages, but also disadvantages, because previously created exclusively hardware regulators were designed by the corresponding research institutes and design bureaus, which included specialists of various profiles. To date, the implementation of software control algorithms very often falls into the hands of specialists who can be attributed more to programmers than to specialists in control theory. In this regard, the implementation of software algorithms is limited to combinations of P.I.D. links, taking into account the weight coefficients that play the role of tuning parameters. Thus, the limitless possibilities of implementing control algorithms on a modern hardware and software platform are limited only by the qualifications of specialists implementing regulators at control facilities. This paper presents the synthesis of a regulator for controlling moisture content in the technological process of drying sugar beet pulp based on the Q-parametrization method. The code for implementing this controller in the controller is presented in the ST language in the CoDeSys 2.3 development environment. This work can be considered an example of using the latest achievements of TAU in the implementation of control algorithms for industrial control facilities based on modern software and hardware complexes

Key words: ACS-automatic control system of the dryer beet pulp, Q-parameterization, Smith founder

References

1. Voloshin Z.S., Makarenko L.L., Yankovskiy P.V. "Automation of sugar production. 2nd ed., reprint. and additional" ("Avtomatizatsiya sakharnogo proizvodstva"), Moscow: Agropromizdat, 1990, 271 p.
2. Saponov A.R. "Technology of sugar production" ("Tekhnologiya sakharnogo proizvodstva"), Moscow: Kolos, 1999, 495 p.
3. Goodwin G.K., Grebe S.F., Salgado M.E. "Design of control systems", Moscow: BINOM, 2004, 911 p.
4. Surikov V.N., Buylov G.P. "Automation of technological processes and productions" ("Avtomatizatsiya tekhnologicheskikh protsessov i proizvodstv"), textbook, St. Petersburg: SPbGUPTD, 2011, 77 p.
5. Drannikov A.V., Shevtsov A.A., Kvasov A.V., Bubnov A.R. "Formation of control channels for the process of combined drying of beet pulp", *Automation. Modern technologies (Avtomatizatsiya. Sovremennye tekhnologii)*, 2019, no. 2, pp. 69-73.
6. Hepbasli A. "Exergoeconomical analysis of plum drying in a heat pump conveyor dryer", *Drying Technology*, 2010, vol. 28, no. 4, pp. 1385-1395

Submitted 26.05.2022; revised 16.08.2022

Information about the authors

Igor' A. Boldyrev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 324006, Russia), e-mail: boldyrev_igor@mail.ru, tel.: +7(473)243-77-20

Andrey V. Lyubimov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 324006, Russia), tel.: +7(920)443-51-70, e-mail: andrej.lyubimov2016@yandex.ru

Радиотехника и связь

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.4.011

УДК 621.396.67

ОДНОМОДОВОЕ ПРИБЛИЖЕНИЕ В ЗАДАЧЕ СИНТЕЗА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ АНТЕННЫ ВЫТЕКАЮЩЕЙ ВОЛНЫ

А.В. Останков¹, С.А. Останков², Г.В. Литвинов¹, С.Ю. Дашян³, Н.Н. Щетинин⁴

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

³Университет Лилля, Вильнёв-д'Аск, Франция

⁴Воронежский институт ФСИИ России, г. Воронеж, Россия

Аннотация: электродинамическое моделирование диэлектрической антенны вытекающей волны с дифракционной решёткой, содержащей большое число периодов с неоднородностями, занимает значительное время даже в современных коммерческих пакетах электромагнитного анализа. Оценку и оптимизацию показателей направленности таких антенн принято выполнять на основе численных проекционных моделей. Рассматривается авторская проекционная модель, полученная методом частичных областей и использующая описание поля в канавках гребенчатой решётки в виде ансамбля волноводных мод, число которых определяет точность моделирования и размерность итоговой системы линейных алгебраических уравнений. Приведены соотношения, позволяющие выполнить анализ основных показателей диэлектрической антенны, содержащей планарный диэлектрический волновод и проводящую гребенчатую решётку, в режиме излучения вертикально поляризованной радиоволны, включая случай одномодового приближения, при котором в канавках учитывается одна волноводная мода. На конкретных примерах для разных режимов излучения показана целесообразность одномодового приближения для экспресс-анализа и параметрического синтеза диэлектрической антенны. Установлено, что потеря точности при оценке основных энергетических показателей и показателей направленности антенны в режиме наклонного излучения является допустимой. Выяснено, что при переходе к одномодовому приближению оптимизируемый показатель диэлектрической антенны, как правило, наиболее устойчив по величине. Показано, что учёт в канавках решётки одной моды при числе элементов решётки от 30 и более гарантирует выигрыш по времени на порядок и более. Указывается, что одномодового приближения для анализа и синтеза антенны в режиме, близком к брегговской дифракции, следует избегать в связи с потерей точности

Ключевые слова: диэлектрическая антенна, гребенчатая решётка, канавка, одномодовое приближение, диаграмма направленности, показатели направленности

Благодарности: исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и НЦНИ в рамках научного проекта № 20-51-15001

Введение

Антенны вытекающей волны (АВВ), несмотря на давнюю историю их существования, относятся к перспективным излучающим системам коротковолновой части сантиметрового и миллиметрового диапазонов [1-2]. Связано это с несколькими причинами. Так, АВВ являются, как правило, низкопрофильными излучателями и обладают относительно простой конструкцией, способностью к электронному сканированию диаграммы направленности (ДН), высокими показателями направленности и энергетической эффективности. Среди возможных вариантов реализации, в том числе последних, существенно опирающихся на использование метаматериалов, по-прежнему конкуренто-

способны диэлектрические антенны вытекающей волны с периодическими дифракционными решетками разнообразных типов и форм [3-5]. Такие антенные решетки с последовательным типом питания способны обеспечивать узкий луч ДН карандашного или веерного типа, сравнительно малый уровень бокового излучения, а использование поверхностных волн и принципа дифракционного излучения – малые потери в распределительно-излучающей системе.

На рис. 1 приведена электродинамическая схема диэлектрической АВВ с дифракционной решеткой гребенчатого типа. Принцип работы подобных антенн в режиме излучения основан на преобразовании поверхностной волны диэлектрического волновода (ДВ, поз. 2), возбуждаемого в простейшем случае рупорно-линзовым устройством (поз. 1), в свободную волну с помощью периодической решетки (поз. 3) с шагом, соизмеримым с длиной волны. Поскольку,

как правило, излучение осуществляется на «минус» первой пространственной гармонике рассеянного решеткой поля, свободно излучаемая волна распространяется в сторону, обратную распространению поверхностной волны возбуждения [5, 6].

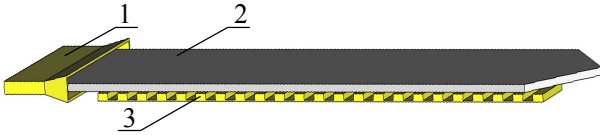


Рис. 1

Точный электродинамический расчёт диэлектрической антенны с дифракционной решеткой, содержащей большое число периодов – неоднородностей, занимает ощутимое время даже в современных коммерческих пакетах электромагнитного моделирования [6]. Именно поэтому предварительные оценки показателей направленности и их оптимизацию за счет подбора предпочтительных вариантов геометрии распределительно-излучающей системы АВВ принято выполнять с использованием численных проекционных моделей, полученных на основе классических методов и адаптированных к геометрии продольно-поперечного профиля АВВ.

Достоверные и эффективные проекционные модели, предназначенные для анализа и синтеза диэлектрической антенны с гребенчатой дифракционной решеткой, получены относительно недавно [6-8]. Их особенностью является описание поля в канавках гребенки в виде совокупности волноводных мод, число которых определяет точность моделирования и размерность итоговой системы линейных алгебраических уравнений (СЛАУ). Поскольку коэффициенты результирующей СЛАУ являются интегральными функциями пространственной частоты, их расчет занимает много времени, поэтому при оптимизации энергетических показателей или показателей направленности АВВ весьма актуальным является снижение размерности СЛАУ, в том числе, за счёт уменьшения числа учитываемых в канавках волноводных мод.

Цель работы – показать, что применение одномодового приближения в задачах анализа и параметрического синтеза диэлектрической АВВ с гребенчатой дифракционной решеткой позволяет избежать существенной потери точности моделирования при значительном увеличении его производительности.

Постановка и метод решения задачи

Применительно к задаче возбуждения гребенчатой дифракционной решетки заданной собственной волной планарного ДВ низшего E -типа (рис. 2) расчет диаграммы направленности АВВ в E -плоскости производится в соответствии с соотношением [6,9]:

$$f(\Theta) = \sqrt{\pi k_0 W_0} \cdot |A(k_0 \sin \Theta)| \cdot \cos \Theta, \quad (1)$$

где $k_0 = 2\pi/\lambda_0$, $W_0 = 120\pi$ – волновое число и волновое сопротивление свободного пространства, λ_0 – длина излучаемой волны; Θ – меридиональный угол наблюдения (рис. 2); $A(\beta)$ – спектральная плотность магнитного поля дифракции в области над раскрывом АВВ, пропорциональная амплитуде парциальной плоской волны с постоянными распространения β по оси Ox и $\gamma(\beta) = \sqrt{k_0^2 - \beta^2}$ по оси Oz .

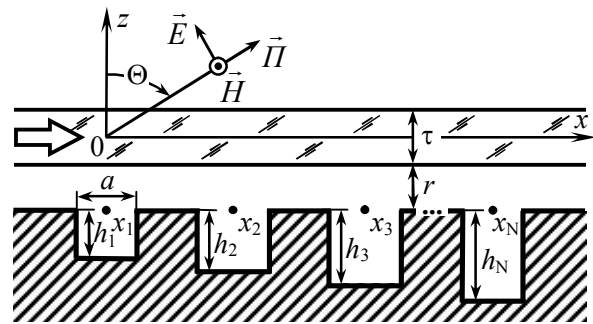


Рис. 2

Спектральная плотность поля над ДВ $A(\beta)$ определяется комплексными амплитудами $D_m^{(k)}$ волноводных мод канавок с постоянными распространения $\zeta_m = \sqrt{k_0^2 - (m\pi/a)^2}$ и шириной a по оси Oz :

$$A(\beta) = \frac{j/2\pi}{\mu(\beta)\gamma(\beta)} \sum_{k=1}^N \sum_{m=0}^{M-1} D_m^{(k)} \zeta_m \sin(\zeta_m h_k) I_m^{(k)}(\beta), \quad (2)$$

где k, m – номер канавки и волноводной моды; N, M – число канавок гребенки и учитываемых в канавке мод; j – мнимая единица; h_k – глубина k -й канавки;

$$I_m^{(k)}(\beta) = \frac{a}{2} e^{-j(\beta x_k + \frac{m\pi}{2})} \left(\operatorname{sinc} \frac{\beta a + m\pi}{2} + (-1)^m \operatorname{sinc} \frac{\beta a - m\pi}{2} \right).$$

Параметры $D_m^{(k)}$ волноводных мод канавок рассчитываются при решении СЛАУ:

$$\sum_{k=1}^N \sum_{m=0}^{M-1} D_m^{(k)} \left[\zeta_m \sin(\zeta_m h_k) \sigma_{m,s}^{(k,q)} + j \frac{a}{2} \Delta_k^q \Delta_m^s (1 + \Delta_s^0) \cos(\zeta_m h_k) \right] = j H_0 \tilde{I}_s^{(q)}(\beta_0), \quad q=1, \bar{N}, s=0, \bar{M}-1, \quad (3)$$

где $\sigma_{m,s}^{(k,q)}$ – коэффициенты связи канавок по полю [9]:

$$\sigma_{m,s}^{(k,q)} = \frac{1}{j 2 \pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta) d\beta, \quad (4)$$

где $\Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta) = \frac{j \nu(\beta)}{\mu(\beta) \gamma(\beta)} I_m^{(k)}(\beta) \tilde{I}_s^{(q)*}(\beta)$; Δ_s^i – дельта Кронекера; β_0 – постоянная распространения собственной E -волны распределительно-излучающей системы, получаемая при решении дисперсионного уравнения ДВ с проводящим экраном [8]:

$$1 - \frac{j}{2} \operatorname{tg}(\eta_0 \tau) \left(\frac{\gamma_0 \varepsilon_\tau}{\eta_0} [1 - e^{j 2 \gamma_0 r}] + \frac{\eta_0}{\gamma_0 \varepsilon_\tau} [1 + e^{j 2 \gamma_0 r}] \right) = 0; \quad (5)$$

$\gamma_0 = \sqrt{k_0^2 - \beta_0^2}$; $\eta_0 = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_\tau - \beta_0^2}$; ε_τ – относительная диэлектрическая проницаемость ДВ;

H_0 – нормировочный коэффициент [6,9]; $\operatorname{sinc}(x) = \sin x / x$;

$$\left\{ \begin{array}{l} \nu(\beta) \\ \mu(\beta) \end{array} \right\} = \cos[\eta(\beta) \tau] e^{-j \gamma(\beta) r} \times \left[1 - \frac{j}{2} \operatorname{tg}[\eta(\beta) \tau] \times \left(\frac{\gamma(\beta) \varepsilon_\tau}{\eta(\beta)} [1 \pm e^{j 2 \gamma(\beta) r}] + \frac{\eta(\beta)}{\gamma(\beta) \varepsilon_\tau} [1 \mp e^{j 2 \gamma(\beta) r}] \right) \right];$$

$\eta(\beta) = \sqrt{k_0^2 \varepsilon_\tau - \beta^2}$ – поперечное (по оси Oz) волновое число ДВ.

Наиболее трудоёмким при формировании СЛАУ (3) является расчет матрицы коэффициентов связи канавок по полю $\sigma_{m,s}^{(k,q)}$. Анализ (4) показывает, что $\sigma_{m,s}^{(k,q)} = \sigma_{s,m}^{(q,k)}$, а в случае эквидистантности гребенчатой решетки в соответствии с принципом взаимности – $\sigma_{m,s}^{(k,q)} = \sigma_{m,s}^{(k+i,q+i)}$ [10]. Указанные соотношения позволяют снизить время расчёта матрицы $\sigma_{m,s}^{(k,q)}$ для неэквидистантной решётки в 2 раза, для эквидистантной – в N раз. Но во многих случаях – при учёте в канавках от 3-х до 5-ти и более мод – такое сокращение трудоёмкости оказывается недостаточным.

Заметим, что расчёт коэффициентов $\sigma_{m,s}^{(k,q)}$ выполняется путём численного интегрирования функции $\Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta)$ по вещественной переменной β . Поскольку оба предела интегрирования бесконечны, область интегрирования ограничива-

ется и делится на промежутки, в пределах которых свойства функции $\Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta)$ различны. В частности при условии, что $|\beta| > k_0 \sqrt{\varepsilon_\tau}$, функция $\Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta)$ является комплексно-сопряжённой. При $\beta = (-k_0 \sqrt{\varepsilon_\tau}, -k_0)$ и $\beta = (k_0, k_0 \sqrt{\varepsilon_\tau})$ функция $\Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta)$ обладает особенностями в полюсах $|\beta| = \beta_0$, которые необходимо предварительно исключить. Так, интеграл в пределах малого промежутка $\beta_0 \mp \Delta\beta$, включающего полюс β_0 , определяется вычетом $\Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta)$ в β_0 [6]:

$$\int_{\beta_0 - \Delta\beta}^{\beta_0 + \Delta\beta} \Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta) d\beta \approx j \pi \frac{\Gamma_{m,s}^{(k,q)}(\beta_0) \cdot \mu(\beta_0)}{d\mu(\beta_0)/d\beta}. \quad (6)$$

При интегрировании необходимо использовать метод интегрирования с открытыми концами.

Если при относительно точном расчёте коэффициентов $\sigma_{m,s}^{(k,q)}$ рекомендуемая в [6,11] область интегрирования соответствует интервалу $|\beta| \leq 10 k_0$, то в целях ускорения расчета $\sigma_{m,s}^{(k,q)}$ имеет смысл её сократить до $|\beta| \leq 4 k_0 \sqrt{\varepsilon_\tau}$.

Одномодовое приближение заключается в том, что во всех канавках предполагается учитывать только одну (нулевую) моду: $m = s = 0$. При таком условии параметры $D_0^{(k)}$ волноводных мод канавок следует рассчитывать путем решения сокращённой СЛАУ:

$$\sum_{k=1}^N D_0^{(k)} \left[\zeta_0 \sin(\zeta_0 h_k) \sigma_{0,0}^{(k,q)} + j a \Delta_k^q \cos(\zeta_0 h_k) \right] = j H_0 \tilde{I}_0^{(q)}(\beta_0), \quad q=1, \bar{N}. \quad (7)$$

Сокращение числа параметров волноводных мод приводит также к упрощению соотношения (2), определяющего спектральную плотность поля над ДВ и, как следствие, к ускорению расчета диаграммы направленности (1) диэлектрической АБВ.

Результаты и их обсуждение

Аналитическая оценка погрешности одномодового приближения применительно к показателям и характеристикам диэлектрической АБВ весьма затруднительна. В связи с этим представляется целесообразным выполнить численную оценку погрешности для разных вариантов конструктивных параметров распределительно-излучающей системы, обеспечива-

ющих доминирование того или иного показателя антенны.

В качестве анализируемой характеристики антенны будем использовать нормированную диаграмму направленности АВВ в E -плоскости, получаемую по (1):

$$F(\Theta) = f(\Theta) / f(\Theta_m), \quad (8)$$

где Θ_m – угол максимального излучения, при котором ненормированная ДН максимальна:

$$\Theta_m = \arg[\max f(\Theta)] \text{ при } \Theta \in [-90^\circ; 90^\circ]. \quad (9)$$

В качестве сравниваемых показателей АВВ помимо угла максимального излучения целесообразно рассмотреть:

– ширину главного лепестка ДН по уровню половинной мощности $\Delta\Theta_{0.5}$;

– коэффициент полезного действия (КПД), определяемый отношением мощности излучения к величине подводимой к АВВ мощности:

$$\eta = (1/P_0) \cdot \int_{-\pi/2}^{+\pi/2} F^2(\Theta) d\Theta, \quad (10)$$

где P_0 – мощность, подводимая к диэлектрической АВВ, условно равная единице при соответствующем выборе нормировочного коэффициента H_0 ;

– коэффициент направленного действия в направлении Θ_m без учета направленности в азимутальной плоскости [12,6]:

$$D_m = \pi \cdot F^2(\Theta_m) / (P_0 \cdot \eta); \quad (11)$$

– максимальный уровень боковых лепестков ДН:

$$\xi_m = \max F(\Theta) \text{ при } \Theta \neq \Theta_m; \quad (12)$$

– коэффициент использования поверхности АВВ без учета направленности в азимутальной плоскости [12,6]:

$$v = \lambda_0 D_m / \pi L, \quad (13)$$

где L – длина распределительно-излучающей системы АВВ;

– полная эффективность АВВ в направлении Θ_m :

$$\Xi_m = \eta \cdot v. \quad (14)$$

Здесь и далее рассматривается распределительно-излучающая система диэлектрической АВВ с эквидистантной гребенчатой решёткой, обладающей шагом d : $x_k - x_{k-1} = d$, $k = \overline{2, N}$. Решётка имеет неравномерный глубинный профиль, оптимизированный по критерию доминирования показателя АВВ: $h_k = \varphi(k)$, $k = \overline{1, N}$. ДВ выполнен из полистирола с $\varepsilon_\tau = 2.56$, явля-

ется одномодовым ($\tau < \lambda_0 / (2\sqrt{\varepsilon_\tau - 1})$) и строго параллелен поверхности решётки ($r = \text{const}$).

В [11] рассмотрен пример оптимизации глубинного профиля гребенчатой решётки АВВ по критерию максимума полной эффективности при $d/\lambda_0 = 0.7$. Установлено, что для излучающей системы с 25-ю канавками ($N = 25$) шириной $a = 0.3d$, накрытой ДВ толщиной $\tau = 0.2d$ с воздушным зазором $r = 0.82d$, предпочтительным является неравномерный глубинный профиль. Для случая линейной аппроксимации профиля получено оптимальное правило продольной вариации глубины канавок от $0.15d$ до $0.25d$, при котором полная эффективность составила $\Xi_m = 0.798$. Апостериорный анализ показателей диэлектрической АВВ с указанными конструктивными параметрами позволил выявить резервы для дополнительного повышения эффективности излучения. В частности увеличение числа канавок до 30-ти ($N = 30$) и незначительная коррекция воздушного зазора позволили обеспечить расчётную полную эффективность, равную $\Xi_m = 0.824$.

Нормированная расчётная диаграмма направленности диэлектрической АВВ при учёте в канавках решётки пяти волноводных мод показана на рис. 3. ДН представляет собой типовую характеристику антенны вытекающей волны с наклонным излучением [13-17].

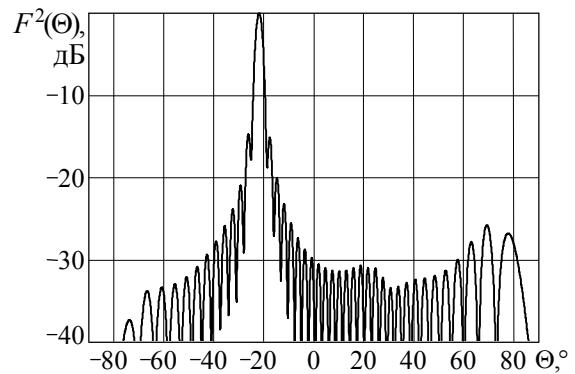


Рис. 3

Показатели АВВ, полученные при учёте пяти волноводных мод ($M = 5$), представлены во втором столбце табл. 1, из которого в частности следует, что главный лепесток ДН ориентирован под углом «минус» 22° относительно нормали к поверхности антенны. Антенна характеризуется высокой излучательной способностью ($\eta \approx 0.94$) и весьма значительным использованием поверхности ($v = 0.88$). Условимся ДН и

показатели АВВ, полученные при $M=5$, считать квазиточными.

Таблица 1

M	5	3	2	1	1*	$\Delta_{51^*}, \%$
$\Theta_m, ^\circ$	-22.0	-22.0	-22.0	-21.7	-21.7	1.4
$\Delta\Theta_{0.5}, ^\circ$	2.76	2.76	2.78	2.86	2.86	3.6
η	0.936	0.940	0.948	0.972	0.972	3.8
D_m	53.8	53.7	53.1	51.3	51.4	4.5
$\xi_m, \text{дБ}$	-14.7	-14.7	-14.7	-13.6	-13.6	13.5
ν	0.880	0.877	0.868	0.837	0.838	4.8
Ξ_m	0.824	0.824	0.823	0.814	0.815	1.1
t_p	1.00	0.62	0.26	0.12	0.11	89

В других столбцах табл. 1 приведены расчётные показатели, полученные при учёте в канавках гребенчатой решётки от трёх до одной волноводной моды. Шестой столбец табл. 1 содержит показатели АВВ для одномодового приближения и рекомендованного выше сокращения области интегрирования при расчете коэффициентов электродинамической связи канавок по полю. В нижней строке табл. 1 представлено относительное время расчёта ДН и всех показателей диэлектрической АВВ в долях от времени, совокупно затрачиваемого при квазиточном анализе антенны с протяженностью раскрыва $N \cdot d = 21\lambda_0$.

Из табл. 1 следует, что одномодовое приближение с ограничением области интегрирования при расчёте коэффициентов взаимной связи канавок позволяет ускорить анализ АВВ на 89 % (практически на порядок). При этом, как свидетельствует последний столбец табл. 1, интегральные показатели АВВ (η, D_m, ν, Ξ_m) отклоняются от квазиточных значений не более чем на (1.1 - 4.8) %, что весьма незначительно. Наиболее критичным является локальный показатель ДН – максимальный уровень бокового излучения ξ_m , отклоняющийся в процентном соотношении на 13.5 %, что, однако, соответствует 1.1 дБ и является также вполне допустимым при экспресс-анализе или параметрическом синтезе АВВ [18]. Расчётная ДН антенны, полученная при условии одномодового приближения, представлена на рис. 4. Заметим, что поведение показанной ДН для всех углов наблюдения полностью соответствует квазиточной ДН на рис. 3, за исключением незначительного приращения уровня бокового излучения, а также некоторого смещения и расширения главного лепестка.

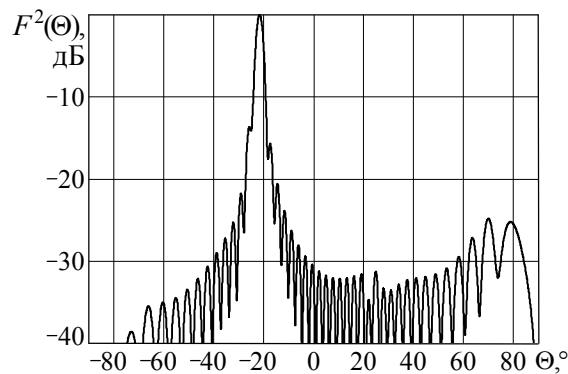


Рис. 4

Рассмотренный пример соответствовал относительно слабой связи ДВ с гребенчатой решёткой и значительным смещением рабочей частоты относительно частоты брэгговской дифракции [19-23]. В связи с этим для исследования более специфичного режима работы АВВ имеет смысл уменьшить воздушный зазор между ДВ и решёткой, например, до $r=0.6d$ и увеличить d/λ_0 до 0.8. Пусть глубинный профиль решётки, аппроксимированный кубическим полиномом, оптимизирован так, чтобы гарантировать минимально возможный для указанных параметров геометрии уровень бокового излучения. Число канавок гребёнки увеличено с 30-ти до 40 в целях обеспечения повышенной излучательной способности (КПД). Остальные параметры оставлены прежними.

На рис. 5 приведена расчётная квазиточная ДН диэлектрической антенны при условии, что $h_k = 0.63 - 2.27k/N + 3.69(k/N)^2 - 1.52(k/N)^3$, во втором столбце табл. 2 – её основные показатели. Действительно, угол максимального излучения теперь уже составляет «минус» 11.4° , что ближе почти на 10° к нормали и не совпадает со значением $\arcsin(\beta_0/k_0 - \lambda_0/d) = -10.8^\circ$, рассчитанным без учёта влияния гребенки [24-25].

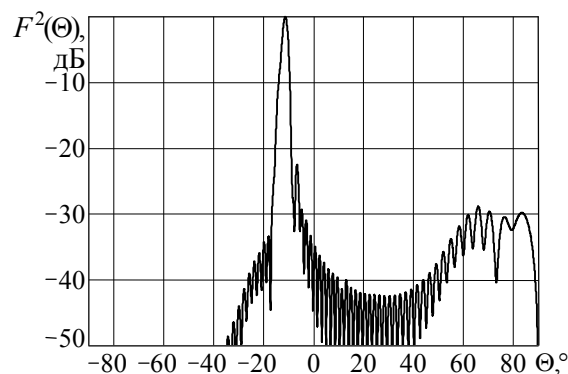


Рис. 5

Антенна по-прежнему характеризуется относительно высокой излучательной способностью ($\eta \approx 0.89$). При этом обладает сниженным уровнем бокового излучения ($\xi_m \approx -22^\circ$) и, как следствие, меньшим коэффициентом использования поверхности ($\nu \approx 0.72$).

Таблица 2

M	5	3	2	1	1*	$\Delta_{51^*}, \%$
$\Theta_m, ^\circ$	-11.4	-11.4	-11.4	-11.3	-11.3	0.8
$\Delta\Theta_{0.5}, ^\circ$	2.20	2.20	2.18	2.22	2.22	0.9
η	0.893	0.895	0.896	0.932	0.933	4.5
D_m	70.6	70.7	71.1	70.0	69.8	1.1
$\xi_m, \text{дБ}$	-22.4	-22.4	-22.5	-22.3	-22.3	1.1
ν	0.716	0.717	0.721	0.710	0.709	1.0
Ξ_m	0.640	0.642	0.646	0.662	0.661	3.3

Из табл. 2 следует, что одномодовое приближение с ограничением области интегрирования при расчёте коэффициентов взаимной связи канавок приводит к отклонению всех показателей АВВ от квазиточных значений не более чем на (1.1 - 4.5) %, что соответствует ранее рассмотренному режиму. Однако для режима, обеспечивающего минимизацию бокового излучения, самым критичным является энергетический показатель – КПД. Расчётная ДН антенны при одномодовом приближении показана на рис. 6. Её сравнение с квазиточной свидетельствует об увеличении уровня бокового излучения в области отрицательных значений меридионального угла наблюдения и уменьшения – в области положительных значений. Главный лепесток ДН оказался в зоне, устойчивой по отношению к числу учитываемых мод, и не подвергся сколь либо ощутимым изменениям.

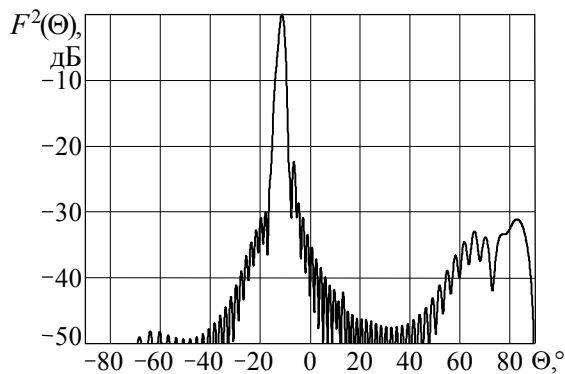


Рис. 6

Рассмотрим режим работы диэлектрической АВВ, близкий к брэгговской дифракции. ДВ при этом обладает увеличенной до $\tau = 0.4d$

толщиной и располагается непосредственно на поверхности гребенчатой решётки: $r = 0$. Глубинный профиль 25-элементной решётки является линейным и оптимизирован по критерию максимума КПД: $h_k = 0.59 - 0.21k/N$. На рис. 7 показана квазиточная ДН диэлектрической антенны, во втором столбце табл. 3 приведены её основные показатели. Заметим, что оптимизация геометрии решётки по критерию максимума излучательной способности (КПД) АВВ обеспечила побочный положительный эффект, заключающийся в снижении уровня бокового излучения. Такой результат вполне объясним и связан с «заплыванием» нулей ДН вследствие проявления фазовых искажений на раскрыве АВВ вследствие сильной связи ДВ с гребенчатой решёткой [26-27].

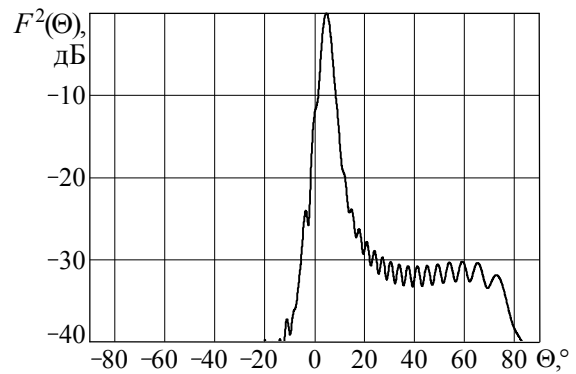


Рис. 7

Анализ параметров АВВ, рассчитанных при разном количестве учитываемых в канавках мод, показывает, что при одномодовом приближении практически все показатели, за исключением КПД и максимального уровня бокового излучения, отличаются от квазиточных значений на (11.1 - 11.8) %.

Таблица 3

M	5	3	2	1	1*	$\Delta_{51^*}, \%$
$\Theta_m, ^\circ$	4.7	4.8	4.9	6.9	6.9	—
$\Delta\Theta_{0.5}, ^\circ$	3.44	3.46	3.50	3.88	3.90	11.8
η	0.994	0.995	0.993	0.994	0.994	0.0
D_m	44.1	43.9	43.2	39.1	39.0	11.6
$\xi_m, \text{дБ}$	-23.9	-23.8	-23.4	-22.6	-22.7	5.0
ν	0.707	0.700	0.691	0.628	0.626	11.5
Ξ_m	0.700	0.697	0.686	0.624	0.622	11.1

Весьма чувствительным показателем оказался при этом угол максимального излучения, отклонившийся на 2.2° (относительное отклонение для Θ_m в табл. 3 не указано в силу малой величины квазиточного значения). Как и в

предыдущих примерах, отклонение оптимизируемого показателя АВВ (в данном случае КПД) оказалось минимальным.

На рис. 8 приведена ДН для случая однодогового приближения, из которой, в частности, следует, что в области отрицательных значений меридионального угла наблюдения наблюдается увеличение уровня бокового излучения, а в области положительных значений – снижение.

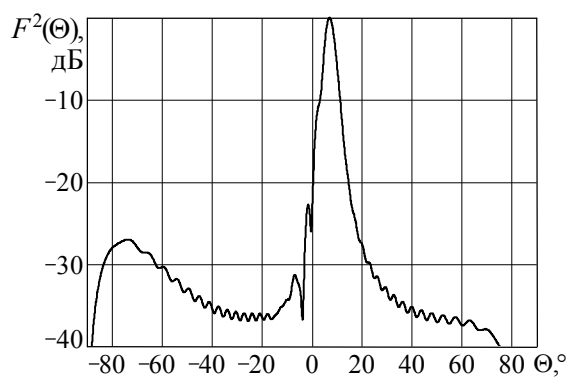


Рис. 8

Заключение

Таким образом, однодоговое приближение для экспресс-анализа и параметрического синтеза диэлектрической АВВ с гребенчатой решеткой целесообразно. Потеря точности при оценке основных показателей АВВ при её работе в режиме наклонного излучения является вполне допустимой. Расчёты показывают, что оптимизируемый показатель АВВ оказывается, как правило, наиболее устойчивым по величине при переходе к однодоговому приближению. Учёт в канавках решётки одной моды при числе элементов решётки от 30 и более гарантирует ощутимый выигрыш по времени – на порядок и более. Однодогового приближения для анализа и синтеза АВВ в режиме, близком к брэгговской дифракции, следует избегать в связи с потерей точности.

Литература

1. Munawar H.S. Applications of leaky-wave antennas: A review // *International Journal of Wireless and Microwave Technologies*. 2020. Vol. 10. No. 3. P. 56-62.
2. Leaky-wave antennas for 5G/B5G mobile communication systems: A survey / Y. He, J. Jiang, L. Zhang, all // *ZTE Communications*. 2020. Vol. 18. No. 3. pp. 3-11.
3. Salman A.O. On the antenna efficiencies for the dielectric leaky-wave antennas with a sinusoidal metallic diffraction grating coupled from the broad and the narrow face of the dielectric // *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011. Vol. 53. No. 9. P. 2030-2034.

4. Антенны дифракционного излучения на базе жёлобковой линии передачи / А.П. Евдокимов, В.З. Мазур, К.Ю. Сиренко, Ю.К. Сиренко // *Физические основы приборостроения*. 2018. Т. 7. № 1(27). С. 24-36.

5. Евдокимов А.П. Антенны дифракционного излучения // *Физические основы приборостроения*. 2013. Т. 2. № 1(6). С. 108-125.

6. Останков А.В., Антипов С.А., Калинин Ю.Е. Анализ и синтез раскрыва антенн дифракционного излучения, построенных на основе квазипериодических гребенчатых решеток. Воронеж: ФГБОУ ВО «ВГТУ», 2016. 181 с.

7. Стещенко С.А., Кириленко А.А. Строгая двумерная модель эффекта преобразования поверхностных волн в объёмные // *Радиофизика и электроника*. 2005. Т. 10. № 1. С. 30-38.

8. Останков А.В. Математическая модель дифракции волны на конечной металлодиэлектрической гребенке для проектирования антенн вытекающей волны // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2009. Т. 5. № 7. С. 89-91.

9. Ostankov A.V., Antipov S.A., Razinkin K.A. Optimization of directional and energetic properties of diffraction antenna // *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*. 2016. Vol. 12. No. 4. P. 3845-3864.

10. Останков А.В. Дифракционная антенна вытекающей волны с нестандартной реализацией излучающего раскрыва // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2010. Т. 6. № 8. С. 17-26.

11. Останков А.В. Анализ и оптимизация дифракционной антенны поверхностной волны // *Антенны*. 2010. № 9(160). С. 44-53.

12. Останков А.В. Синтез излучающего гребенчатого раскрыва антенны вытекающей волны // *Радиотехника*. 2012. № 2. С. 38-44.

13. Калошин В.А., Нгуен К.Т., Фролова Е.В. Синтез и анализ антенны вытекающей волны с полупрозрачной стенкой из металлических цилиндров // *Радиотехника и электроника*. 2020. Т. 65. № 3. С. 250-256.

14. Ostankov A., Khripunov E., Kashkarov V. A compact nonuniform composite right/left-handed leaky-wave scanning antenna with elliptical polarization for X-band application // *Progress in Electromagnetics Research C*. 2021. Vol. 114. P. 43-56.

15. Седельников Ю.Е., Олейник Е.Ю., Шаабан М. Линейные антенные решетки КВЧ диапазона на диэлектрических волноводах // *Журнал радиоэлектроники*. 2018. № 8. С. 8.

16. Substrate-integrated waveguide PCB leaky-wave antenna design providing multiple steerable beams in the V-band / M. Steeg, J. Tebart, A. Stöhr, N. Yonemoto // *Electronics (Switzerland)*. 2017. Vol. 6. No 4. P. 107.

17. Mateo-Segura C., Feresidis A.P., Goussetis G. Sub-wavelength profile 2-D leaky-wave antennas with two periodic layers // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2011. Vol. 59. No 2. P. 416-424.

18. Калинин В.И. Анализ и синтез волноводно-щелевой антенны с заданным амплитудным распределением // *Журнал радиоэлектроники*. 2015. № 12. С. 8.

19. Off-Bragg blazed rectangular groove gratings for high diffraction efficiency devices / W. Chen, N.C. Beaulieu, D.G. Michelson, E.V. Jull // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2013. Vol. 61. No 4. P. 2342-2347.

20. Planar center-fed leaky-wave antenna arrays for millimeter wave systems / Y.B. Nechaev, D.N. Borisov, A.I. Klimov, I.V. Peshkov // *2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT 2015. Kharkiv, 2015. P. 7136832.*

21. Останков А.В. Оптимизация антенны дифракционного излучения, реализованной по интерферометрической схеме // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 11. С. 51-54.

22. Рябчунов А.И., Хрипунов Е.Г., Останков А.В. Вычислительные эксперименты по исследованию возможности устранения дифракции Брэгга в диэлектрической антенне вытекающей волны // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика. 2017. Т. 5. № 7-2 (33-2). С. 256-260.

23. Банков С.Е. Антенные решетки с последовательным питанием. М.: Физматлит, 2013. 416 с.

24. Кравченко В.Ф., Сиренко К.Ю., Сиренко Ю.К.

Преобразование и излучение электромагнитных волн открытыми резонансными структурами. Моделирование и анализ переходных и установившихся процессов. М.: Физматлит, 2011. 316 с.

25. Останков А.В., Кирпичева И.А., Рябчунов А.И. Угловая дисперсия антенны дифракционного излучения // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 4. С. 76-79.

26. Хансен Р.С. Фазируемые антенные решетки. М.: Техносфера, 2012. 560 с.

27. Стешенко С.А. Синтез антенны вытекающих волн по заданному распределению поля на апертуре // Радиотехника и радиоастрономия. 2013. Т. 18. № 4. С. 373-380.

Поступила 08.06.2022; принята к публикации 19.08.2022

Информация об авторах

Останков Александр Витальевич — д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: avostankov@mail.ru

Останков Станислав Александрович — магистрант факультета прикладной математики, информатики и механики, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская пл., 1), e-mail: ostankov.s@mail.ru

Литвинов Глеб Валентинович — старший преподаватель кафедры радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fertitlgv@yandex.ru

Дашян Сергей Юрьевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор лаборатории им. Поля Пенлеве, Университет Лилля (59655, Франция, г. Вильнёв-д'Аск, Научный городок, корпус M2), e-mail: sergeui.dachian@univ-lille1.fr

Щегинин Никита Николаевич — канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры основ радиотехники и электроники, Воронежский институт ФСИН России (394072, Россия, г. Воронеж, ул. Иркутская 1-а), e-mail: nikita.shetinin@mail.ru

SINGLE-MODE APPROXIMATION IN THE PROBLEM OF THE DIELECTRIC LEAKY WAVE ANTENNA SYNTHESIS

A.V. Ostankov¹, S.A. Ostankov², G.V. Litvinov¹, S.Yu. Dachian³, N.N. Shchetinin⁴

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh State University, Voronezh, Russia

³University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France

⁴Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, Russia

Abstract: electrodynamic modeling of a dielectric leaky wave antenna with a diffraction grating containing a large number of periods with inhomogeneities takes a significant amount of time even in modern commercial electromagnetic analysis packages. It is customary to evaluate and optimize the directivity indicators of these antennas on the basis of numerical projection models. Here we consider our projection model obtained by the partial area method and using the description of the field in the grooves of a comb grating in the form of an ensemble of waveguide modes, the number of which determines the accuracy of modeling and the dimension of the final system of linear algebraic equations. There are relations that allow analyzing the main parameters of a dielectric antenna containing a planar dielectric waveguide and a conducting comb grating in the mode of radiation of a vertically polarized radio wave, including the case of a single-mode approximation, in which one waveguide mode is taken into account in the grooves. Using specific examples for different radiation modes, we show the expediency of a single-mode approximation for express analysis and parametric synthesis of a dielectric antenna. We established that the loss of accuracy in assessing the main energy indicators and directivity indicators of the antenna in the oblique radiation mode is acceptable. We found out that in the transition to the single-mode approximation, the optimized index of the dielectric antenna, as a rule, is the most stable in magnitude. WE shown that accounting in one mode grating grooves with a number of grating elements of 30 or more guarantees a gain in time by an order or more. We pointed out that the single-mode approximation for the analysis and synthesis of an antenna in a regime close to Bragg diffraction should be avoided due to the loss of accuracy

Key words: dielectric antenna, comb grating, groove, single-mode approximation, directivity pattern, directivity indicators

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR and CNRS, project number 20-51-15001

References

1. Munawar H.S. “Applications of Leaky-wave Antennas: A Review”, *Int. J. of Wireless and Microwave Technologies*, 2020, vol. 10, no. 3, pp. 56-62.

2. He Y., Jiang J., Zhang L., Li W., Wong S., Deng W., Chi B. “Leaky-wave antennas for 5G/B5G mobile communication systems: A survey”, *ZTE Communications*, 2020, vol. 18, no. 3, pp. 3-11.

3. Salman A.O. “On the antenna efficiencies for the dielectric leaky-wave antennas with a sinusoidal metallic diffraction grating coupled from the broad and the narrow face of the dielectric”, *Microwave and Optical Technology Letters*, 2011, vol. 53, no. 9, pp. 2030-2034.

4. Evdokymov A.P., Mazur V.Z., Sirenko K.Yu., Sirenko Yu.K. "Diffraction radiation antennas based on trough transmission lines", *Physical Bases of Instrumentation (Fizicheskie osnovy priborostroyeniya)*, 2018, vol. 7, no. 1(27), pp. 24-36.
5. Evdokymov A.P. "Diffraction radiation antennas", *Physical Bases of Instrumentation (Fizicheskie osnovy priborostroyeniya)*, 2013, vol. 2, no. 1(6), pp. 108-125.
6. Ostankov A.V., Antipov S.A., Kalinin Yu.E. "The analysis and synthesis of the aperture of diffraction radiation antennas based on quasiperiodic comb arrays" ("Analiz i sintez raskryva antenn difrakcionnogo izlucheniya, postroennykh na osnove kvaziperiodicheskikh grebenchatykh reshetok"), Voronezh State Technical University, 2016, 181 p.
7. Steshenko S.A., Kirilenko A.A. "The accurate two-dimensional model of the effect of the surface waves transformation into the spatial modes", *Radiophysics and Radioastronomy (Radiofizika i radioastronomiya)*, 2005, vol. 10, no. 1, pp. 30-38.
8. Ostankov A.V. "Mathematical model of wave diffraction by a finite metal-dielectric comb for designing leaky wave antennas", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2009, vol. 5, no. 7, pp. 89-91.
9. Ostankov A.V., Antipov S.A., Razinkin K.A. "Optimization of directional and energetic properties of diffraction antenna", *Global Journal of Pure and Applied Mathematics*, 2016, vol. 12, no. 4, pp. 3845-3864.
10. Ostankov A.V. "The diffraction leaky-wave antenna with off-gauge implementation of the aperture", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 8, pp. 17-26.
11. Ostankov A.V. "The analysis and optimization of a diffraction antenna of surface wave", *Antennas (Antenny)*, 2010, no. 9 (160), pp. 44-53.
12. Ostankov A.V. "Synthesis of comb-like aperture of the antenna leaky wave", *Radioengineering (Radiotekhnika)*, 2012, no. 2, pp. 38-44.
13. Kaloshin V.A., Frolova E.V., Nguyen K.T. "Synthesis and analysis of a leaky wave antenna with a semitransparent wall of metal cylinders", *Radioengineering and Electronics (Radiotekhnika i elektronika)*, 2020, vol. 65, no. 3, pp. 250-256.
14. Ostankov A., Khripunov E., Kashkarov V. "A compact nonuniform composite right/left-handed leaky-wave scanning antenna with elliptical polarization for X-band application", *Progress in Electromagnetics Research C*, 2021, vol. 114, pp. 43-56.
15. Sedel'nikov Yu.E., Oleynik E.Yu., Shaaban M. "Linear antenna arrays of EHF range on dielectric waveguides", *Journal of Radio Electronics (Zhurnal radioelektroniki)*, 2018, no. 8, pp. 8.
16. Steeg M., Tebart J., Stöhr A., Yonemoto N. "Substrate-integrated waveguide PCB leaky-wave antenna design providing multiple steerable beams in the V-band", *Electronics (Switzerland)*, 2017, vol. 6, no. 4, pp. 107.
17. Mateo-Segura C., Feresidis A.P., Goussetis G. "Sub-wavelength profile 2-D leaky-wave antennas with two periodic layers", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2011, vol. 59, no. 2, pp. 416-424.
18. Kalinichev V.I. "Analysis and synthesis of a waveguide-slot antenna with a given amplitude distribution", *Journal of Radio Electronics (Zhurnal radioelektroniki)*, 2015, no. 12, pp. 8.
19. Chen W., Beaulieu N.C., Michelson D.G., Jull E.V. "Off-Bragg blazed rectangular groove gratings for high diffraction efficiency devices", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 4, pp. 2342-2347.
20. Nechaev Y.B., Borisov D.N., Klimov A.I., Peshkov I.V. "Planar center-fed leaky-wave antenna arrays for millimeter wave systems", *2015 International Conference on Antenna Theory and Techniques, ICATT 2015*, Kharkiv, 2015, pp. 7136832.
21. Ostankov A.V. "Optimization of the antenna of diffraction radiation realised on the interferometric scheme", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 11, pp. 51-54.
22. Ryabchunov A.I., Khripunov E.G., Ostankov A.V. "Computing experiments on research of possibility of elimination of diffraction of the Bragg in the dielectric leaky-wave antenna", *Current Directions of Scientific Research of the XXI Century: Theory and Practice (Aktual'nye napravleniya nauchnykh issledovaniy XXI veka: Teoria i praktika)*, 2017, vol. 5, no. 7-2 (33-2), pp. 256-260.
23. Bankov S.E. "Antenna arrays with serial feed" ("Antennnye reshetki s posledovatel'nym pitaniem"), Moscow, Fizmatlit, 2013, 416 p.
24. Kravchenko V.F., Sirenko Yu.K., Sirenko K.Yu. "Convert and radiation of electromagnetic waves open resonant structures. Modeling and analysis of transition and established processes" ("Preobrazovanie i izluchenie elektromagnitnykh voln otkrytymi rezonansnymi strukturami. Modelirovanie i analiz perekhodnykh i ustanovivshikhsya protsessov"), Moscow, Fizmatlit, 2011, 316 p.
25. Ostankov A.V., Kirpicheva I.A., Ryabchunov A.I. "The angular dispersion of antenna with diffraction radiation", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no. 4, pp. 76-79.
26. Hansen R.S. "Phased antenna arrays" ("Fazirovannye antennnye reshetki"), Moscow, Technosfera, 2012, 560 p.
27. Steshenko S.A. "Synthesis of a leaky-wave antenna for a given field distribution at an aperture", *Radiophysics and Radioastronomy (Radiofizika i radioastronomiya)*, 2013, vol. 18, no. 4, pp. 373-380.

Submitted 08.06.2022; revised 19.08.2022

Information about the authors

Aleksandr V. Ostankov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru

Stanislav A. Ostankov, MA, Voronezh State University (1 Universitetskaya pl., Voronezh 394018, Russia), e-mail: ostankov.s@mail.ru

Gleb V. Litvinov, Senior Lecturer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: ferritlgv@yandex.ru

Sergey Yu. Dachian, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, University of Lille (Bâtiment M2, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve-d'Ascq, France), e-mail: sergeui.dachian@univ-lille1.fr

Nikita N. Shchetinin, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service (1a Irkutskaya, Voronezh 394072, Russia), e-mail: nikita.shchetinin@mail.ru

ВЛИЯНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ОРИЕНТАЦИИ ПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ СОСТАВНОЙ МЕТАПОВЕРХНОСТИ НА ИХ ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ И ДИАГРАММЫ РАССЕЙВАНИЯ В СВЧ-ДИАПАЗОНЕ

А.С. Мазин, И.Ш. Фитаев, Н.А. Болдырев

Крымский федеральный университет им. В.И. Вернадского, г. Симферополь, Россия

Аннотация: рассмотрены дифракционные характеристики шахматно-подобных метаповерхностей, состоящих из ячеек с различной ориентацией проводящих резонаторов, сформированных из прямоугольных полосковых линий, симметрично расположенных на диэлектрической подложке размером 18x18 мм. Линейные размеры проводящих метачастиц составляли 4,2 мм, расстояние между ними – 1,7 мм, а расстояние между соседними вертикальными рядами – 5,15 мм. Для диагональной симметрии размеры медных резонаторов остались неизменными, в то время как расстояние между параллельными рядами в них составляло 4,29 мм. Выбор подобной геометрии обусловлен средней частотой исследуемого диапазона – 20,5 ГГц. Для получения экспериментальных данных был использован метод бистатического измерения зависимости уровня отраженного излучения от угла приёмной антенны. Получены частотные характеристики для элементарных симметрий, а также показана динамика изменения диаграмм рассеивания для различных ориентаций разнонаправленных элементов. На выбранных характерных точках, в которых показатель прохождения имел максимальное, среднее и минимальное значения, были обнаружены характерные зависимости величины ослабления основного лепестка отраженной волны от частоты падающего излучения и ориентации проводящих структур метаповерхности. Сравнением частотных характеристик установлено влияние структуры метаповерхности на её выходную диаграмму и определена симметрия, обеспечивающая максимальное рассеивание падающей электромагнитной волны, относительный коэффициент ослабления по мощности которой составил $K = 0,23$. Результаты работы могут найти применение при разработке стелс-покрытий и пассивных фазированных антенных решеток

Ключевые слова: метаповерхность, СВЧ, радиопрозрачность, частотные зависимости, коэффициент пропуска

Введение

Метаматериалы — искусственно созданные структуры, демонстрирующие необычные электромагнитные свойства, которые не встречаются в природе, такие как отрицательная диэлектрическая (ϵ) и магнитная проницаемость (μ), что приводит к одному из их главных свойств – отрицательному коэффициенту преломления, который и является основной причиной изменения их диаграмм рассеивания [1-2]. Исследования различного рода метапокрытий обрели популярность в последние годы, их экспериментальным и теоретическим исследованиям посвящено достаточно большое количество работ [3-7]. Подобные структуры предназначаются для снижения эффективной площади рассеивания падающего электромагнитного излучения в различных частотных диапазонах. Интерес к подобным исследованиям вызван необходимостью создания маскирующих покрытий, способных укрывать объект от радиолокационных станций, делая их цель менее видимой при зондировании местности [8]. Конструктивно, подобные структуры представляют

собой набор элементарных резонаторов (метачастиц) одинаковых размеров, расположенных на диэлектрической подложке. В основе работы подобных структур лежит эффект деструктивной интерференции, обусловленный особенностью конструкции, вследствие которой при взаимодействии падающей и отраженной волны наблюдается их взаиморазрушение за счет разности фаз, образованных различными противофазными участками структуры.

Материалы и методы исследования

В качестве материала для получения тестируемых структур использовался стеклотекстолит с двухсторонней медной металлизацией. Формирование топологии проводящей структуры проводилось методом фрезерной обработки на ЧПУ. Элементарная ячейка обладала размерами 18x18 мм и содержала в себе проводящие полосы с размерами, указанными на рис. 1, и толщиной порядка 35 мкм на диэлектрические подложки марки FR4 толщиной 3 мм. Геометрические параметры элементов ячеек выбирались исходя из расчета четвертьволновых размеров расчетной резонансной частоты – 20,5 ГГц, что составляло среднее значение в

рабочем диапазоне используемого для исследования оборудования.

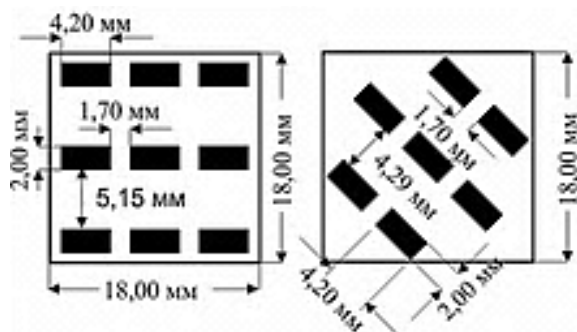


Рис. 1. Размеры исследуемых ячеек

Таким образом, было сформировано четыре типа ячеек: перпендикулярно-ориентированные к вектору E элементы 3×3 (четвертьволновые), а также диагонально-ориентированные 3×2 . Расстояние между соседними проводящими слоями сильно меньше длины волны падающего излучения, что позволяет описывать структуру как метаповерхность. Полученные после обработки ячейки складывались на алюминиевую пластину в матрицу размером 4×4 с различной ориентацией расположения проводящих участков. Общая площадь получаемой структуры составляла $51,84 \text{ см}^2$.

В качестве объекта исследований в данной конкретной работе были выбраны структуры, имеющие шахматно-подобный принцип построения, в котором ячейки различного типа располагаются в шахматном порядке на металлической пластине. Подобный выбор обусловлен наиболее выраженным ослаблением падающей волны, полученным в ходе исследований. Полученные структуры представлены на рисунке ниже.

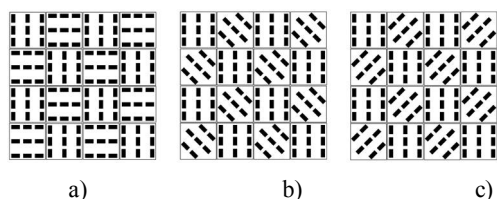


Рис. 2. Шахматно-подобные метаструктуры.

- Вертикально и горизонтально направленные;
- Вертикально и диагонально вправо направленные;
- Вертикально + диагонально влево направленные

Для экспериментального получения диаграмм рассеивания была собрана установка, состоящая из:

- Двух рупорных антенн Пб-30.

- Синтезатора частот G7M-40, выступающего в роли генератора.

- Измерителя мощности PLS-26, выступающего в роли приемника для отраженной и прошедшей волны.

- Диэлектрической подложки для расположения образцов.

Излучающая рупорная антенна подключена к выводу генератора и расположена на расстоянии 7 см от исследованной структуры, формируя линейно поляризованную падающую электромагнитную волну, вектор Пойтинга которой нормален к плоскости структуры. Принимающая антенна, изначально располагающаяся на таком же расстоянии, фиксировала отраженную от структуры мощность в каждой точке, меняя свое положение по полярному углу в пределах $[0 - 180^\circ]$ с шагом в 5° . Сама структура, находясь на пластине алюминия, располагалась на диэлектрической подложке в пространстве между антеннами.

Для получения частотных характеристик в диапазоне $[16 - 25 \text{ ГГц}]$, исследуемая структура располагалась между двух рупорных антенн на диэлектрической подложке без алюминиевой пластины. При этом угол между приемной и излучающей антенной составлял 180° . Блок-схема установки представлена на рисунке ниже.

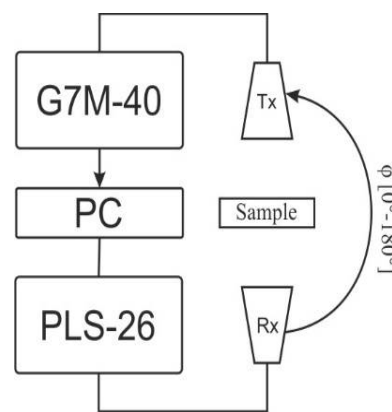


Рис. 3. Блок-схема измерительной установки

- G7M-40 - синтезатор частот, выступающий в роли генератора;

- PLS-26 - измеритель мощности, выступающий в качестве приемника прошедшей волны;

- PC - персональный компьютер;

- Tx - излучающая рупорная антенна Пб-30;

- Rx - приемная рупорная антенна Пб-30;

- Sample - исследуемый образец.

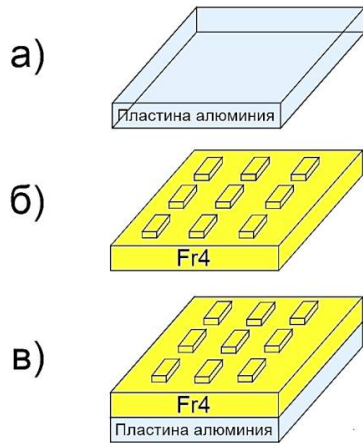


Рис. 4. Экспериментальные облучаемые структуры:
 а) отражающая проводящая пластина;
 б) единичная ячейка метаструктуры;
 в) сборка метаструктура + отражающая пластина

В качестве параметра, выступающего в роли показателя частотного взаимодействия, был выбран коэффициент прохождения T , показывающий во сколько раз уменьшается прошедшая мощность при помещении на пути нормально падающей волны относительно принимаемой мощности при отсутствии образца. По значению данного параметра можно предполагать, насколько сильно электромагнитное излучение взаимодействует со структурой на той или иной частоте - чем ниже значение коэффициента, тем большая часть волны, взаимодействуя с поверхностью метаструктуры, отражается от неё.

$$T = P_{\text{Прои}} / P_{\text{Пад}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{Прои}}$ - мощность, измеренная при установленном образце; $P_{\text{Пад}}$ - при его отсутствии.

Результаты

Из результатов измерений частотных характеристик шахматных метаструктур видна их ярко выраженная частотная зависимость, выраженная в резком падении коэффициента прохождения в определенной полосе частот – 20-22,5 ГГц для структуры, состоящей из вертикальных и горизонтальных элементов, и 20-23,8 ГГц для вертикальных и диагональных элементов. Измерения проводились в диапазоне от 16 до 25 ГГц с шагом в 0,1 ГГц. Полученные результаты представлены на рис. 5.

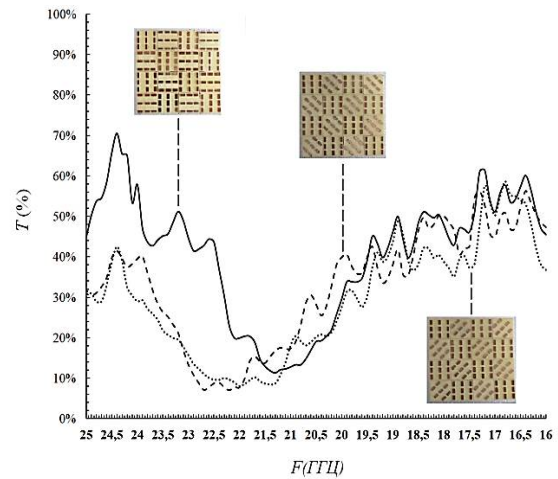


Рис. 5. Частотные зависимости метаструктур

Исходя из частотных зависимостей, для определения их влияния на выходную диаграмму для каждой из структур было выбрано по три частоты:

- частота с низким коэффициентом прохождения (LOW);
- частота со средним показателем по прохождению (AVERAGE);
- частота с высоким показателем прохождения (HIGH).

После чего для каждой из исследуемых структур на этих частотах были построены диаграммы рассеивания, представленные на рис. 6. Из полученных диаграмм можно увидеть, как в зависимости от частотной характеристики изменяется величина основного лепестка – чем ниже значение коэффициента на частотной характеристике, тем более ослабленным будет основной лепесток относительно пластины. Однако стоит отметить, что значения мощностей получены при различных значениях принимаемой мощности падающей волны вследствие частотных характеристик антенны. Поэтому для лучшего понимания картины ослабления сигнала полученные данные даются в относительных величинах – как отношение принимаемых мощностей метаструктур и пластинки при нулевом градусе. Полученные результаты показаны на рис. 7. Как видно из гистограмм, представленные структуры ослабляют отраженную волну в строго обратном направлении, что говорит нам об ослаблении основного лепестка при использовании подобных метаповерхностей. Ослабление наблюдается на всех частотах, однако можно отметить, что уменьшение основного лепестка напрямую зависит от значения коэффициента прохождения метаструктуры на определенной частоте. Также из полученных диаграмм видно, что подобные структуры имеют способ-

ность к переизлучению падающей мощности в направлениях, отличных от нормальных, что выражено в формировании боковых лепестков на диаграмме.

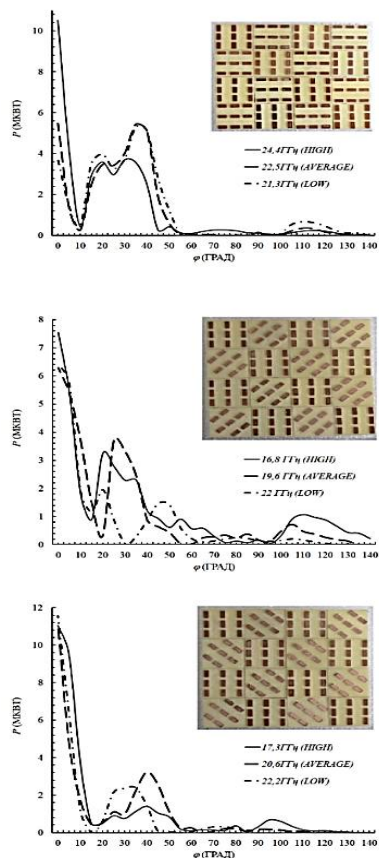


Рис. 6. Диаграммы рассеивания шахматных метаструктур

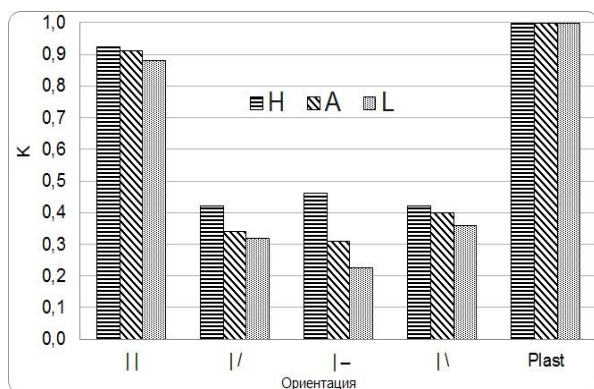


Рис. 7. Относительный коэффициент отражения в зависимости от симметрии

Поступила 13.05.2022; принята к публикации 19.08.2022

Информация об авторах

Мазин Алим Сеит-Аметович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоп физики и электроники, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4), e-mail: mazinovas@cfuv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0834-2390>

Заключение

По итогам проделанной работы было установлено, что ослабляющие способности, а также форма выходной диаграммы рассмотренных шахматных метаповерхностей, сформированных на основе полосковых резонаторов, напрямую зависят от их частотных характеристик и симметрии распределения элементарных ячеек в общей структуре отражающей поверхности.

Литература

1. Withayachumnankul W., Fumeaux C., Abbott D. Compact electric-LC resonators for metamaterials// Optics Express. 2010. Vol.18. pp. 25912-25921.
2. Лобекин В.Н., Татаренко А.С., Бичурин М.И. Методики измерения параметров метаструктур на основе сплит-кольцевых резонаторов // Вестник НовГУ. Сер. Технические науки. 2020. No5 (121). С.25-28. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5\(121\).25-28](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5(121).25-28).
3. A Wideband and Polarization-Independent Metasurface Based on Phase Optimization for Monostatic and Bistatic Radar Cross Section Reduction/ Jianxun Su, Yao Lu, Zengrui Li, Rongrong Zhang, Yaoqing (Lamar) Yang// International Journal of Antennas and Propagation. 2016. Vol. 2016. Article ID 7595921. 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/7595921>
4. Reduction of Radar Cross Section Based on a Metasurface/ Jie Chen, Qiang Cheng, Jie Zhao, Di Sha Dong, and Tie-Jun Cui// Progress In Electromagnetics Research. 2014. Vol. 146. P. 71-76. DOI:10.2528/PIER14022606
5. Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials/ M.Q. Qi, X. Wan, J. Zhao, Q. Cheng // T.J. Cui, Science & Applications. 2014. Vol. 3. Iss. 10. P. e218–e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99
6. Экспериментальные и численные исследования диаграмм обратного рассеяния блоков маскирующих цифровых двухбитных метапокрытий/ А.И. Семенихин, Д.В. Семенихина, Ю.В. Юханов, П.В. Благовисный, И.В. Ильин// Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2021. №24(4). С.57-67.
7. Блочный принцип построения и оценки снижения ЭПР непоглощающих широкополосных 2-битных анизотропных цифровых метапокрытий/ А.И. Семенихин, Д.В. Семенихина, Ю.В. Юханов, П.В. Благовисный, И.В. Ильин// Журнал радиоэлектроники [электронный ресурс]. 2020. №12.
8. A study of microwave radiation absorption in ultrathin conducting films / V.V. Starostenko, V.B. Orlenson, A.S. Mazinov, I.S. Fitaev // Technical Physics. 2020. V.65. No 8. P. 1296–1300.

Фитаев Ибраим Шевкетович – ассистент кафедры радиофизики и электроники, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4), e-mail: fitaev.i@cfuv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2426-3692>

Болдырев Николай Алексеевич – магистр кафедры радиофизики и электроники, Крымский федеральный университет имени В.И. Вернадского (295007, Россия, Республика Крым, г. Симферополь, пр. Академика Вернадского, 4), e-mail: kolyaboldyrev@gmail.com

INFLUENCE OF THE SPATIAL ORIENTATION OF THE CONDUCTING ELEMENTS OF THE COMPOSITE METASURFACE ON THEIR FREQUENCY CHARACTERISTICS AND SCATTERING DIAGRAMS IN THE RF RANGE

A.S. Mazinov, I.Sh. Fitaev, N.A. Boldyrev

Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky, Simferopol, Russia

Abstract: in this work, we considered the diffraction characteristics of checkerboard-like metasurfaces consisting of cells with different orientations of conducting resonators formed from rectangular strip lines symmetrically placed on a dielectric substrate of 18x18 mm size. The linear sizes of the conducting metaparticles were 4.2 mm, the distance between them was 1.7 mm, and the distance between adjacent vertical rows was 5.15 mm. For the diagonal symmetry, the dimensions of the copper resonators remained unchanged, while the distance between parallel rows in it was 4.29 mm. The choice of such geometry is due to the average frequency of the studied range - 20.5 GHz. To obtain experimental data, we used the method of bistatic measurement of the dependence of the level of reflected radiation on the angle of the receiving antenna. We obtained frequency characteristics for elementary symmetries, and showed the dynamics of changes in scattering diagrams for different orientations of multidirectional elements. At the selected characteristic points, in which the transmittance had a maximum, average and minimum value, we found the characteristic dependences of the magnitude of attenuation of the main lobe of the reflected wave on the frequency of the incident radiation and the orientation of the conducting structures of the metasurface. By comparing the frequency characteristics, we established the influence of the metasurface structure on its output diagram and determined the symmetry that provides the maximum scattering of the incident electromagnetic wave, the relative power attenuation coefficient of which was $K = 0.23$. The results of the work can find application in the development of stealth coatings and passive phased antenna arrays

Key words: metasurface, microwave, radio transparency, frequency dependence, transmittance factor

References

1. Withayachumnankul W., Fumeaux C., Abbott D. "Compact electric-LC resonators for metamaterials", *Optics Express*, 2010, vol.18, pp. 25912-25921.
2. Lobekin V.N., Tatarenko A.S., Bichurin M.I. "On the basis of split-ring resonators", *Bulletin of Novgorod State University (Vestnik Novgorodskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2020, no. 5 (121), pp. 25-28. DOI: [https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5\(121\).25-28](https://doi.org/10.34680/2076-8052.2020.5(121).25-28).
3. Jianxun Su, Yao Lu, Zengrui Li, Rongrong Zhang, Yaoqing (Lamar) Yang "A wideband and polarization-independent metasurface based on phase optimization for monostatic and bistatic radar cross section reduction," *Int. J. of Antennas and Propagation*, 2016, vol. 2016, article ID 7595921, 9 p. DOI: <https://doi.org/10.1155/2016/7595921>
4. Jie Chen, Qiang Cheng, Jie Zhao, Di Sha Dong, Tie-Jun Cui "Reduction of radar cross section based on a metasurface," *Progress in Electromagnetics Research*, 2014, vol. 146, pp. 71-76. DOI:10.2528/PIER14022606
5. Cui T.J., Qi M.Q., Wan X., Zhao J., Cheng Q. "Coding metamaterials, digital metamaterials and programmable metamaterials", *Science & Applications*, 2014, vol. 3, iss. 10, pp. e218-e218. DOI: 10.1038/lsa.2014.99
6. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Yu.V., Blagovisnyy P.V., Il'in I.V. "Experimental and numerical studies of backscatter diagrams of blocks masking digital two-bit metapoles", *Radioelectronics (Radioelektronika)*, 2021, no. 24(4), pp. 57-67.
7. Semenikhin A.I., Semenikhina D.V., Yukhanov Y.V., Blagovisnyy P.V. "Block principle of construction and estimation of EPR reduction of non-absorbing broadband 2-bit anisotropic digital meta-covers", *Journal of Radioelectronics*, 2020, no. 12.
8. Starostenko V.V., Orlenson V.B., Mazinov A.S., Fitaev I.S. "A study of microwave radiation absorption in ultrathin conducting films", *Technical Physics*, 2020, vol. 65, no. 8, pp. 1296-1300

Submitted 13.05.2022; revised 19.08.2022

Information about the authors

Alim S.-A. Mazinov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky (4 Akademika Vernadskogo str., Simferopol 295007, Republic of Crimea, Russia), e-mail: mazinovas@cfuv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0834-2390>

Ibraim Sh. Fitaev, Assistant, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky (4 Akademika Vernadskogo str., Simferopol 295007, Republic of Crimea, Russia), e-mail: fitaev.i@cfuv.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2426-3692>

Nikolay A. Boldyrev, MA, Crimean Federal University named after V.I. Vernadsky (4 Akademika Vernadskogo str., Simferopol 295007, Republic of Crimea, Russia), e-mail: kolyaboldyrev@gmail.com

ФОРМИРОВАНИЕ ПАТЧ-АНТЕННЫ ИЗ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ

Е.А. Ищенко¹, С.М. Фёдоров^{1,2}, И.А. Черноиваненко¹, А.В. Бунина¹, Л.В. Сопина¹,
Е.Д. Меньшикова¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается патч-антенна, в конструкцию которой интегрирована солнечная панель, которая используется в роли излучателя вместо полностью металлического излучателя. Для определения характеристик полученной антенны производилось моделирование для сравнения основных характеристик разработанной антенны с базовым полностью металлическим излучателем. Полученные результаты показывают, что использование предложенной конструкции позволяет сохранить высокие качественные показатели антенны, при этом обеспечить генерацию электроэнергии за счет установленного в конструкцию фотоэлемента. Помимо сравнения конструкции с металлическим патч-излучателем, производилось исследование возможности увеличения относительной доли фотоэлемента в площади антенны за счет удаления участков диэлектрика. Полученные результаты показывают, что в таком случае удастся также сохранить качественные показатели излучателя, при этом солнечный элемент занимает уже не 20% от площади антенного элемента, а 42%. Благодаря такой конструкции удастся обеспечить расширение возможностей использования антенных элементов не только как устройств передачи сигналов, а также как источника энергии, которая получается за счет преобразования возобновляемого источника энергии – солнечного света. Благодаря углубленной интеграции антенных элементов и солнечных панелей становится возможным обеспечить расширение функционала антенных систем

Ключевые слова: патч-антенна, солнечная панель, зеленая энергетика

Введение

В современных системах связи участилось использование планарных антенн, так как они обладают малыми размерами, а также позволяют обеспечить всенаправленное излучение одного антенного элемента или сформировать антенную решетку с возможностью управления характеристиками излучения. Планарные антенны формируются на диэлектрических подложках путем формирования проводящей пластины.

Солнечные элементы, как правило, представляют собой полупроводниковую пластину кремния, в которой размещаются проводящие линии для сбора солнечной энергии и превращения в электричество. Таким образом, можно сделать предположение, что благодаря конструкции солнечного элемента становится возможным формировать излучающую пластину из солнечного элемента. Например, в работе [1] авторами предлагается вытравить в солнечной панели патч-излучатель с небольшим подъемом над пластиной солнечной панели, что формирует излучатель со стандартными характеристиками, однако увеличивает высоту антенны.

Другим примером может послужить работа [2], в которой авторы предлагают разместить

F-излучатель над солнечной панелью, что минимизирует перекрытие фотоэлемента, чем удастся сохранить эффективность работы солнечной панели, а также антенного элемента.

В диссертациях [3, 4] рассматриваются все аспекты производства солнечных панелей, а также возможные конструкции антенн, объединенных с солнечными панелями. Таким образом, авторы показывают, что объединение конструкции антенн и солнечных панелей позволяет повысить эффективность использования конструкций устройств благодаря выработке электроэнергии помимо обеспечения базовой задачи передачи информации.

Другим примером является возможность интеграции антенной решетки из патч-антенн в конструкцию солнечной панели [5]. Благодаря такой интеграции становится возможным обеспечить резервное питание оборудованию связи, а также повысить эффективность использования антенной системы.

Таким образом, можно сделать вывод, что использование солнечных панелей в антенных системах позволяет повысить эффективность использования антенных модулей благодаря возможности выработки электроэнергии. В данной работе предлагается конструкция антенны, когда в качестве излучателя патч-антенны применяется солнечный элемент.

Конструкция патч-антенны с солнечным элементом

В качестве базового антенного элемента была выбрана патч-антенна с микрополосковой линией питания на основе, конструкции которой формировался излучатель из солнечного элемента. На рис. 1 приводится изображение базового патч-излучателя и конструкции с использованием солнечного элемента.

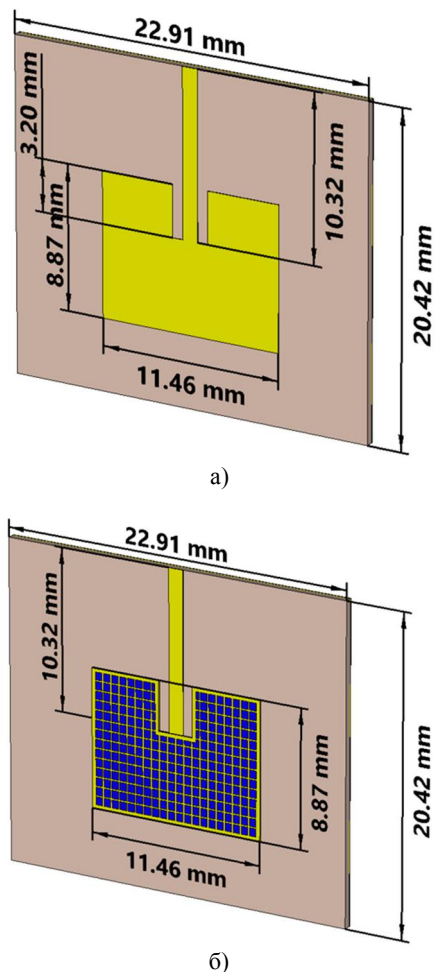


Рис. 1. Исследуемая модель патч-антенны:
а) металлический излучатель;
б) излучатель на основе солнечной панели

Антенный элемент формируется в данном случае на основе диэлектрика Rogers RO4003C толщиной 0.5 мм с толщиной медной пленки в 35 мкм; солнечный элемент же формируется на основе кремниевой пластины ($\epsilon = 11.9$) толщиной 100 мкм с проводящим рисунком для сбора электричества, сгенерированного элементом. На основе такой конструкции было получено, что полная площадь антенного элемента (размеры всей пластины диэлектрика – 20.42x22.91 мм) составила 467.82 мм², а пло-

щадь фотоэлемента – 94.32 мм², что соответствует 20% от площади всей пластины диэлектрика. На основе полученных конструкций проводилось моделирование, результаты которого приведены на рис. 2.

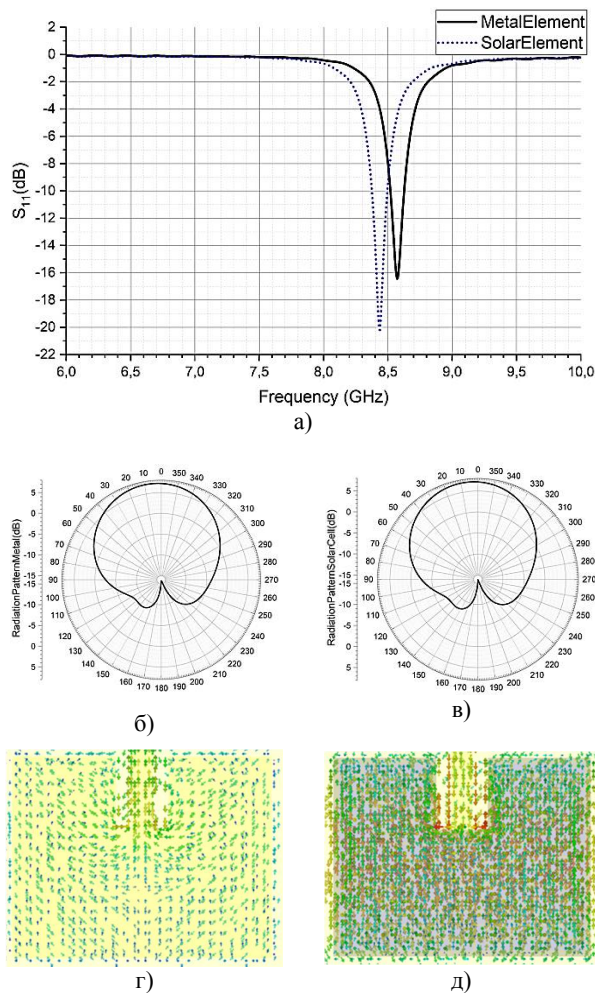


Рис. 2. Результаты моделирования патч-антенн:
а) возвратные потери S_{11} для обоих типов антенн;
б) диаграмма направленности полностью металлического излучателя; в) диаграмма направленности антенного элемента с излучателем из солнечной панели; г) картина поверхностных токов полностью металлического патча; д) поверхностные токи для излучателя с солнечной панелью

Полученные результаты показывают, что на основе солнечного элемента возможно создать патч-излучатель, при этом из-за изменения характеристик проводящей пластины произошло смещение диапазона рабочих частот. Полученные характеристики для сравнения приводятся в табл. 1.

Таблица 1

Характеристики антенны во всех режимах

Характеристика	Металлический патч	Патч на основе фотоэлемента
S_{11} мин, дБ (f_{0Smin} , ГГц)	-16.4 (8.57)	-20.2 (8.43)
Δf , ГГц ($S_{11} = -10$ дБ)	8.52-8.63	8.38-8.49
КНД, дБ	7.26	7.23
Ширина лепестка (3 дБ), °	84.5	84.1
УБЛ, дБ	-15.4	-14.8
КПД, %	68	67

Как видно, характеристики излучения патча на основе солнечной панели схожи с показателями для полностью металлического патча. Также стоит уделить внимание возможности уменьшения площади неиспользованного пространства на диэлектрике. Для этого произведем исследование усеченного патч-излучателя, который приводится на рис. 3.

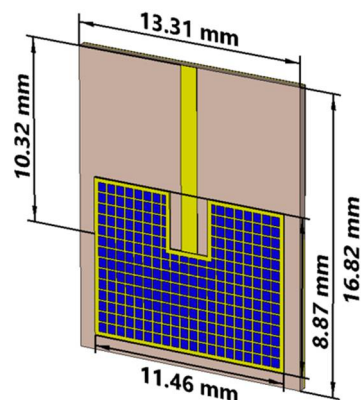


Рис. 3. Усеченный излучатель с уменьшенной диэлектрической пластиной

На основании такого уменьшения было получено, что площадь диэлектрической пластины составляет 223.87 мм² (16.82x13.31 мм). Таким образом, солнечный элемент составляет 42% от полной площади антенны (увеличение доли более чем в 2 раза – было 20%). На основании моделирования были получены характеристики, которые приводятся на рис. 4.

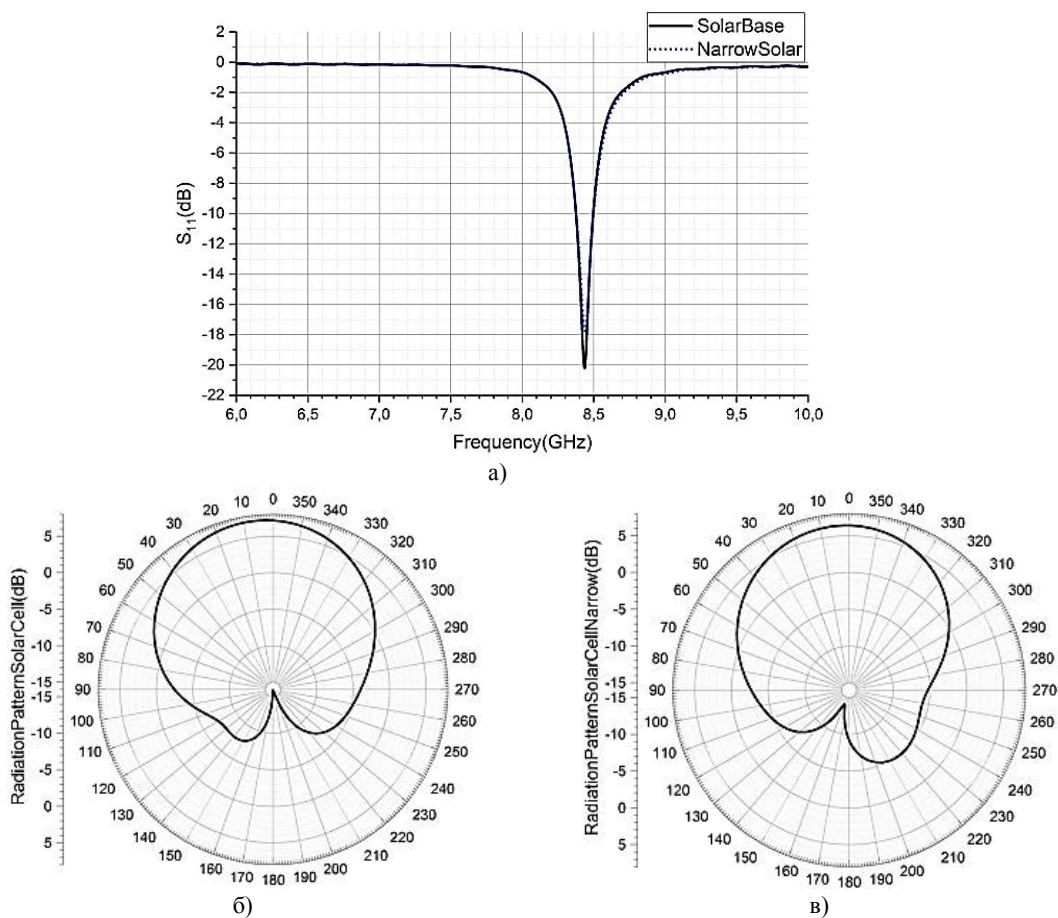


Рис. 4. Результаты моделирования уменьшенного патча:

а) возвратные потери для обоих случаев; б) диаграмма направленности для изначальной антенны с излучателем на основе фотоэлемента; в) диаграмма направленности укороченного элемента

Как видно из результатов, произошло незначительное изменение характеристик излучения, при этом значительно улучшилась эффективность использования поверхности диэлектрика.

На основе полученной антенны становится возможным сформировать антенную решетку, которая позволит обеспечить не только излучение с требуемыми характеристиками, но и обеспечить выработку электроэнергии.

Заключение

Рассмотренная в статье конструкция антенны с излучателем на основе солнечной панели показала, что применение фотоэлемента позволяет обеспечить сохранение характеристик излучения, схожими с оригинальным металлическим патчем, при этом обеспечивается получение электроэнергии на основе альтернативных – зеленых источников питания, что повышает эффективность использования антен-

ных модулей и добавляет новый функционал в процессе их применения.

Литература

1. Integration of Microstrip Patch Antenna With Polycrystalline Silicon Solar Cell / S.V. Shynu, M.J. Roo Ons, P. McEvoy, M.J. Ammann, S.J. McCormack, B. Norton // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009. Vol. 57. No. 12. pp. 3969-3972.
2. O'Conchubhair O., McEvoy P., Ammann M.J. Integration of Antenna Array With Multicrystalline Silicon Solar Cell // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2015. Vol. 14. pp. 1231-1234.
3. O'Conchubhair O. Integration of Antennas and Solar cells for Low Power Wireless Systems // Doctoral Thesis, Technological University Dublin. 2015. 115 p.
4. Roos Ons M.J. Integration of Antennas and Solar Cells for Autonomous Communication Systems // Doctoral Thesis, Technological University Dublin. 2010. 142 p.
5. 5G base station antenna integrated into solar panel / E.A. Ishchenko, A.S. Badaev, A.V. Volodko, S.M. Fedorov // OP Conf. Ser.: Earth Environ. 2022. Vol. 979. 6 p.

Поступила 19.04.2022; принята к публикации 19.08.2022

Информация об авторах

Ищенко Евгений Алексеевич – инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Чернованенко Игорь Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

Бунина Алина Владимировна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: Alina.bunina@list.ru

Сопина Лилия Вячеславовна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: sopina1803@gmail.com

Меньшикова Екатерина Дмитриевна – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: menshulya77@inbox.ru

FORMING A PATCH ANTENNA FROM A SOLAR CELL

E.A. Ishchenko^{1,2}, S.M. Fyedorov^{1,2}, I.A. Chernoiivanenko¹, A.V. Bunina¹, L.V. Sopina¹, E.D. Men'shikova¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers a patch antenna with a solar panel integrated in its design, which is used as an emitter instead of a completely metal one. To determine the characteristics of the resulting antenna, we modelled it to compare the main characteristics of the developed antenna with a basic all-metal radiator. The results obtained show that the use of the proposed design makes it possible to maintain high quality indicators of the antenna, while ensuring the generation of electricity due to the photocell installed in the design. In addition to comparing the design with a metal patch emitter, we studied the possibility of increasing the relative fraction of the photocell in the antenna area by removing dielectric sections. The results obtained show that in this case it is also possible to maintain the quality indicators of the emitter, while the solar cell no longer occupies 20% of the area of the antenna element, but 42%. Thanks to this design, it is possible to expand the possibilities of using an-

tenna elements not only as signal transmission devices, but also as a source of energy, which is obtained by converting a renewable energy source - sunlight. Thanks to the deep integration of antenna elements and solar panels, it becomes possible to expand the functionality of antenna systems

Key words: patch antenna, solar cell, green energy

References

1. Shynu S.V., Roo Ons M.J., McEvoy P., Ammann M.J., McCormack S.J., Norton B. "Integration of microstrip patch antenna with polycrystalline silicon solar cell", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, vol. 57, no. 12, pp. 3969-3972.
2. O'Conchubhair O., McEvoy P., Ammann M.J. "Integration of antenna array with multicrystalline silicon solar cell", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, vol. 14, pp. 1231-1234.
3. O'Conchubhair O. "Integration of antennas and solar cells for low power wireless systems", doctoral thesis, Technological University Dublin, 2015, 115 p.
4. Roos Ons M.J. "Integration of antennas and solar cells for autonomous communication systems", doctoral thesis, Technological University Dublin, 2010, 142 p.
5. Ishchenko E.A., Badaev A.S., Volodko A.V., Fedorov S.M. "5G base station antenna integrated into solar panel", *OP Conf. Ser.: Earth Environ*, 2022, vol. 979, 6 p.

Submitted 19.04.2022; revised 19.08.2022

Information about the authors

Evgeniy A. Ishchenko, engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Igor' A. Chernoiivanenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

Alina V. Bunina, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: Alina.bunina@list.ru

Liliya V. Sopina, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: sopinal803@gmail.com

Ekaterina D. Men'shikova, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: menshulya77@inbox.ru

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ ОБЪЕКТОВ СИСТЕМЫ СОТОВОЙ СВЯЗИ

И.С. Киреев, И.В. Зубарев, В.Л. Бурковский, Е.В. Кощев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрена проблематика обеспечения электромагнитной безопасности в условиях активного взаимодействия распределенных объектов сотовой связи на основе математических моделей предпроектного анализа соответствующих процессов, приведены аналитические выражения для оценки величины электромагнитного излучения, формируемого системами различных стандартов. Проведен краткий анализ литературы по рассматриваемой тематике. Для анализа структуры систем сотовой связи в условиях плотной городской застройки предлагается методика исследования электромагнитного взаимодействия на основе реализации моделей теории длинных линий и телеграфных уравнений. В качестве метода повышения эффективности использования систем сотовой связи в густонаселенных территориях предлагается использование антенных систем с особым видом диаграммы направленности, которые позволяют повысить качество связи в определенных угловых секторах функционирования антенны за счет обеспечения постоянного уровня мощности на приемной стороне, для чего предлагается реализация метода синтеза диаграммы направленности на основе разложения функции в ряд Котельникова. В качестве антенной решетки рассматривается линейная эквидистантная антенная система, состоящая из изотропных излучателей. Приводятся результаты синтеза диаграммы направленности для 12 и 24 излучателей

Ключевые слова: математическое моделирование, электромагнитное взаимодействие, электромагнитная безопасность, теория длинных линий, телеграфные уравнения, ряд Котельникова, диаграмма направленности

Введение

На сегодняшний день с активным использованием технологии 4G, а также развитием стандарта 5G наблюдаются серьезные проблемы в области электромагнитной экологии, а также падение электромагнитной безопасности населения, в результате чего возникает вопрос разработки такой системы, которая обеспечивала бы минимальное пагубное влияние на организм человека и при этом качество связи оставалось бы приемлемым. Для этого необходимо минимизировать электромагнитное взаимодействие на этапе принятия проектных решений при проектировании систем сотовой связи (ССС). В статье [1] на основе изучения и анализа научных трудов автором приведена и в некотором начальном приближении классифицирована проблематика влияния микроволнового излучения сотовой связи на организм человека стандартами GSM 900 и GSM 1800, однако данная статья носит обзорный характер и по большей степени опирается на имеющиеся исследования и публикации по тематике работы, хотя в работе имеются некоторые аналитические соотношения для расчета плотности по-

тока энергии по известным характеристикам. В работе [2] приведены методы анализа влияния сотовой связи на основе теории нечетких множеств, согласно которой производится экспертный опрос и формируется статистика. Результатом статьи являются представленные исследования в виде диаграмм, характеризующих состояние опрошенных. Данный подход для анализа является весьма действенным, однако имеет существенный недостаток – для увеличения его правдоподобия необходимо выполнять большое количество опросов для формирования объективной статистики. Стоит отметить категоричное заявление авторов статьи о вреде сотовой связи на основе полученной статистики. Источник [3] содержит в себе ряд медицинских рекомендаций по использованию сотового телефона, однако рассмотренные статьи не содержат информацию о минимизации электромагнитного излучения со стороны базовой станции (БС) сотовой связи (СС).

На основе приведенного обзора можно утверждать, что затронутая проблема является актуальной в данный момент и требует детального изучения и анализа.

Связь моделей линии электропередач и систем сотовой связи

При анализе некоторых существующих моделей, описывающих электромагнитное взаимодействие, для системы сотовой связи можно провести некий аналог в виде линий электропередач (ЛЭП), которые могут быть представлены эквивалентной схемой и описаны с использованием теории длинных линий при помощи телеграфных уравнений. На рис. 1 приведен сегмент схемы замещения длинной линии [4].

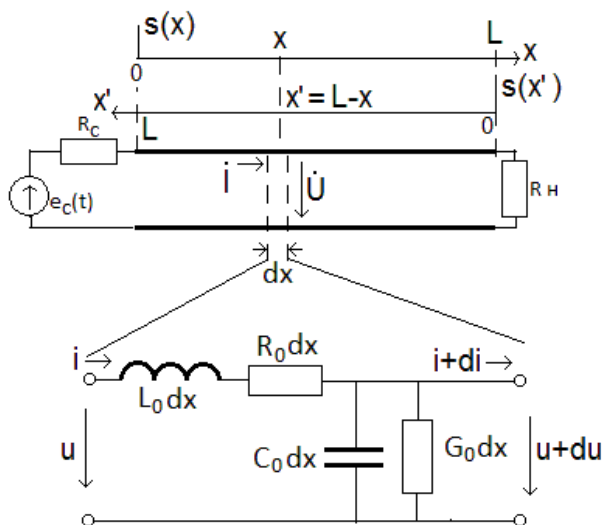


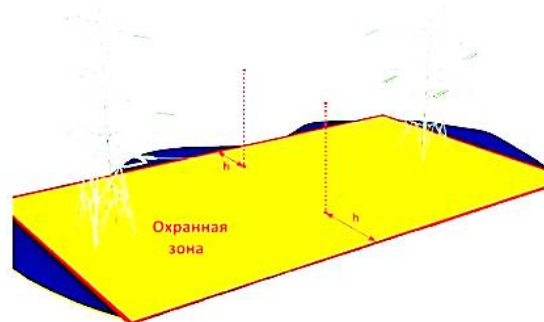
Рис. 1. Схема замещения длинной линии

Обобщенный вид телеграфных уравнений описывается следующим выражением (1)

$$\begin{cases} -\frac{dI(x)}{dx} = j\omega C_0 \dot{U}(x) + G_0 \dot{U}(x), \\ -\frac{d\dot{U}(x)}{dx} = j\omega L_0 I(x) + R_0 I(x), \end{cases} \quad (1)$$

где C_0 – погонная емкость; L_0 – погонная индуктивность; R_0 и G_0 – погонное сопротивление и проводимость соответственно.

На рис. 2а представлена линия электропередач, на рис. 2б приведена структура системы сотовой связи



а) Линия электропередач



б) Система сотовой связи

Рис. 2

На сегодняшний день существуют строгие стандарты, накладывающие ограничения на строительство жилых помещений вблизи линий электропередач (ЛЭП), упомянутые в [5], а сами высоковольтные линии обычно сооружаются за пределами города, таким образом решая некоторые вопросы, связанные с электромагнитной экологией.

В случае проектирования системы сотовой связи возникают некоторые трудности, так как сами сети применяются непосредственно в городе и имеют более сложную топологическую структуру в сравнении с ЛЭП, при этом требуется сохранить качество связи на должном уровне.

Формирование оптимального излучения за счет использования антенн со специальной диаграммой направленности

Для сохранения качества связи стоит использовать известную технологию ММО, позволяющую работать системам сотовой связи с расширенной полосой пропускания и использовать более двух антенн для приема и передачи

данных. Для минимизации уровня излучения имеет смысл использовать антенны базовых станций с особыми видами диаграммы направленности. Сущность их заключается в том, что за счет определенного амплитудно-фазового распределения можно обеспечивать такое оптимальное распределение энергии в пространстве, при котором будет выбран некий компромисс между качеством связи с учетом рельефа местности, а равномерное распределение энергии даст возможность иметь равномерный излучаемый фон на всей обслуживаемой территории. В качестве примера данной антенны можно рассмотреть косекансную диаграмму направленности, которая может быть представлена в виде следующего выражения (2).

$$F(\theta) = \begin{cases} \operatorname{cosec}(\theta), \theta_{н1} \leq \theta \leq \theta_{к1}, \\ \left(\frac{h_a - h_y}{h_a}\right) \operatorname{cosec}(\theta), \theta_{н2} \leq \theta \leq \theta_{к2}, \end{cases} \quad (2)$$

где θ – угол сканирования антенны, h_a – высота расположения антенной решетки над поверхностью земли; h_y – высота «ступеньки», образуемой рельефом; интервал $[\theta_{н1}; \theta_{к1}]$ – первый угловой сектор; $[\theta_{н2}; \theta_{к2}]$ – второй угловой сектор. На рис. 3 приведена иллюстрация, поясняющая выражение (2).

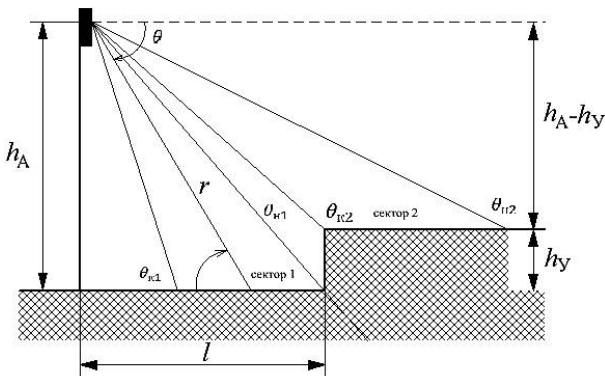


Рис. 3. К пояснению выражения (2)

В качестве излучателя имеет смысл рассмотреть линейную эквидистантную антенную решетку изотропных излучателей. Эталонная диаграмма направленности (ДН), построенная на основе выражения (2), имеет вид, представленный на рис. 4.

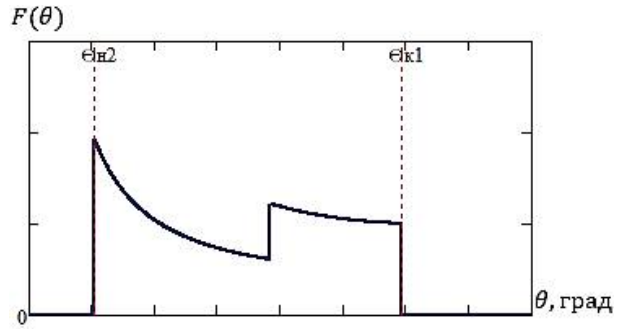


Рис. 4. Эталонная ДН

Для получения диаграммы направленности подобной формы необходимо использовать особый вид амплитудно- фазового распределения. Для чего имеет смысл использовать разложение функции в ряд Котельникова [6] в виде

$$F(u) = \sum_{p=0}^{M-1} N_p \frac{\sin(Mu - \pi p)}{Mu - \pi p}, \quad (3)$$

где $u = \pi d \sin(\theta)/\lambda$, M – число излучателей, образующих эквидистантную антенную решетку, d – расстояние между соседними излучателями, λ – длина волны в свободном пространстве, N_p – коэффициенты разложения (амплитуды и фазы сигналов), θ – угловая координата.

На рис. 5 приведена диаграмма направленности, синтезированная для 12 излучателей. На рис. 6 представлена аналогичная зависимость, но для 24 излучателей. Как видно, с ростом числа излучателей имеется возможность получить диаграмму направленности, максимально приближенную к эталонной.

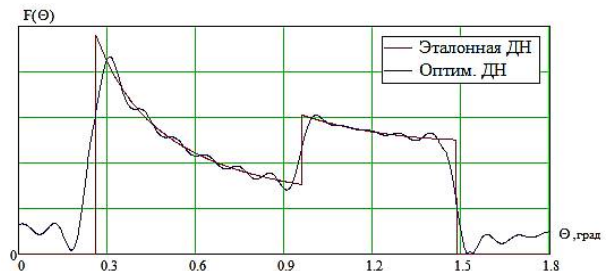


Рис. 5. ДН из 12 излучателей

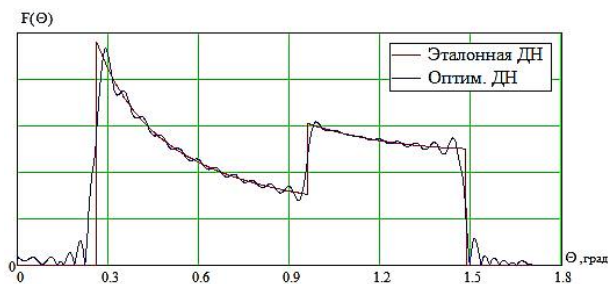


Рис. 6. ДН из 24 излучателей

Модели оценки электромагнитной совместимости

Анализ интенсивности электромагнитного фона является неотъемлемой частью при проектировании системы связи. В основе оценки лежат следующие соотношения:

- интенсивность электромагнитного фона в точке наблюдения

$$Z_{\Sigma} = \sum_{i=1}^N Z_i, \quad (4)$$

где Z_i – значение интенсивности ЭМФ в i -й точке (точке наблюдения), Z_{Σ} – суммарная скалярная интенсивность.

- среднее значение электромагнитной нагрузки B [Вт/м²]

$$B = \frac{\sum_{i=1}^M P_{ei}}{S}, \quad (5)$$

где S – площадь анализируемой территории, на

которой имеются M источников ЭМФ; P_{ei} – эквивалентная изотропно (равномерно) излучаемая мощность.

Вывод

На основе анализа рассмотренной проблематики моделирования электромагнитного взаимодействия, с точки зрения экологической безопасности, предложены модели анализа средств обеспечения улучшения качества связи за счет использования антенн со специальной диаграммой направленности, что позволяет более рационально располагать электромагнитный фон в пространстве. Приведены аналитические модели для оценки электромагнитного фона, необходимые при проектировании систем сотовой связи.

Литература

1. Черных С.В. Анализ влияния микроволнового излучения сотовой связи на человека // НБИ технологии. 2018. Т.12. №3. С.37-47.
2. Вершинин А.Е., Авдоница Л.А. Влияние сотовых телефонов на здоровье человека // Вестник Пензенского государственного университета. 2015. №3 (11). С.175-179.
3. Гаврюченков Д.В., Афанасьев О.Н., Лемещенко Е.Ю. Техногенные электромагнитные поля и безопасность жизнедеятельности: влияние сотового телефона на человека // Медицинская сестра. Актуальная тема. 2017. №2. С.30-32.
4. Попов В.П. Основы теории цепей. М.: Высш. шк., 1985.
5. Кармашев В.С. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник. М.: Изд-во Норт, 2001.
6. Теория электрической связи: учебник для вузов / А.Г. Зюко, Д.Д. Кловский, В.И. Коржик, М.В. Назаров; под ред. Д.Д. Кловского. М.: Радио и связь, 1999. 432 с.

Поступила 20.06.2022; принята к публикации 19.08.2022

Информация об авторах

Киреев Иван Сергеевич – аспирант кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84),

тел.+7 (473) 243-77-20, e-mail: vanchez_kireev@mail.ru

Зубарев Игорь Валентинович – канд. техн. наук, доцент кафедры электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84),

тел.+7 (473) 243-77-20, e-mail: zubarev71@gmail.com

Бурковский Виктор Леонидович – д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электропривода, автоматике и управления в технических системах, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.+7 (473) 243-77-20, e-mail: bvl@vorstu.ru

Кощеев Евгений Владимирович – заместитель начальника отдела технической поддержки пользователей УИТ, Воронежский государственный технический университет (394006 Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел.+7 (908) 137-65-50, e-mail: AdmRT@cchgeu.ru

SIMULATION OF PROCESSES OF ELECTROMAGNETIC INTERACTION OF DISTRIBUTED OBJECTS OF A CELLULAR COMMUNICATION SYSTEM

I.S. Kireev, I.V. Zubarev, V.L. Burkovskiy, E.V. Koshcheev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: are consider the problems of ensuring electromagnetic security in the conditions of active interaction of distributed cellular communication objects on the basis of mathematical models of pre-project analysis of the relevant processes, and give analytical expressions for estimating the magnitude of electromagnetic radiation generated by systems of various standards. We carried out a brief analysis of the literature on the subject under consideration. To analyze the structure of cellular communication systems in conditions of dense urban development, we propose a method for studying electromagnetic interaction based on the implementation of models of the theory of long lines and telegraph equations. As a method for increasing the efficiency of using cellular communication systems in densely populated areas, we offer to use antenna systems with a special type of radiation pattern, which can improve the quality of communication in certain angular sectors of the antenna operation by providing a constant power level on the receiving side, for which it is proposed to implement the pattern synthesis method directivity based on the expansion of the function in a Kotelnikov series. We considered a linear equidistant antenna system consisting of isotropic radiators as an antenna array. Here we give the results of the synthesis of the radiation pattern for 12 and 24 emitters

Key words: mathematical modeling, electromagnetic interaction, electromagnetic safety, theory of long lines, telegraph equations, Kotelnikov series, radiation pattern

References

1. Chernykh S.V. "Analysis of the influence of microwave radiation of cellular communication on a person", *NBI technologies (NBI tekhnologii)*, 2018, vol. 12, no. 3, pp. 37-47.
2. Vershinin A.E., Avdonina L.A. "Influence of cell phones on human health", *Bulletin of Penza State University (Vestnik Penzenskogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2015, no. 3 (11), pp. 175-179.
3. Gavryuchenkov D.V., Afanasiev O.N., Lemeshchenko E.Yu. "Technogenic electromagnetic fields and life safety: the influence of a cell phone on a person", *Nurse. Actual Topic (Meditsinskaya sestra. Aktual'naya tema)*, 2017, no. 2, pp. 30-32.
4. Popov V.P. "Fundamentals of the theory of chains" ("Osnovy teorii tsepey"), Moscow: Vysshaya shkola, 1985.
5. Karmashev V.S. "Electromagnetic compatibility of technical means" ("Elektromagnitnaya sovmestimost' tekhnicheskikh sredstv"), Moscow: Nort, 2001.
6. Zyuko A.G., Kloviskiy D.D., Korzhik V.I., Nazarov M.V., ed. Kloviskiy D.D. "Theory of electrical communication" ("Teoriya elektricheskoy svyazi"), textbook, Moscow: Radio i svyaz', 1999, 432 p.

Submitted 20.06.2022; revised 19.08.2022

Information about the authors

Ivan S. Kireev, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473) 243-77-20, e-mail: vanchez_kireev@mail.ru

Igor' V. Zubarev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473) 243-77-20, e-mail: zubarev71@gmail.com

Viktor L. Burkovskiy, Dr. Sc. (Technical), Professor, Head of the Department of Electric Drive, Automation and Control in Technical Systems, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473) 243-77-20, e-mail: bvl@vorstu.ru

Evgeniy V. Koshcheev, Deputy Head of the Department of Technical Support for Users of IT Department, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (908) 137-65-50, e-mail: AdmRT@cchgeu.ru

ПОГЛОЩАЮЩИЕ СВОЙСТВА ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК НАНОКОМПОЗИТА $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$

О.С. Тарасова¹, А.В. Ситников¹, Ю.Г. Пастернак^{1,2}, Д.С. Погребной¹, О.И. Ремизова¹,
А.Р. Шакуров¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²ЗАО «ИРКОС», г. Москва, Россия

Аннотация: исследованы поглощающие свойства образцов стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$ и многослойных структур $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]_n$, а также квазифрактальные структуры с функциональным покрытием на основе композитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ на лавсановой поверхности частот спектра радиочастот от 1 до 10 ГГц. Показано, что в указанном радиодиапазоне частот спектр резистивного поглощения стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$ и многослойных структур $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$ характеризуется широким Гауссовым пиком на частоте 5 ГГц. Квазифрактальные структуры с функциональным покрытием на основе композитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ на лавсановой поверхности характеризуются суперпозицией двух Гауссовых кривых с резонансной частотой 4 ГГц и 7 ГГц, что связано со структурными особенностями пространственного распределения и фрагментацией функционального покрытия, а величина поглощения - с удельным электрическим сопротивлением гетерогенных пленок. Выявлено, что адсорбция электромагнитного излучения образцами, измеренная в геометрии экрана Солсбери, в диапазоне радиочастот 1 – 10 ГГц для стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$ и многослойных пленок $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$ хорошо описывается в рамках собственного резистивного поглощения

Ключевые слова: поглощение электромагнитного излучения, нанокompозит, функциональные радиопоглощающие покрытия, многослойные структуры, квазифрактальные структуры, $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$, частотно-избирательные поверхности, тонкие пленки

Введение

Широкий интерес к электромагнитным поглотителям волн связан с быстрым развитием электронных и коммуникационных устройств. Создание радиопоглощающих покрытий и материалов (РПП и РПМ) является актуальной задачей в настоящее время, так как позволит избавиться от таких проблем, как загрязнение электромагнитных волн, влияющих на здоровье человека, электромагнитные помехи, электромагнитная совместимость связанных электронных устройств, и проблему радиолокационной заметности [1, 2].

Наиболее простой способ поглощения или отражения электромагнитного излучения (ЭМИ) является резонансный и работает по принципу экрана Солсбери [3]. Многослойный экран Солсбери состоит из плоской резистивной поверхности, которая располагается на расстоянии четверти длины волны (λ) от проводящего металлического экрана. Часть излучения электромагнитной волны сначала отра-

жается от резистивного слоя, затем от металлического экрана, формируя при этом интерференционную картину затухания ЭМИ. Таким образом, мы можем наблюдать подавление падающего излучения. Недостатком такого рода поглотителей электромагнитного излучения является узкая полоса поглощения ЭМИ. Другим ограничением для широкого применения таких структур является достаточно большая толщина. Для расширения полосы поглощения резонансных поглотителей применяют совмещенные экраны Солсбери, что представляет собой многослойный Яумана поглотитель, однако толщина такой структуры по-прежнему не соответствует параметрам широкого применения [4].

В последнее время для проектирования материалов с низким значением коэффициента отражения часто используют поглотители на основе частотно-избирательных поверхностей (ЧИП) [5]. Механизм потерь в таких поглотителях в основном осуществляется за счет наличия резистивных слоев с действительными значениями адмиттанса (комплексной проводимости). Такие структуры состоят из периодически расположенных повторяющихся

элементов, формирующих непрерывную решетку проводящих каналов [6]. Поглощающие свойства электромагнитного излучения ЧИП зависят от рисунка поверхности единичной ячейки, от электрофизических параметров подложки, от геометрических параметров рисунка топологии и размеров таких поверхностей, от используемых материалов в качестве проводящего слоя. Поглощающие поверхности на основе частотно-избирательных решеток (ЧИР) могут значительно превышать значения поглощения ЭМИ по сравнению с многослойными конструкциями [7,8]. В данной работе были получены пленки нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ и многослойные системы на его основе на поверхности стеклоткани с различным рисунком плетения, также были изготовлены частотно-избирательные

решетки с распределенной резистивной нагрузкой на поверхности полимерной подложки со сложным фракталоподобным рисунком структуры.

Образцы и методика эксперимента

Для проведения исследования свойств и параметров покрытий, поглощающих электромагнитное излучение, в данной работе было получено 2 вида функциональных структур с различным пространственным распределением композиционной пленки.

Первым видом пространственно структурированного материала была стеклоткань с различным шагом и рисунком плетения полотна, параметры стеклотканевых подложек приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры стеклоткани

Вид стеклоткани	Основа	Диаметр нити, мкм	Шаг плетения вдоль, мкм	Шаг плетения поперек, мкм	Примечание
1	стеклонить	6	700	700	Равномерный квадрат
2	стеклонить	7	350	3300	Длинные поперечные нити и короткие долевые
3	стеклонить	10	-	-	Хаотическое расположение с прошивкой шагом 8 мм, наибольшая возможная длина нити 15 мм.
4	капрон	30	105	170	Длинные поперечные нити и короткие долевые

Для получения образца поглотителя ЭМИ полотно стеклоткани размером 1200x250 мм² закреплялось на карусели распылительной установки, после чего методом ионно-лучевого распыления производилось осаждение нанокompозиционных пленок $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$. Для увеличения

удельного сопротивления функционального слоя в процессе синтеза пленок в инертный рабочий газ (Ar) циклически добавлялся кислород с различным парциальным давлением. Параметры получения нанокompозиционных пленок и многослойных гетероструктур на поверхности стеклоткани приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры напыления							
№	Состав пленки	Вид стеклоткани	Время напыления, мин	U анода, кВ	Ток плазмы, mA	Циклическое добавление O ₂	Парциальное давление O ₂ , %
1481	(Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀) _{58,5} (SiO ₂) _{41,5}	1	438	2,6	100	Нет	0
1482			480	2,6	100	Нет	0
1483	{[(Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀) _{58,5} (SiO ₂) _{41,5}]/[(Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀) _{58,5} (SiO ₂) _{41,5} +O ₂]} _n	1	480	2,4	104	Да	8.3
1484			500	2,4	100	Да	8.3
1485	{[(Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀) _{58,5} (SiO ₂) _{41,5}]/[(Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀) _{58,5} (SiO ₂) _{41,5} +O ₂]} _n	1	480	2,5	90	Да	13.3
1486			490	2,5	90	Да	13.3
1487	{[(Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀) _{58,5} (SiO ₂) _{41,5}]/[(Co ₄₀ Fe ₄₀ B ₂₀) _{58,5} (SiO ₂) _{41,5} +O ₂]} _n	2	490	2,2	80	Да	13.3
1488			480	2,4	100	Да	13.3

После получения пленки композита стеклотканное полотно раскраивалось на 4 заготовки размером 220x220 мм², из которых путем проведения стандартных технологических приемов изготавливался функциональный образец конструкционного стеклотекстолита. Характеристики стеклопакета представлены в табл. 3.

Таблица 3
Характеристики полученных стеклотекстолитов

№	№ партий	Вид стеклоткани	Число слоев	Толщина пакета, мм
1	1481/1482	1	3	0,40
2	1483/1484	1	3	0,40
3	1485/1486	1	3	0,40
4	1487/1488	2	3	0,70
5	1489/1490	3	3	2,30
6	1491/1492	4	3	0,25

Второй вид пространственного распределения композиционной пленки, это квазифрактальная топология поверхности функциональной структуры на основе частотно-избирательных решеток. На основе математических расчетов, использующих концепцию бесконечной периодической решетки и модели канала Флоке, оптимизированы геометрические (рис. 1) и резистивные параметры резистивных ЧИР. В работе [9] показано, что структура имеет прекрасные поглощающие параметры в широком частотном диапазоне (рис. 2).

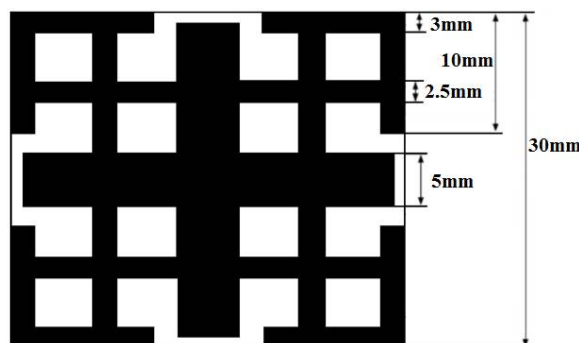


Рис. 1. Топология частотно-избирательной решетки с крестообразной формой элементов

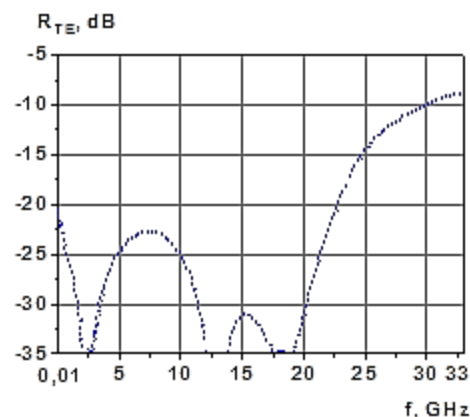


Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента отражения квазифрактального поглотителя

Используя полученные теоретические параметры для поглотителей на основе ЧИР, выполненные нашими коллегами, нами были получены и исследованы резистивные ЧИР, где в качестве резистивного материала использовался композит (Co₄₀Fe₄₀B₂₀)_x(SiO₂)_{100-x}. Выбор композита в качестве резистивного слоя обусловлен как простотой изменения удельного электрического сопротивления гетерогенного покрытия путем варьирования соотношений диэлектрической и металлической компонент, так

и замечательными высокочастотными магнитными свойствами $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ [10].

В качестве подложки для получения ЧИР использовалась пленка лавсана толщиной 0,125 мм. Пленка нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ осаждалась методом ионно-лучевого напыления. Для получения заданной топологии ЧИР (рис. 1) применялся метод лазерной резки подложки с нанесенным функциональным покрытием. Состав пленок изменялся путем варьирования площади металлической (сплав $\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20}$) и диэлектри-

ческой (SiO_2) компонент составной мишени. Полученные образцы представляли собой панель размером 370x370 мм².

Элементный состав нанокompозита определялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭДРС) с использованием рентгеновской приставки Oxford INCA Energy 250 на сканирующем электронном микроскопе JEOL JSM-6380 LV. Состав и электрические параметры функциональных слоев ЧИР представлены в табл. 4.

Таблица 4

№ партии напыления	Состав	h, мкм	ρ , Ом*м	ρ , Ом/□
1776-1777	$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$	1.5	4×10^{-5}	25
1790-1791	$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{72,4}(\text{SiO}_2)_{27,6}$	1.7	1.9×10^{-5}	11
1792-1793	$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$	1.5	6.1×10^{-5}	41
1796-1797	$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{53,1}(\text{SiO}_2)_{46,9}$	1.4	2.13×10^{-4}	152
1798-1799	$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{47,6}(\text{SiO}_2)_{52,4}$	1.4	3×10^{-3}	2178
1802-1803	$(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$	1.4	2.4×10^{-5}	17
1805	Ti	0.4	1.8×10^{-6}	4.5

Для экспериментального исследования коэффициента поглощения образцов было проведено измерение параметра S_{11} (отражение) с помощью рупорной антенны, в геометрии экрана Солсбери. Коэффициент S_{11} был измерен с помощью векторного анализатора цепей в диапазоне частот 1-10 ГГц. Широкополосная рупорная антенна была установлена вплотную к измеряемым образцам. Образцы закреплялись на отражающей металлической поверхности. Воздушный зазор между образцом и металлической поверхностью изменялся путем внесения пластин пенополистирола различной толщины.

Обсуждение результатов

Экран Солсбери представляет собой слой диэлектрика некоторой толщины, нанесенный на металлическую поверхность. Если пренебречь собственным поглощением образцов, то основным механизмом поглощения в данной геометрии является интерференция между двумя отраженными волнами при выполнении условия, что зазор между отражающими поверхностями (h) составляет четверть длины волны. В случае если материал зазора является активным к электромагнитному излучению, тогда на интерференционное поглощение бу-

дет накладываться собственное поглощение в образце и вид зависимости $L(f, h)$ значительно усложнится.

Изучены частотные зависимости L для образцов на основе стеклоткани с функциональным нанокompозиционным покрытием (табл. 2). В качестве примера на рис. 3 представлены зависимости $L(f)$ для стеклотекстолита, изготовленного из стеклоткани 1 с тонкопленочным покрытием на основе нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$ при различных толщинах воздушного зазора.

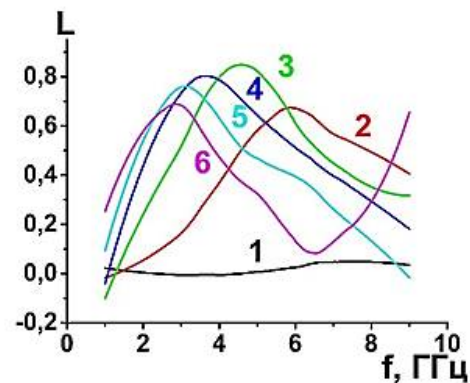


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента поглощения стеклотекстолита, изготовленного из стеклоткани 1 с тонкопленочным покрытием на основе нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$ с толщиной прослойки: 1 – 0 мм; 2 – 4 мм; 3 – 8 мм; 4 – 12 мм; 5 – 16 мм; 6 – 20 мм

Анализ полученных зависимостей показывает, что при величине зазора 0 мм (образец соприкасается с металлической пластиной) мы не наблюдаем поглощения или оно незначительно. Это возможно тогда, когда изменение L обусловлено только диэлектрической компонентой электромагнитной волны. В этом случае максимальное поглощение активной структуры будет наблюдаться при максимальной напряженности E в плоскости образца, т.е. при условии $\lambda/4$ в воздушном зазоре. Это сов-

падает с условием интерференционного поглощения экрана Солсбери.

Во всех случаях, когда $h_n \neq 0$, кривые $L(f)$ имеют широкий спектр поглощения с максимумом, положение которого определяется воздушным зазором между образцом и металлическим отражающим экраном. Если соотнести $L_{max}(f)$ для различных образцов, то данный параметр коррелирует с величиной удельного сопротивления композиционной пленки, как показано в табл. 5.

Таблица 5

Величина L_{max} для стеклотекстолита, изготовленного из стеклоткани с тонкопленочным покрытием на основе нанокompозита $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}$

Состав	Парциальное давление O_2 , %	$\rho \cdot 10^{-5}$, Ом*м	L_{max}
$(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}$	0	1,05	0.84
$\{[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}]/[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}+O_2]\}_n$	8.3	3,97	0.76
$\{[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}]/[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}+O_2]\}_n$	13.3	21,7	0.52
$\{[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}]/[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}+O_2]\}_n$	13.3	21,7	0.53

Если сопоставить удвоенное значение коэффициента поглощения, определенное двухрупорным методом, и L образцов, измеренных в геометрии Солсбери (табл. 6), то видно, что

основной вид адсорбции электромагнитного излучения в последнем случае происходит за счет поглощения материалом функционального покрытия.

Таблица 6

Параметры $2L$ и L_{max} для стеклотекстолита, изготовленного из стеклоткани с тонкопленочным покрытием на основе нанокompозита $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}$, измеренные двухрупорным методом и в геометрии Солсбери

Состав	Парциальное давление O_2 , %	$2L$	L_{max}
$(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}$	0	0,78	0.84
$\{[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}]/[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}+O_2]\}_n$	8.3	0,74	0.76
$\{[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}]/[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}+O_2]\}_n$	13.3	0,50	0.52
$\{[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}]/[(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{58,5}(SiO_2)_{41,5}+O_2]\}_n$	13.3	0,46	21,7

Изучены частотные зависимости L для квазифрактальных структур с функциональным покрытием из пленки композита $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_x(SiO_2)_{100-x}$ на лавсановой подложке (табл. 4). В качестве примера на рис. 4 приведена зависимость $L(f)$ для образца из пленки композита $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{66,1}(SiO_2)_{33,9}$ при различных значениях h .

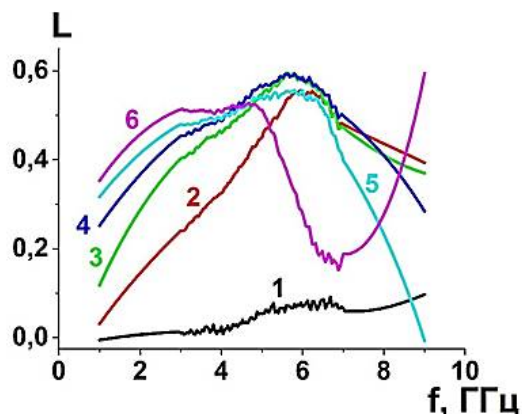


Рис. 4. Частотные зависимости коэффициента поглощения квазифрактальных структур на лавсановой подложке с функциональным покрытием из пленки композита $(Co_{40}Fe_{40}B_{20})_{66,1}(SiO_2)_{33,9}$ с толщиной прослойки: 1 – 0 мм; 2 – 4 мм; 3 – 8 мм; 4 – 12 мм; 5 – 16 мм; 6 – 20 мм

Частотные зависимости коэффициента поглощения квазифрактальных структур с функциональным покрытием из пленки композита имеют достаточно широкий (не Гауссовый) спектр, что может свидетельствовать о суперпозиции нескольких резонансных кривых. Действительно, измеренные зависимости хорошо аппроксимируются наложением двух резонансных кривых Гауссового распределения. На рис. 5 приведена зависимость $L(f)$ для композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$ на лавсановой подложке с толщиной прослойки 8 мм. Аппроксимация была выполнена в программе OriginLab. В расчетах использовали линейное вычитание фона из зависимостей $L(f)$.

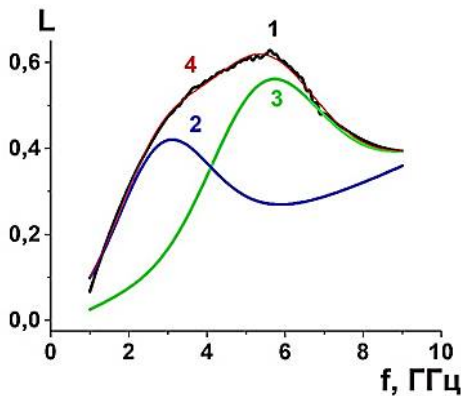


Рис. 5. Частотные зависимости коэффициента поглощения квазифрактальных структур с функциональным покрытием из пленки композита $\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$ на лавсановой подложке с толщиной прослойки 8 мм (1), рассчитанные резонансные кривые Гауссовым распределением (2, 3) и аппроксимационная зависимость (4)

Анализ приведенных резонансных кривых показывает, что для квазифрактальных структур в диапазоне удельных электрических сопротивлений функциональных пленок композитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ от $4.75 \cdot 10^{-6}$ до $7.66 \cdot 10^{-5}$ Ом*м наблюдаются два резонансных максимума при частотах ≈ 3 и 6 ГГц (рис. 6). Данный эффект может быть связан с квазифрактальной структурой функционального покрытия. Если взять элемент структуры с наибольшим характеристическим размером (длиной ~ 3 см) и считать его полуволновым резонатором, то на данной частоте с данными геометрическими размерами мы будем наблюдать резонанс с значением $\epsilon_{\text{эф}} \approx c/2af$, где a – характеристический размер квазифрактальной структуры, c – скорость света. Тогда $\epsilon_{\text{эф}} = [3 \cdot 10^{10} / (3 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 10^9)]^2 \approx 2.8$, что является достаточно реалистической величиной для зна-

чений диэлектрической проницаемости лавсановой подложки ($3.1 \div 3.2$). Можно заметить, что следующий по размерам элемент структуры имеет размер в два раза меньше, следовательно, он будет выступать полуволновым резонатором на частоте ~ 6 ГГц, что мы и наблюдаем в эксперименте.

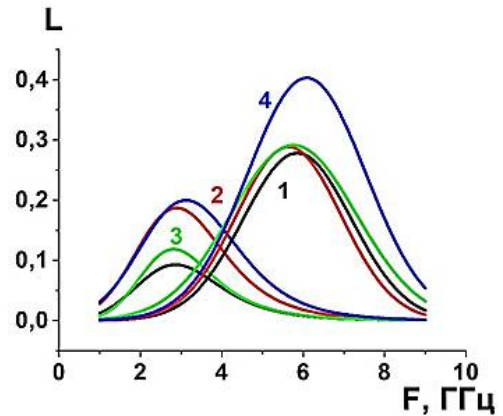


Рис. 6. Аппроксимация частотной зависимости коэффициента поглощения квазифрактальных структур с функциональным покрытием из пленки композита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{66,1}(\text{SiO}_2)_{33,9}$ на лавсановой подложке с толщиной прослойки: 1 – 4 мм; 2 – 8 мм; 3 – 12 мм; 4 – 16 мм

При больших значениях $\rho > 1.5 \cdot 10^{-3}$ Ом*м резонансные свойства функциональной структуры утрачиваются, и мы наблюдаем изменение положения пика с увеличением размера зазора как в структурах со стеклотекстолитом. При малых значениях $\rho < 2.9 \cdot 10^{-6}$ Ом*м резонанс наблюдается только при частоте ~ 6 ГГц.

Заключение

Обнаружено, что в диапазоне частот 1 – 10 ГГц спектр резистивного поглощения стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$ и многослойных структур $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}] / [(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5} + \text{O}_2]\}_n$ характеризуется широким Гауссовым пиком на частоте 5 ГГц. Квазифрактальные структуры с функциональным покрытием на основе композитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ на лавсановой поверхности характеризуются суперпозицией двух Гауссовых кривых с резонансной частотой 4 ГГц и 7 ГГц, что связано со структурными особенностями пространственного распределения и фрагментации функционального покрытия, а величина по-

глошения с удельным электрическим сопротивлением гетерогенных пленок.

Показано, что адсорбционные свойства образцов, измеренных в геометрии экрана Солсбери, в диапазоне частот 1 – 10 ГГц для стеклотекстолита с нанесенным функциональным покрытием из нанокompозита $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}$ и многослойных пленок

$\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58,5}(\text{SiO}_2)_{41,5}+\text{O}_2]\}_n$ хорошо описываются в рамках собственного резистивного поглощения. При интерпретации частотных зависимостей коэффициента поглощения для квазифрактальных структур на лавсановой поверхности с функциональным покрытием на основе композитов $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ определяющую роль имеют характеристические размеры элементов квазифрактальной структуры.

Литература

1. Interference analysis of UHF RFID systems / D.Y. Kim, H.-G. Yoon, B.-J. Jang, J.-G. Yook // Prog. Electromagn. Res. B. 2008. V. 4. P. 115–126.
2. Lazaro A., Girbau D., Villarino R. Effects of interferences in UHF RFID systems // Prog. Electromagn. Res. 2009. V. 98. P. 425–443.
3. Fante R.L. and McCormack M.T. Reflection properties of the Salisbury screen// IEEE Trans. Antennas Propag. 1988. V. 36. № 10. P. 1443–1454.

4. Munk B., Munk P., Prior J. On Designing Jaumann and Circuit Analog Absorbers (CA Absorbers) for Oblique Angle of Incidence// IEEE Transaction on Antennas and Propagation 2015. V. 55. № 1. P. 111-117.

5. Broad bandwidth of thin composite radar absorbing structures embedded with frequency selective surfaces/ H. Xu, Sh. Bie, Y. Xu, W. Yuan, Q. Chen, J. Jiang // Composites Part A: Appl. Science and Manufacturing. 2015. Vol.80. P. 111-117.

6. Антипов С.А., Латыпова А.Ф., Пастернак Ю.Г. Исследование конструкций квазифрактального радиопоглопителя на основе частотно-избирательных решеток с распределенными потерями // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2014. Т. 10. № 5. С 103-108.

7. High-frequency properties of multilayer systems based on the $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ and $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_x(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-x}$ nanocomposites/ H. Al Azzavi, Y. Kalinin, A. Sitnikov, O. Tarasova // Solid State Phenomena. 2015. V. 233-234. P. 467-470.

8. Influence of Oxidized Interlayers on Magnetic Properties of Multilayer Films Based on Amorphous Ferromagnet–Dielectric Nanocomposites/ H.S.M. AlAzzavi, A.B. Granovskii, Yu.E. Kalinin, V.A. Makagonov, A.V. Sitnikov, O.S. Tarasova // Physics of the Solid State. 2016. V. 58. № 5. P. 938–945.

9. Латыпова А.С. Сверхширокополосные радиопоглощающие структуры с сосредоточенными и распределенными диссипативными элементами: дис. ... канд. техн. наук. Воронеж, 2014. 171 с.

10. Нелинейные явления в нано- и микрогетерогенных системах/ С.А. Гриднев, Ю.Е. Калинин, А.В. Ситников, О.В. Стогней. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2012. 352 с.

Поступила 25.05.2022; принята к публикации 19.08.2022

Информация об авторах

Тарасова Оксана Сергеевна – инженер 1 категории кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: oksanatarasova.vorstu@gmail.com, тел.: +7-908-141-80-49

Ситников Александр Викторович – д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физики твердого тела, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел.:+7-919-241-12-01, e-mail: sitnikov04@mail.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84); ведущий инженер, ЗАО «ИРКОС» (129626, Россия, г. Москва, Звездный бульвар, д. 21), e-mail: pasternakug@mail.ru

Погребной Денис Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. 8-951 551 6415, e-mail: denis2371@gmail.com

Ремизова Оксана Ивановна – канд. физ.-мат. наук, доцент кафедры физики, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: oxana.remizova@gmail.com

Шакуров Александр Рустамович – инженер Центра поддержки технологий и инноваций, магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. 8-915-588-52-25, e-mail: aleks.shakurov@mail.ru, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8471-2392

ABSORBING PROPERTIES OF FUNCTIONAL STRUCTURES BASED ON $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_x(\text{SiO}_2)_{100-x}$ NANOCOMPOSITE FILMS

O.S. Tarasova¹, A.V. Sitnikov¹, Yu.G. Pasternak^{1,2}, D.S. Pogrebnoy¹, O.I. Remizova¹, A.R. Shakurov¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia
²JSC “IRKOS”, Moscow, Russia

Abstract: we studied absorbing properties of fiberglass samples coated with a functional coating of nanocomposite $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58.5}(\text{SiO}_2)_{41.5}$ and multilayer structures $[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58.5}(\text{SiO}_2)_{41.5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58.5}(\text{SiO}_2)_{41.5}+\text{O}_2]_n$ as well as quasi-fractal structures with a functional coating based on $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_X(\text{SiO}_2)_{100-X}$ composites on a lavesan surface in the radio frequency range from 1 to 10 GHz. We show that in the specified radio frequency range, the resistive absorption spectrum of glass fiber with a functional coating of nanocomposite $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58.5}(\text{SiO}_2)_{41.5}$ and multilayer structures $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58.5}(\text{SiO}_2)_{41.5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58.5}(\text{SiO}_2)_{41.5}+\text{O}_2]\}_n$ has a broad Gaussian peak at 5 GHz. Quasifractal structures with a functional coating based on $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_X(\text{SiO}_2)_{100-X}$ composites on a lavesan surface are characterized by a superposition of two Gaussian curves with a resonant frequency of 4 GHz and 7 GHz, which is associated with the structural features of the spatial distribution and fragmentation of the functional coating, and the absorption value with electrical resistivity of heterogeneous films. We found that the adsorption of electromagnetic radiation by samples, measured in the geometry of the Salisbury screen, in the frequency range of 1–10 GHz for fiberglass with a functional coating of the nanocomposite $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58.5}(\text{SiO}_2)_{41.5}$ and multilayer films $\{[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58.5}(\text{SiO}_2)_{41.5}]/[(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_{58.5}(\text{SiO}_2)_{41.5}+\text{O}_2]\}_n$ are well described in terms of intrinsic resistive absorption

Key words: absorption of electromagnetic radiation, nanocomposite, functional radio-absorbing coatings, multilayer structures, quasi-fractal structures, $(\text{Co}_{40}\text{Fe}_{40}\text{B}_{20})_X(\text{SiO}_2)_{100-X}$, frequency-selective surfaces, thin films

References

1. Kim D.Y., Yoon H.-G., Jang B.-J., Yook J.-G. “Interference analysis of UHF RFID systems”, *Prog. Electromagn. Res. B.*, 2008, vol. 4, pp. 115–126.
2. Lazaro A., Girbau D., Villarino R. “Effects of interferences in UHF RFID systems”, *Prog. Electromagn. Res.*, 2009, vol. 98, pp. 425–443.
3. Fante R.L., McCormack M.T. “Reflection properties of the Salisbury screen”, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 1988, vol. 36, no. 10, pp. 1443–1454.
4. Munk B., Munk P., Prior J. “On designing Jaumann and circuit analog absorbers (CA absorbers) for oblique angle of incidence”, *IEEE Transaction on Antennas and Propagation*, 2015, vol. 55, no. 1, pp. 111–117.
5. H. Xu, Sh. Bie, Y. Xu, W. Yuan, Q. Chen, J. Jiang “Broad bandwidth of thin composite radar absorbing structures embedded with frequency selective surfaces”, *Composites Part A: Appl. Science and Manufacturing*, 2015, vol. 80, pp. 111–117.
6. Antipov S.A., Latypova A.F., Pasternak Yu.G. “Research of designs of quasi fractal radar absorber based on frequency selective surfaces with distributed losses”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2014, vol. 10, no. 5, pp. 103–108.
7. Al Azzavi H.S.M., Kalinin Y., Sitnikov A., Tarasova O. “High-frequency properties of multilayer systems based on the $(\text{Co}_{41}\text{Fe}_{39}\text{B}_{20})_X(\text{SiO}_2)_{100-X}$ and $(\text{Co}_{45}\text{Fe}_{45}\text{Zr}_{10})_X(\text{Al}_2\text{O}_3)_{100-X}$ nanocomposites”, *Solid State Phenomena*, 2015, vol. 233–234, pp. 467–470.
8. Al Azzavi H.S.M., Granovskii A.B., Kalinin Yu.E., Makagonov V.A., Sitnikov A.V., Tarasova O.S. “Influence of oxidized interlayers on magnetic properties of multilayer films based on amorphous ferromagnet–dielectric nanocomposites”, *Physics of the Solid State*, 2016, vol. 58, no. 5, pp. 938–945.
9. Latypova A.S. “Ultra-wideband radio absorbing structures with lumped and distributed dissipative elements” (“Sverkhshirokopolosnye radiopogloshchayushchie struktury s sosredotochennymi i raspredelennymi dissipativnymi elementami”), Cand. of Tech. Sci. diss., Voronezh, 2014, 171 p.
10. Gridnev S.A., Kalinin Yu.E., Sitnikov A.V., Stogney O.V. “Nonlinear phenomena in nano- and microheterogeneous systems” (“Nelineynye yavleniya v nano- i mikroheterogennykh sistemakh”), Moscow: BINOM. Laboratoriya znaniy, 2012, 352 p.

Submitted 25.05.2022; revised 19.08.2022

Information about the authors

Oksana S. Tarasova, First category engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: oksanatarasova.vorstu@gmail.com, tel.: +7-908-141-80-49
Aleksandr V. Sitnikov, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7-919-241-12-01, e-mail: sitnikov04@mail.ru
Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); Leading Engineer of JSC “IRKOS” (21 Zvezdnyy ave., Moscow 129626, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru
Denis S. Pogrebnoy, graduate student, Voronezh Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 951 551 6415, e-mail: denis2371@gmail.com
Oksana I. Remizova, Cand. Sc. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: oxana.remizova@gmail.com
Aleksandr R. Shakurov, engineer, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7-915-588-52-25, e-mail: aleks.shakurov@mail.ru, ORCID-ID: 0000-0002-8471-2392

**О ВЛИЯНИИ РАЗРЕЖЕНИЯ В КОНТАКТНОМ ЗАЗОРЕ НА КИНЕТИКУ
АВТОВАКУУМИРОВАНИЯ ПРИ ДИФФУЗИОННОЙ СВАРКЕ ТИТАНА**

А.Б. Булков, В.В. Пешков, И.Б. Корчагин, Г.В. Селиванов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: целью данной работы являлось исследование влияния разрежения воздуха в сварочной камере на развитие процесса автовакуумирования зазора между контактными поверхностями при диффузионной сварке. Исследования проводились на цилиндрических образцах диаметром 16 мм из титанового сплава ОТ4 и армко-железа, собранных с зазором 0,1 мм. На поверхности образцов из армко-железа путем отжига предварительно формировались оксидные пленки толщиной 70 мкм. Отжиг образцов осуществлялся в вакууме от 10^{-2} до 2,6 Па в интервале температур от 525 до 600 °С. По результатам изменения интерференционной окраски образцов из армко-железа и эллипсометрических измерений после вакуумного отжига определяли уменьшение толщины оксидной пленки. Установлено, что процессу растворения оксидного слоя на поверхности армко-железа предшествует некоторый период времени, названный инкубационным, в течение которого давление в контактном зазоре падает до давления упругости диссоциации оксидов железа. Длительность инкубационного периода растет с увеличением давления в вакуумной камере и существенно снижается с повышением температуры. Обработка экспериментальных данных показывает, что процесс автовакуумирования контактного зазора контролировался диффузией кислорода в титане. По результатам проведенных исследований получены зависимости, позволяющие оценивать время автовакуумирования контактного зазора в зависимости от степени разрежения воздуха и температуры нагрева

Ключевые слова: титан, охрупченные слои, автовакуумирование, контактный зазор

Введение

При диффузионной сварке титана и его сплавов одним из основных условий получения качественного соединения, характеризуемого равнопрочностью основному металлу при минимальной накопленной деформации свариваемых заготовок, является формирование физического контакта между поверхностями, свободными от оксидов и обладающими высокой реакционной способностью к образованию металлических связей, т.е. схватыванию [1, 2].

При развитии физического контакта между заготовками, на свариваемых поверхностях которых присутствует оксидная фаза, образующаяся при нагреве в результате взаимодействия титана с остаточными газами вакуумированного пространства, а также с адсорбированными его поверхностными слоями газа и влаги, происходит формирование межфазной границы, содержащей субоксиды и являющейся устойчивым барьером, препятствующим развитию процесса сварки [3, 4].

Учитывая высокую активность титана и устойчивость образующихся оксидов (упру-

гость диссоциации при комнатной температуре составляет $1,3 \cdot 10^{-44}$ Па), а также ограниченные технические возможности получения разрежения воздуха в сварочных камерах (порядка $10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па), условия для очистки свариваемых поверхностей титана от оксидов могут быть реализованы только при нагреве в результате развития автовакуумирования ограниченного объема контактного зазора и последующего растворения оксидов, образовавшихся на стадии автовакуумирования, в металлической основе.

Поэтому целью данной работы было установление влияния разрежения воздуха в сварочной камере на кинетические закономерности развития процесса автовакуумирования зазора между контактными поверхностями.

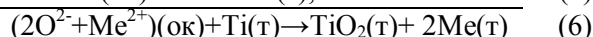
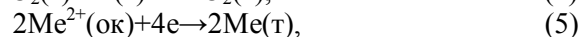
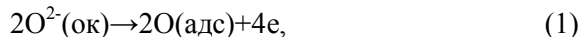
Методика экспериментальных исследований

В связи с малыми значениями геометрических параметров контактного зазора между свариваемыми заготовками получить количественную информацию о развитии автовакуумирования путем прямого замера остаточного давления газа не представляется возможным.

Данные, характеризующие кинетику развития этого процесса в условиях диффузионной

сварки титана, можно получить исходя из следующих соображений.

Если контактный зазор моделировать в виде двух образцов, один из которых изготовлен из титана, а второй, например, из железа (рис. 1), то при нагреве титан, обладая высокой способностью растворять в себе кислород, и упругость диссоциации оксидов (P_{TiO_2}) которого значительно ниже упругости диссоциации оксидов железа (P_{FeO}) (так, при $1000\text{ }^\circ\text{C}$ $P_{TiO_2}=5,8 \cdot 10^{-34}$ Па; $P_{FeO}=3,4 \cdot 10^{-16}$ Па [5]), будет активно адсорбировать газы, содержащиеся в контактном зазоре. Этот процесс будет сопровождаться понижением давления кислорода (т.е. развитием автовакуумирования) и создаст условия для диссоциации оксидов железа по схеме:



Здесь: (ок) – оксидная пленка; (адс) – газообразный адсорбированный кислород; (г) – газообразный кислород; (т) – твердая фаза.

Исходя из рассмотренных окислительно-восстановительных реакций (1-6), протекающих при нагреве в замкнутом контактном зазоре между образцами из титана и железа (рис. 1), следует, что о развитии процесса автовакуумирования можно судить по изменению цвета оксидной интерференционно-окрашенной пленки. Пленку определенной толщины наносят перед термическим циклом на поверхность образца из железа и фиксируют изменение ее толщины и, как следствие, цвета, обусловленное понижением давления $P_{O_2} < P_{FeO}$ и диссоциацией оксидов железа.

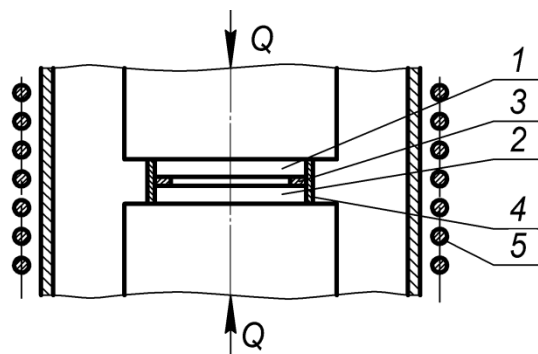


Рис. 1. Схема отжига образцов: 1 – образец из титана ВТ1-0, 2 – образец из армко-железа, 3 – разделительная шайба, 4 – экран из титановой фольги, 5 – нагреватель

В соответствии с формально-кинетическим представлением об автовакуумировании, как термически активируемом процессе, можно считать, что время τ_a , необходимое для понижения исходного остаточного давления кислорода P_{O_2} до P_{FeO} в самом общем случае при постоянной величине контактного зазора между образцами (рис. 1) зависит от степени разрежения воздуха в зазоре и является экспоненциальной функцией температуры:

$$\tau_a = C \cdot f(B) \cdot \exp(E/RT), \quad (7)$$

где E – энергия активации процесса, контролирующего автовакуумирование, R – газовая постоянная, T – температура в градусах Кельвина, B – параметр, характеризующий разрежение воздуха в сварочной камере, C – коэффициент пропорциональности, являющийся функцией.

Таким образом, при экспериментальном исследовании кинетики процесса автовакуумирования в качестве индикатора развития процесса можно использовать изменение толщины и интерференционной окрашенности оксида железа, а в качестве кинетической характеристики – длительность отжига, приводящего к этим изменениям.

Экспериментальные исследования проводили на образцах диаметром 16 мм и толщиной 2 мм из армко-железа и титана марки ОТ4, поверхность которых полировали и обезжиривали. Образцы из армко-железа окисляли на воздухе при $300\text{ }^\circ\text{C}$ до образования на их поверхности оксидных пленок синего цвета (спектра первого порядка). При этом толщина оксидных пленок (y) по результатам эллипсометрических измерений составляла порядка 70 нм. Затем образцы собирали по схеме (рис. 1). В качестве параметра, характеризующего размер контактного зазора, использовали толщину разделительной шайбы (h), равную 0,1 мм. Заданное разрежение воздуха поддерживается постоянным в течении эксперимента с помощью системы вакуумных насосов и игольчатого вентиля. Диапазон разрежений воздуха составлял от 10^{-2} до 2,6 Па.

После вакуумирования камеры до заданного разрежения образцы сжимали осевым усилием $Q=5$ кН и отжигали. По результатам изменения интерференционной окрашенности образцов из армко-железа и эллипсометрических измерений до и после вакуумного отжига определяли уменьшение толщины оксидной пленки (Δy).

Результаты исследований

На рис. 2 приведены экспериментально полученные зависимости $\Delta y = \varphi(\tau)$, отражающие кинетику процесса уменьшения исходной толщины оксидных пленок на армко-железе в интервале температур отжига от 525 до 600 °С в условиях проведенных экспериментов.

На начальных участках зависимостей $\Delta y = \varphi(\tau)$ присутствует период времени (τ_u) условно названный инкубационным, в течение которого не наблюдается изменений в окрашенности образцов (сохраняется синий цвет) и не происходит уменьшения толщины оксидных пленок.

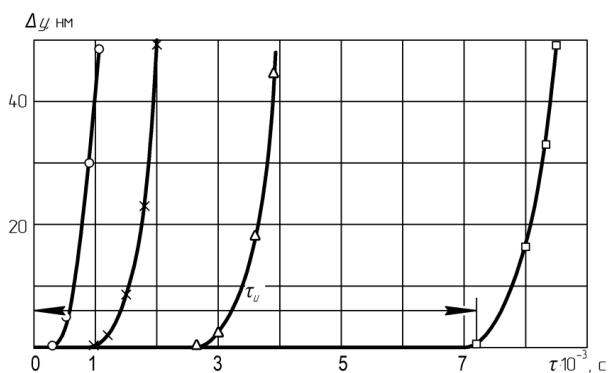


Рис. 2. Кинетика утонения оксидных пленок на образцах из армко-железа при величине контактного зазора $h=0,1$ мм и температурах отжига, °С: 1 – 525; 2 – 550; 3 – 575; 4 – 600

Наблюдаемый процесс утонения оксидов при $\tau > \tau_u$ не может быть объяснен их возгонкой или восстановлением растворенными в армко-железе примесями, что вытекает из следующих соображений:

- давление насыщенного пара оксидов мало;
- по данным РСМА на поверхности титановых образцов после отжига по схеме (рис. 1) не обнаружено возрастания концентрации железа;
- при замене титана на армко-железо в экспериментах по схеме (рис. 1) изменений толщины оксидных пленок не происходило.

Поэтому можно считать, что процесс утонения оксидов на поверхности образцов из армко-железа обусловлен развитием автовакуумирования контактного зазора и последующим восстановлением оксидов по реакциям (1)-(6). При этом длительность инкубационного периода τ_u на зависимостях $\Delta y = \varphi(\tau)$ соответствует времени, требующемуся для понижения остаточного давления кислорода в контактном

зазоре до давления упругости диссоциации оксидов железа, т.е. $\tau_u = \tau_a$.

Значения τ_u при вакуумировании контактного зазора до 10^{-2} Па зависят от температуры отжига и с ее увеличением τ_u уменьшается (рис. 3), а при вакуумировании до 2,6 Па эти зависимости смещаются в область более высоких температур (рис. 3).

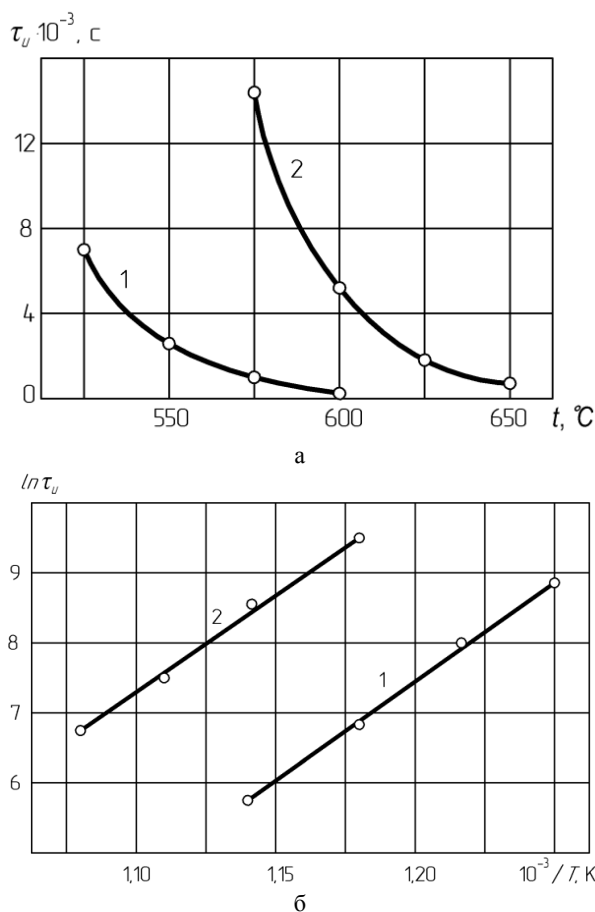


Рис. 3. Зависимость длительности инкубационного периода от температуры отжига в координатах а – $\tau_u = \varphi(t)$; б – $\ln \tau_u = \varphi(1/T)$ при вакуумировании контактного зазора, Па: 1 – 10^{-2} ; 2 – 2,6

Из зависимости (7) и равенства $\tau_u = \tau_a$ следует, что построение экспериментально полученных значений $\tau_u = \varphi(t)$ в координатах $\ln \tau_u - 1/T$ позволяет оценить эффективное значение энергии активации процесса, контролирующего автовакуумирование.

Опытные данные в координатах $\ln \tau_u - 1/T$ ложатся на прямые линии (рис. 3, б), из угловых коэффициентов которых следует что E в пределах погрешности, которая не превышает 10 %, не зависит от степени вакуумирования и составляет 241 кДж/моль. Найденное значение E сопоставимо с энергией активации диффузии кислорода в титане (которая, например, соглас-

но [6], составляет 258 кДж/моль), что дает основания считать, что процесс автовакуумирования контактного зазора в описанных экспериментах контролировался диффузией кислорода в титане.

На рис. 4 в координатах $\tau_u - \lg B$ приведены зависимости, отражающие влияние степени вакуумирования контактного зазора на длительность инкубационного периода.

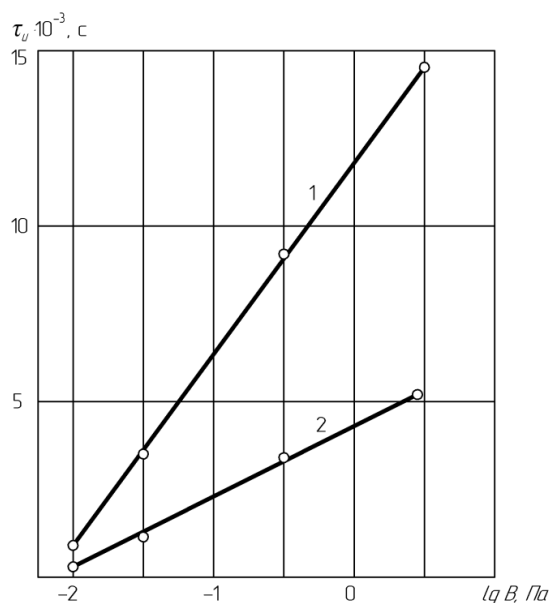


Рис. 4. Зависимость длительности инкубационного периода от степени вакуумирования контактного зазора в координатах $\tau_u = \varphi(\lg B)$ при температурах отжига, °С: 1 – 575; 2 – 600

Из приведенных данных следует, что при постоянных температурах испытания зависимости $\tau_u = \varphi(\lg B)$ имеют линейный характер и с учетом выражения (7) и равенства $\tau_a = \tau_u$ могут быть аппроксимированы выражением

$$\tau_a = 7,7 \cdot 10^{-12} \cdot (\lg B + 2,15) \cdot \exp(-241000/RT). \quad (8)$$

Полученные результаты исследований имеют не только научное, но и практическое значение, так как позволяют оценить время τ_a , в течении которого будет развиваться автовакуумирование и сопутствующий ему процесс окисления титана. Анализ титановых образцов после их отжига по схеме (рис. 1) в течение $\tau_u = \tau_a$ показал, что на их поверхности за это время формируется оксидная фаза в виде охрупченного слоя (рис. 5), толщина которого (δ_{oxp}) возрастает с увеличением остаточного давления воздуха в зазоре, характеризуемого степенью разрежения B (Па) (рис. 6).

Для очистки контактных поверхностей от этих слоев и повышения их реакционной способности к схватыванию перед приложением

сжимающего давления при диффузионной сварке требуется дополнительное время отжига τ_6 (с), которое можно оценить по выражению [7]:

$$\tau_6 = \delta_{oxp}^2 / (5 \cdot 10^9 \cdot \exp(-268000/RT)). \quad (9)$$

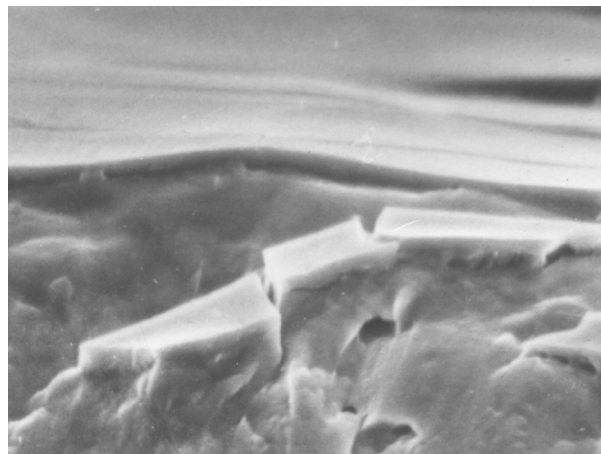


Рис. 5. Типичный вид охрупченных оксидных слоев, образующихся на поверхности образцов из сплава титана ОТ4 после их отжига по схеме (рис. 1) в течение времени τ_a и последующего разрушения изгибом, $\times 10000$

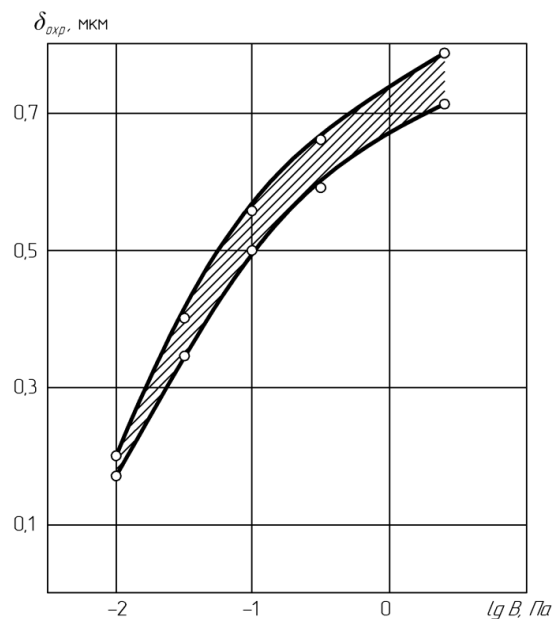


Рис. 6. Область значений $\delta_{oxp} = \varphi(B)$, образующихся на поверхности сплава ОТ4 после отжига в течение времени τ_a

Выводы

1. Сформулирована и опробирована методика, позволяющая оценить время, необходимое для понижения за счет автовакуумирования давления кислорода в контактном зазоре при диффузионной сварке титана до уровня упругости диссоциации оксидов железа.

2. Сопоставление найденного значения эффективной энергии активации процесса автовакуумирования с литературными данными дает основание считать, что автовакуумирование контактного зазора контролируется диффузией кислорода в титане.

3. Получено эмпирическое выражение, позволяющие оценивать время τ_a , необходимое для автовакуумирования контактного зазора в зависимости от степени разрежения воздуха и температуры нагрева.

4. Установлено, что за время автовакуумирования контактного зазора величиной $h = 0,1$ мм на поверхности сплава ОТ4 формируются оксидные охрупченные слои, толщина которых возрастает приблизительно от 0,2 мкм до 0,72 мкм при изменении степени разрежения от 10^{-2} до 2,6 Па, соответственно.

Литература

1. Семенов А.П. Схватывание металлов. М.: Машгиз, 1958. 280 с.
2. Пешков В.В., Булков А.Б. Диффузионная сварка титановых тонкостенных слоистых конструкций. М.: Изд-во «РИТМ», 2016. 242 с.
3. Пешков В.В., Булков А.Б., Куцев С.Б. Особенности развития процесса диффузионной сварки титановых тонкостенных слоистых конструкций с тавровым соединением // Сварочное производство. 2018. № 12. С. 9 – 18.
4. Влияние физико-химического состояния контактных поверхностей титана на прочность и топографию разрушения сварного соединения / А.Б. Булков, В.В. Пешков, И.Б. Корчагин и др. // Сварочное производство. 2021. № 9. С. 22-27
5. Киреев В.А. Методы практических расчетов в термодинамике химических реакций. М.: Химия, 1975. 535 с.
6. Цвиккер У. Титан и его сплавы. М.: Металлургия, 1979. 511 с.
7. Кинетика восстановления пластических свойств окисленных поверхностей титана и его сплавов путем отжига / А.Б. Булков, В.В. Пешков, И.Б. Корчагин и др. // Сварочное производство. 2021. № 11. С. 38 – 44.

Поступила 21.04.2022; принята к публикации 19.08.2022

Информация об авторах

Булков Алексей Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8–960–124–38–11, e-mail: abulkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7326-4846>

Пешков Владимир Владимирович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8–473–278–38–84, e-mail: vlvlpeshkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-6574>

Корчагин Илья Борисович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8–950–756–82–83, e-mail: ikorchagin@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2399-2319>

Селиванов Георгий Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8-473-278-38-84, e-mail: selivanovgv@bk.ru

ON THE EFFECT OF DILUTION IN THE CONTACT GAP ON THE KINETICS OF AUTOVACUUMING DURING DIFFUSION WELDING OF TITANIUM

A.B. Bulkov, V.V. Peshkov, I.B. Korchagin, G.V. Selivanov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the purpose of this work is to study the effect of air vacuum in the welding chamber on the development of the process of auto-vacuinating the gap between the contact surfaces during diffusion welding. The studies were carried out on cylindrical samples with a diameter of 16 mm made of titanium alloy OT4 and armco-iron, assembled with a gap of 0.1 mm. Oxide films with a thickness of 70 microns were previously formed on the surface of armco-iron samples by annealing. Annealing of the samples was carried out in a vacuum from 10^{-2} to 2.6 Pa in the temperature range from 525 to 600 °C. According to the results of changes in the interference coloration of armco-iron samples and ellipsometric measurements after vacuum annealing, we determined a decrease in the thickness of the oxide film. We established that the process of dissolution of the oxide layer on the surface of armco-iron is preceded by a certain period of time, called incubation, during which the pressure in the contact gap drops to the pressure of the elasticity of the dissociation of iron oxides. The duration of the incubation period increases with increasing pressure in the vacuum chamber and decreases significantly with increasing temperature. The processing of experimental data shows that the process of autovacuuming of the contact gap was controlled by the diffusion of oxygen in titanium. According to the results of the conducted studies, we obtained dependences that allow estimating the time of autovacuuming of the contact gap depending on the degree of air dilution and heating temperature

Key words: titanium, annealing, gas-saturated layers, strength, topography

References

1. Semenov A.P. "Setting of metals" ("Skhvatyvanie metallov"), Moscow: Mashgiz, 1958, 280 p.
2. Peshkov V.V., Bulkov A.B. "Diffusion welding of titanium thin-walled layered structures" ("Diffuzionnaya svarka titanovykh tonkostennykh sloistykh konstruksiy"), Moscow, RITM, 2016, 242 p.
3. Peshkov V.V., Bulkov A.B., Kushchev S.B. "Features of the development of the process of diffusion welding of thin-walled titanium laminated structures with a T-joint", *Welding Production (Svarochnoe proizvodstvo)*, 2018, no. 12, pp. 9–18.
4. Peshkov V.V., Bulkov A.B., Korchagin I.B. "Influence of the physico-chemical state of titanium contact surfaces on the strength and topography of failure of the welded joint", *Welding Production (Svarochnoe proizvodstvo)*, 2021, no. 9, pp. 11–16.
5. Kireev V.A. "Methods of practical calculations in thermodynamics of chemical reactions" ("Metody prakticheskikh raschetov v termodinamike himicheskikh reakcij"), Moscow: Khimiya, 1975, 535 p.
6. Zwicker W. "Titanium and its alloys" ("Titan i ego splavy"), Moscow Metallurgiya, 1976, 447 p.
7. Peshkov V.V., Bulkov A.B., Korchagin I.B. "Kinetics of recovery of plastic properties of oxidized surfaces of titanium and its alloys by annealing", *Welding Production (Svarochnoe proizvodstvo)*, 2021, no. 11, pp. 38–44.

Submitted 21.04.2022; revised 19.08.2022

Information about the authors

Aleksey B. Bulkov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: abulkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7326-4846>
Vladimir V. Peshkov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: vlvlpeshkov@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2802-6574>
Il'ya B. Korchagin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: ikorchagin@cchgeu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2399-2319>
Georgiy V. Selivanov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: selivanovgv@bk.ru

МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ЗУБЬЕВ ФРЕЗЫ С КОНСТРУКТИВНОЙ РАДИАЛЬНОЙ ПОДАЧЕЙ ДЛЯ ОБРАБОТКИ РК-ПРОФИЛЬНЫХ ОТВЕРСТИЙ

В.В. Куц¹, М.В. Митрофанов¹, Ю.А. Мальнева¹, О.Н. Кириллов²

¹Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассмотрен новый способ обработки РК-профильных отверстий с помощью фрезы с конструктивной радиальной подачей, показана схема обработки. Ввиду того, что основным показателем обработки является погрешность формообразования, приведен расчет величины отклонения профиля от номинальных значений в радиальном направлении при обработке отверстия. На основании выполненных расчетов была установлена зависимость величины отклонения профиля обработанного РК-профильного отверстия от углового расположения режущих зубьев рассматриваемой фрезы. Результаты расчетов, выполненные при разных средних радиусах фрезы и числах режущих зубьев, были представлены в виде графиков величин отклонения профиля, что позволило установить неравномерность величины погрешности вдоль профиля обрабатываемого отверстия. Для выравнивания величины отклонения обработанного профиля отверстия было предложено устанавливать зубья фрезы с неравномерным угловым шагом, для чего был разработан алгоритм расчета угловых положений зубьев на инструменте исходя из заданной величины наибольшего отклонения профиля обрабатываемого отверстия и среднего радиуса фрезы. Показаны результаты расчета числа зубьев фрезы, выполненные с применением разработанного алгоритма, для различных квалитетов точности обрабатываемого отверстия. В заключении были определены дальнейшие пути исследования для оценки состояний работоспособности конструкции данной фрезы

Ключевые слова: РК-профиль, математическая модель, фреза, формообразование, эксцентриситет, отклонения профиля, угловой параметр

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации на 2022-2023 годы. Номер проекта - МК-264.2022.4

Введение

Применение РК-профильных соединений в современной промышленности менее распространено по сравнению со шпоночными, шлицевыми и гранными, несмотря на некоторые преимущества. Распространение РК-профильных соединений, имея множество предложенных способов их обработки [1-15], в настоящее время ограничено вследствие высокой трудоемкости изготовления, особенно в условиях крупносерийного и массового производства.

Проектирование фрезы с конструктивной радиальной подачей для обработки РК-профильных отверстий выполнялось с учетом достижения требуемой точности обработки. Стоит отметить, что для получения необходимого профиля на процесс формообразования (рис. 1) накладываются некоторые условия и ограничения, а именно:

1. Соотношение частоты шпинделя с заготовкой и шпинделя с инструментом равно

$$n_f = N \cdot n_v, \quad (1)$$

где N – количество граней РК-профиля;

n_f – частота вращения инструмента;

n_v – частота вращения с заготовки.

2. Направление вращения заготовки и инструмента происходит в одном направлении (попутное вращение).

3. Оси внутреннего контура вала и фрезы расположены несоосно относительно друг друга и заданы межосевым расстоянием.

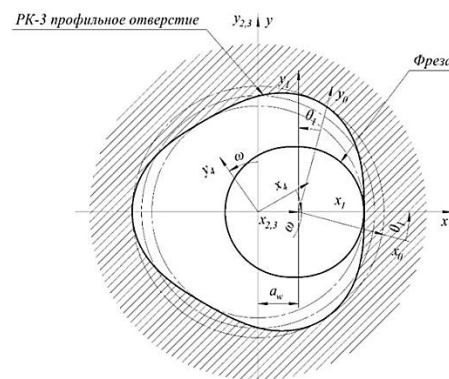


Рис. 1. Схема обработки отверстий с равноосным контуром фрезой с переменным радиусом

На рис. 1 приняты следующие обозначения:

- θ_1 – угол поворота шпиндельного узла;
- ω – угол поворота фрезы;
- a_w – величина межосевого смещения.

Обзор существующих методов обработки РК-профильных отверстий и методика расчета производящей поверхности фрезы подробно изложена в работах [1-4].

При этом, создаваемая фреза должна проектироваться с позиции обеспечения необходимой точности обработки, которая характеризуется, в частности, величиной параметров неровностей на обработанной поверхности – высотой Δ_k и шагом S_z (рис. 2), профиля обработанной поверхности в радиальном направлении.

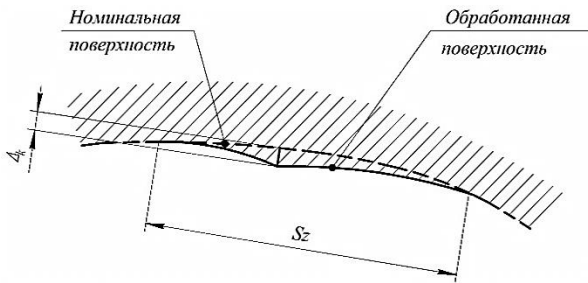


Рис. 2. Параметры неровностей на обработанной поверхности РК-профильного отверстия

Описание методики расчета параметров неровностей на обработанной поверхности

Определение величин погрешностей профиля может быть выполнено по следующей методике (рис. 3) [10-13,15]:

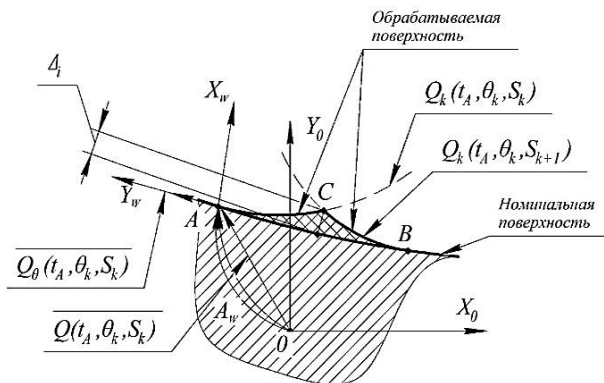


Рис. 3. Схема расчета величины погрешности срезаемого слоя при обработке фрезой РК-профильного отверстия

1. Для заданной точки на режущей кромке фрезы рассчитаем время (t_A), когда она войдет

в контакт с поверхностью детали, из уравнения (рис. 3)

$$\vec{Q}_\theta(t_A, \theta_k, S_{kA}) \cdot [\vec{Q}_t(t_A, \theta_k, S_{kA}) \times \vec{k}_0] = 0, \quad (2)$$

где $\vec{Q}_\theta(t_A, \theta_k, S_{kA})$ – вектор, определяющий направление касательной к производящей поверхности фрезы в рассматриваемой точке k -й режущей кромки в заданный момент времени;

$\vec{Q}_t(t_A, \theta_k, S_{kA})$ – вектор, определяющий направление касательной к поверхности резания в рассматриваемой точке на k -й режущей кромке фрезы, определяемый путем дифференцирования векторной функции поверхности резания по времени;

\vec{k}_0 – орт, связанный с положительным направлением оси Z_0 ;

S_k – длина дуги, определяющая точку режущей кромки зуба фрезы, входящей в контакт с обработанной поверхностью РК-профильного отверстия;

θ_k – величина углового параметра производящей поверхности фрезы;

t_A – момент времени контакта в точке A точки k -й режущей кромки фрезы с деталью;

$\vec{Q}(t_A, \theta_k, S_k)$ – векторная функция поверхности резания, описываемая режущими кромками фрезы в процессе фрезерования.

$$\vec{Q}(t_A, \theta_k, S_k) = A^6(\theta_1(t_A, \theta_k)) A^1(a_w(t_A, \theta_k,))$$

$$A^6(-\omega(t_A, \theta_k)) \vec{r}(S_k, \theta_k), \quad (3)$$

где $A^6(\theta_1(t_A, \theta_k))$ – матрица, соответствующая повороту шпиндельного узла с закрепленной заготовкой в момент времени (t_A) контакта точки k -й режущей кромки фрезы с деталью;

$\theta_1(t_A, \theta_k)$ – угол поворота шпинделя с закрепленным инструментом в момент времени (t_A) контакта точки k -й режущей кромки фрезы с деталью;

$A^1(a_w(t_A, \theta_k))$ – матрица перемещения поперечного суппорта в момент времени (t_A) контакта точки k -й режущей кромки фрезы с деталью;

$a_w(t_A, \theta_k)$ – параметр перемещения поперечной подачи относительно оси x в момент времени (t_A) контакта точки k -й режущей кромки фрезы с деталью,

$$a_w(t_A, \theta_k) = a_{w0} + S_m \cdot t, \quad (4)$$

где a_{w0} – величина исходного межосевого расстояния;

S_m – поперечная подача;

t – время контакта режущей кромки с заготовкой;

$A^6(-\omega(t_A, \theta_k))$ – матрица, определяющая поворот фрезы за время t_A ;

$\omega(t_A, \theta_k)$ – угол поворота фрезы за время t_A , исходя из заданной частоты вращения фрезы;

$\vec{r}(S_k, \theta_k)$ – уравнение производящей поверхности фрезы, проходящее через точку S_k и величину углового параметра θ_k .

2. По методике, описанной в [10], выполним векторный переход системы координат. Для этого рассчитаем элементы матрицы A_w , определяющей установку системы координат секущей плоскости. Этот расчет выполним на основе векторов: $\vec{j}_{w0} = \vec{Q}_\theta(t_A, \theta_k, S_k)$, $\vec{k}_{w0} = \vec{k}_0$ и $\vec{r}_{w0} = \vec{Q}(t_A, \theta_k, S_k)$.

3. Решим систему уравнений, относительно параметра времени t_B , соответствующего моменту контакта $k+1$ зуба фрезы с обрабатываемой деталью.

$$\begin{cases} \vec{Q}_\theta(t_B, \theta_{k+1}, S_{(k+1)B}) \cdot [\vec{Q}(t_B, \theta_{k+1}, S_{(k+1)B}) \times \vec{k}_0] = 0; \\ \vec{k}_w \cdot \overline{A_w \cdot Q(t_B, \theta_{k+1}, S_{(k+1)B})} = 0, \end{cases} \quad (5)$$

где $\vec{Q}_\theta(t_B, \theta_{k+1}, S_{(k+1)B})$ – вектор, определяющий направление касательной к производящей поверхности фрезы в рассматриваемой точке $k+1$ -й режущей кромки в заданный момент времени;

$\vec{Q}(t_B, \theta_{k+1}, S_{(k+1)B})$ – вектор, определяющий направление касательной к поверхности резания в рассматриваемой точке на $k+1$ -й режущей кромке фрезы, определяемый путем дифференцирования векторной функции поверхности резания по времени.

4. Решим относительно параметров $t_C, S_{kC}, t'_C, S_{(k+1)C}$ систему уравнений

$$\begin{cases} \vec{k}_w \cdot \overline{A_w \cdot Q(t_C, \theta_k, S_{kC})} = 0; \\ \vec{k}_w \cdot \overline{A_w \cdot Q(t'_C, \theta_k, S_{(k+1)C})} = 0; \\ \vec{i}_0 \cdot [\vec{Q}(t_C, \theta_k, S_{kC}) - \vec{Q}(t'_C, \theta_{k+1}, S_{(k+1)C})] = 0; \\ \vec{j}_0 \cdot [\vec{Q}(t_C, \theta_k, S_{kC}) - \vec{Q}(t'_C, \theta_{k+1}, S_{(k+1)C})] = 0. \end{cases} \quad (6)$$

Найденные параметры $t_C, S_{kC}, t'_C, S_{(k+1)C}$

будут определять точку пересечения режущих кромок k -го и $k+1$ -го зубьев фрезы с рассматриваемой секущей плоскостью W .

5. Зададим положение радиальной секущей плоскости, проходящей через ось Z_0 и точку C , см. рис. 4. Для этого по заданным векторам определим соответствующую матрицу установки её системы координат (A_m).

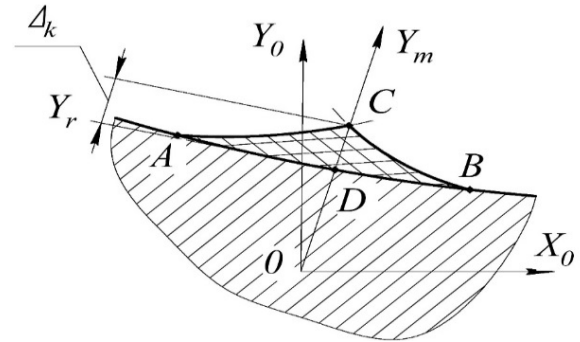


Рис. 4. Схема расчета погрешности формообразования обработанного отверстия

$$\vec{j}_{m0} = \begin{bmatrix} \vec{i}_0 \cdot \vec{Q}_k(t_C, \theta_k, S_{kC}) \\ \vec{j}_0 \cdot \vec{Q}_k(t_C, \theta_k, S_{kC}) \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\vec{k}_{m0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (7)$$

$$\vec{r}_{m0} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \vec{k}_0 \cdot \vec{Q}_k(t_C, \theta_k, S_{kC}) \\ 1 \end{bmatrix}$$

6. Находим точку пересечения секущей плоскости m с профилем обрабатываемого отверстия детали. Для этого решим относительно параметра угла профиля обрабатываемого отверстия уравнение (участок CD рис. 4)

$$\vec{j}_m \cdot \overline{A_m \cdot \vec{r}_0(\theta, z)} = 0 \Big|_{z = \vec{k}_0 \cdot \vec{Q}(t_C, \theta_k, S_{kC})} \quad (8)$$

7. Рассчитаем величину Δ_k высоты неровностей на обработанной поверхности РК-профильного отверстия как

$$\Delta_k = \left| A_m \cdot \vec{Q}_k(t_C, \theta_k, S_{kC}) \right| - \left| A_m \cdot \vec{r}_0(\theta, z) \right|. \quad (9)$$

Исследование изменения параметров неровностей на обработанной поверхности

По результатам исследования фрезы с равномерным расположением зубьев были построены графики погрешности профиля обрабатываемой поверхности (рис. 5, 6) от изменения геометрических параметров режущего инструмента (диаметра, количества зубьев).

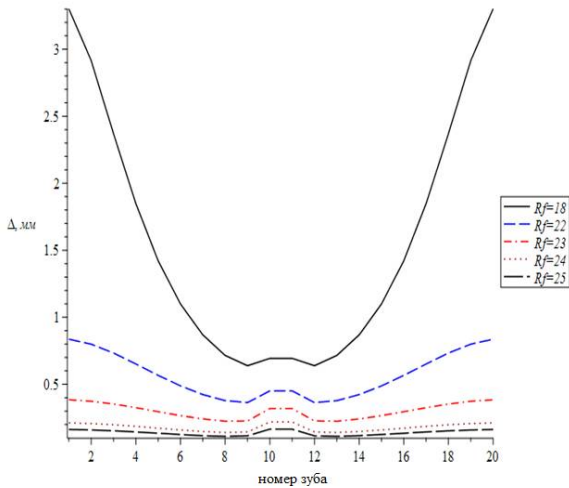


Рис. 5. Изменение отклонения профиля обработанной поверхности отверстия РКЗ-40/3,4 от радиуса R_f фрезы

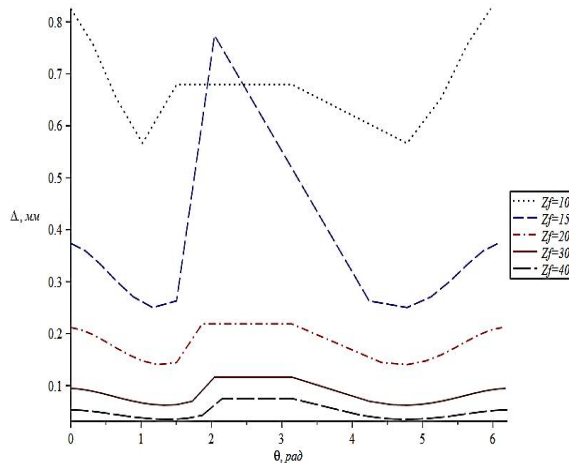


Рис. 6. Изменение отклонения профиля обработанной поверхности отверстия РКЗ-40/3,4 от количества зубьев фрезы

Также в результате исследования инструмента с равномерным расположением зубьев фрезы и параметрами обрабатываемого отверстия РКЗ-40/3,4 при различных значениях количества зубьев и диаметра инструмента была определена погрешность профиля. Составлены табл. 1, 2 соответствия качествам точности детали для отверстия РКЗ-40/3,4. Согласно ГОСТ 24643-81 «Основные нормы взаимоза-

меняемости. Допуски формы и положений поверхности. Числовые значения», рекомендуются следующие уровни относительной геометрической точности, которые характеризуются соотношением между допуском формы или расположения и допуском размера: А – нормальная относительная геометрическая точность (для допуска формы или расположения используется примерно 60 % от допуска; размера).

Таблица 1
Рассчитанная погрешность РК-отверстия и соответствие качеству точности при изменении количества зубьев фрезы ($R_f=24$)

Количество зубьев, Z_f	10	15	20	30	40
Величина отклонения профиля, мм	0,82	0,77	0,218	0,11	0,075
Соответствие качеству точности	IT16	IT16	IT12	IT11	IT10

Таблица 2
Рассчитанная погрешность РК-отверстия и соответствие качеству точности при изменении диаметра фрезы ($Z_f=20$)

Радиус фрезы, R_f	18	20	22	24	25
Величина отклонения профиля, мм	3,3	0,38	0,31	0,22	0,16
Качество точности	>IT16	IT14	IT14	IT12	IT12

По полученным данным можно сделать вывод, что при равном расположении зубьев фрезы наблюдается невысокая степень точности. Из рис. 5-6 можно сделать вывод, что величина Δ_k неравномерна и имеет наибольшие значения на участках профиля отверстия, соответствующих точкам впадин и выступов. С целью выравнивания величины Δ_k зубья режущего инструмента целесообразно располагать по диаметру фрезы с неравномерным шагом [13-15]. Также можно сделать вывод, что уменьшить искажение профиля обработанного отверстия можно путем увеличения числа зубьев фрезы и/или диаметра фрезы, который ограничивается размерами обрабатываемого отверстия.

Алгоритм расчета углов расположения зубьев фрезы

Заключение

На рис. 7 показан алгоритм расчета положения зубьев проектируемой фрезы из условия равенства высоты гребешков вдоль профиля обработанного отверстия

$$\Delta_1 = \Delta_2 = \dots = \Delta_k \leq T\Delta_k, \quad (10)$$

который также позволяет установить минимальное число зубьев фрезы, необходимых для достижения необходимой точности формообразования.

Таким образом, применение представленного метода расчета положения зубьев позволяет выровнять отклонения и уменьшить величины параметров срезаемого слоя от номинального теоретического размера профиля. Также данный метод позволяет достичь требуемой точности и получить равномерное качество поверхности на всех участках профиля. Дальнейшее исследование в области проектирования данных фрез будет направлено на моделирование контактных процессов режущих кромок с материалом заготовки. Ввиду того, что процесс формообразования накладывает определенный ряд ограничений, то в дальнейшем необходимо подобрать геометрические параметры режущего инструмента, обеспечивающие высокую эффективность обработки.

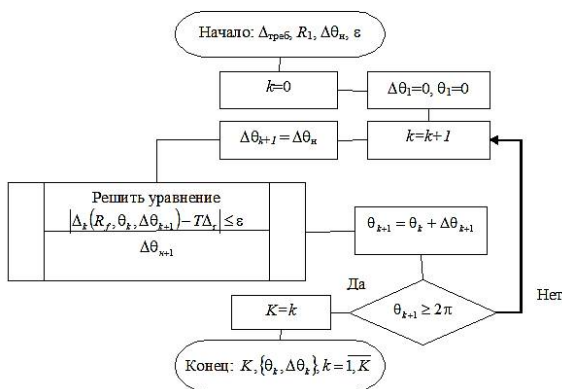


Рис. 7. Алгоритм расчета углов расположения зубьев инструмента

На рис. 8 показан график изменения углового шага расположения режущих зубьев инструмента для обеспечения заданной точности $T\Delta_k = 200 \text{ мкм}$ при заданных параметрах отверстия РК3-40/3.4 и принятом среднем радиусе фрезы $Rf = 24 \text{ мм}$ и количестве зубьев $Zf = 21$.

Литература

1. Куц В.В., Максименко Ю.А. Структурный синтез специализированных металлорежущих систем для обработки РК – профильных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №6(45). С.65-70.
2. Куц В.В., Мальнева Ю.А., Митрофанов М.В. Обзор существующих методов обработки РК-профильных отверстий // Молодежь и наука: шаг к успеху: сб. науч. ст. 5-й Всерос. науч. конф. перспективных разработок молодых ученых. В 4-х тт./ отв. ред. М.С. Разумов. Курск, 2021. С. 188-192.
3. Куц В.В., Мальнева Ю.А., Митрофанов М.В. Моделирование производящей поверхности фрезы дисковой с радиальной конструктивной подачей, предназначенной для обработки РК-профильных отверстий// За нами будущее: взгляд молодых ученых на инновационное развитие общества: сб. науч. ст. 2-й Всерос. молодеж. науч. конф. В 4-х тт./отв. ред. А.А. Горохов. Курск, 2021. С. 245-247.
4. Куц В.В., Разумов М.С., Митрофанов М.В. Моделирование фрезы с радиальной конструктивной подачей для обработки РК-профильных отверстий // Известия Юго-Западного государственного университета. 2019. Т. 23. № 5. С. 82-93.
5. Методология структурно – параметрического синтеза металлорежущих систем /А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, О.Ю. Еренков, А.В. Олейник, М.Ю. Сариллов. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2015. 282 с.
6. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Структурно-параметрический синтез технологических систем. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 2010. 153 с.
7. Куц В.В., Мальнева Ю.А., Горохов А.А. Способы обработки профильных валов фрезами с радиальной конструктивной подачей // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения: материалы Междунар. науч.-техн. конф. 2015. С. 156-158.



Рис. 8. Изменение шага зуба $k+1$, приходящегося на угловой параметр θ_k профиля инструмента для обеспечения точности в $T\Delta_k = 200 \text{ мкм}$

8. Куц В.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Синтез производящих поверхностей фрез - протяжек для обработки валов с равноосным контуром // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 8. С. 42-48.

9. Куц В.В., Пономарев В.В. Построение модели формообразования длинных валов с РК-профилем сборной дисковой фрезой // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2017. № 2(322). С.110-115.

10. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: монография. Курск: Курский государственный технический университет, 1997. 391 с.

11. Емельянов С.Г., Куц В.В. Корректировка положений сменных многогранных пластин при проектировании сборных дисковых фрез для обработки шеек коленчатых валов // СТИН. 2000. №2. С. 12-15.

12. Емельянов С.Г., Горохов А.А., Куц В.В. Определение размеров остаточных слоев при фрезерова-

нии сборными дисковыми фрезами // Компьютерные технологии в науке, проектировании и производстве: I Всерос. науч.-техн. конф. 1999. С. 15-18.

13. Куц В.В. Расчет величин искажения профиля обрабатываемой фасонной поверхности при разработке CAD\CAM – системы сборных фасонных фрез // Автоматизация и современные технологии. 2004. №11. С.5-7.

14. Емельянов С.Г., Куц В.В. Моделирование процесса обработки шейки коленчатого вала сборной дисковой фрезой, оснащенной сменными многогранными пластинами // Техника машиностроения. 1999. №2. С. 21-25.

15. Куц В.В., Пономарев В.В. Метод определения положения зубьев сборной дисковой фрезы с конструктивной радиальной подачей. Курск: Юго-Западный государственный университет. С. 81-85

16. Бронштейн И.Н., Семендяев К.А. Справочник по математике. Для инженеров и учащихся втузов: учеб. пособие. Санкт-Петербург-Москва-Краснодар, 2010. 544 с.

Поступила 15.06.2022; принята к публикации 15.08.2022

Информация об авторах

Куц Вадим Васильевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305000, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), тел.: 8(4712)222669, e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Митрофанов Максим Владимирович – аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: mitrofanovmaksim@list.ru

Мальнева Юлия Андреевна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой ДиИМ, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: yuliyamaximenko2010@yandex.ru

Кириллов Олег Николаевич – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры технологии машиностроения, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. 8(473)2530973, e-mail: kirillov.oll@yandex.ru

METHOD FOR DETERMINING THE POSITION OF THE TEETH OF A MILLING CUTTER WITH A CONSTRUCTIVE RADIAL FEED FOR PROCESSING EC-PROFILE HOLES

V.V. Kuts¹, M.V. Mitrofanov¹, Yu.A. Mal'neva¹, O.N. Kirillov²

¹Southwest State University, Kursk, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this article discusses a new method of processing EC-profile holes using a milling cutter with a constructive radial feed and shows the processing scheme. In view of the fact that the main indicator of processing is the error of shaping, the article provides a calculation of the deviation of the profile from the nominal values in the radial direction when processing the hole. Based on the calculations performed, we established the dependence of the deviation of the profile of the processed EC-profile hole on the angular location of the cutting teeth of the milling cutter in question. We presented the results of calculations performed at different average milling cutter radii and the number of cutting teeth in the form of graphs of the profile deviation values, which made it possible to establish the non-uniformity of the error along the profile of the hole being processed. To equalize the deviation of the processed hole profile, we proposed to install the teeth of the milling cutter with an uneven angular pitch, for which we developed an algorithm for calculating the angular positions of the teeth on the tool based on a given value of the largest deviation of the profile of the processed hole and the average radius of the cutter. The article shows the results of calculating the number of teeth of the milling cutter, performed using the developed algorithm, for various accuracy standards of the processed hole. In conclusion, we identified further ways of research to assess the health conditions of the design of this milling cutter

Key words: EC-profile, mathematical model, milling cutter, shaping, eccentricity, profile deviations, angular parameter

References

1. Kuts V.V., Maksimenko Yu.A. "Structural synthesis of specialized metal-cutting systems for processing EC-profile shafts", *News of Southwest State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2012, no. 6(45), pp. 65-70.

2. Kuts V.V., Mal'neva Yu.A., Mitrofanov M.V. "Review of existing methods of processing RC-profile holes", *Proc. of the 5th All-Russian Scientific Conf. of Promising Developments of Young Scientists: Youth and Science: a Step to Success. (Molodezh' i nauka: shag k uspekhу: sb. nauch. st. 5-y Vseros. nauch. konf. perspektivnykh razrabotok molodykh uchenykh)*, Kursk, 2021, pp. 188-192.
3. Kuts V.V., Mal'neva Yu.A., Mitrofanov M.V. "Modeling of the producing surface of a disk milling cutter with a radial structural feed designed for processing EC-profile holes", *Proc. of the 2nd All-Russian Youth Scientific Conf.: The Future is Ours: the View of Young Scientists on the Innovative Development of Society. (Za nami budushchee: vzglyad molodykh uchenykh na innovatsionnoye razvitiye obshchestva: sb. nauch. st. 2-y Vseros. molodezh. nauch. konf.)*, Kursk, 2021. pp. 245-247.
4. Kuts V.V., Razumov M.S., Mitrofanov M.V. "Modeling of a milling cutter with a radial constructive feed for processing EC-profile holes", *News of Southwest State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2019, vol. 23, no. 5, pp. 82-93.
5. Ivakhnenko A.G., Kutz V.V., Erenkov O.Yu., Oleinik A.V., Sarilov M.Yu. "Methodology of structural– parametric synthesis of metal-cutting systems" ("Metodologiya strukturno – parametricheskogo sinteza metallorazhushchikh sistem"), Komsomolsk-on-Amur State Technical University, 2015, 282 p.
6. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. "Structural-parametric synthesis of technological systems" ("Strukturno-parametricheskii sintez tekhnologicheskikh sistem"), Kursk State Technical University, 2010, 153 p.
7. Kuts V.V., Mal'neva Yu.A., Gorokhov A.A. "Methods of processing profile shafts with milling cutters with radial constructive feed", *Proc. of the Int. Sci. and Tech. Conf.: Problems and Achievements in Innovative Materials and Engineering Technologies (Problemy i dostizheniya v innovatsionnykh materialakh i tekhnologiyakh mashinostroyeniya: materialy Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, 2015, pp. 156-158.
8. Kuts V.V., Ivakhnenko A.G., Storublev M.L. "Synthesis of producing surfaces of milling cutters for processing shafts with an equiaxial contour", *News of Tula State University. Technical Sciences (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki)*, 2012, no. 8, pp. 42-48.
9. Kuts V.V., Ponomarev V.V. "Constructing a model of forming long shafts with a RC profile of a combined disk cutter", *Fundamental and Applied Problems of Engineering and Technology (Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tekhnologii)*, 2017, no. 2(322), pp.110-115.
10. Lashnev S.I., Borisov A.N., Emelyanov S.G. "Geometric theory of surface formation by cutting tools" ("Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostey rezhushchimi instrumentami"), monograph, Kursk State Technical University, 1997, 391 p.
11. Emel'yanov S.G., Kuts V.V. "Adjustment of the positions of replaceable polyhedral plates in the design of prefabricated disc cutters for processing crankshaft necks", *STIN*, 2000, no. 2, pp. 12-15.
12. Emel'yanov S.G., Gorokhov A.A., Kutz V.V. "Determining the size of residual layers when milling with prefabricated disk cutters", *Proc. of I All-Russian Sci. and Tech. Conf.: Computer Technologies in Science, Design and Production (Komp'yuternye tekhnologii v nauke, proyektirovani i proizvodstve: I Vseros. nauch.-tekhn. konf.)*, 1999, pp. 15-18.
13. Kuts V.V. "Calculation of the distortion values of the profile of the processed shaped surface in the development of CAD/CAM – systems of prefabricated shaped cutters", *Automation and Modern Technologies (Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii)*, 2004, no. 11, pp. 5-7.
14. Emel'yanov S.G., Kuts V.V. "Modeling of the processing of the crankshaft neck with a prefabricated disc cutter equipped with replaceable polyhedral plates", *Mechanical Engineering (Tekhnika mashinostroyeniya)*, 1999, no. 2, pp. 21-25.
15. Kuts V.V., Ponomarev V.V. "Method for determining the position of the teeth of a prefabricated disc cutter with a constructive radial feed" ("Metod opredeleniya polozheniya zub'ev sbornoy diskovoy frezy s konstruktivnoy radial'noy podachey"), Southwest State University, Kursk, pp. 81-85
16. Bronstein I.N., Semendyaev K.A. "Handbook of Mathematics. For engineers and students of higher education institutions" ("Spravochnik po matematike. Dlya inzhenerov i uchashchikhsya vtuzov"), study guide, St. Petersburg-Moscow-Krasnodar, 2010.

Submitted 15.06.2022; revised 15.08.2022

Information about the authors

Vadim V. Kuts, Dr. Sc. (Technical), Professor, Southwest State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Maksim V. Mitrofanov, graduate student, Southwest State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: mitrofanovmaksim@list.ru

Yuliya A. Mal'neva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of DiIM, Southwest State University (94 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: yuliyamaximenko2010@yandex.ru

Oleg N. Kirillov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)2530973, e-mail: kirillov.oll@yandex.ru