

ВЕСТНИК ВОРОНЕЖСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ТЕХНИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

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

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

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

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

BULLETIN OF VORONEZH STATE TECHNICAL UNIVERSITY

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

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

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

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

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

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

Принцип разделения функций в задачах модального управления С.Л. Подвальный, В.И. Захватов, Е.М. Васильев.....	7
Анализ влияния типовых функциональных требований на параметры настройки информационной системы на базе облачных технологий с применением метода DEMATEL А.А. Левченко, В.В. Таратухин.....	17
Модель принятия решений для регулирования температуры нефтепродукта в условиях неопределенности В.А. Мустафаев, К.А. Аллахвердиева.....	29
Аппроксимация плотности распределения времени работы между отказами вычислительной системы непараметрическим методом Розенблатта-Парзена В.С. Никулин, А.И. Пестунов.....	36
Сравнительный анализ средств голосового интерфейса и технологий распознавания речи В.А. Малиновкин, Н.В. Валуйских, Н.Н. Шведов, С.Л. Кенин, Н.И. Гребенникова.....	42
Алгебраическая методология моделирования бесциклового маршрутизации Х. Хаю, М.А. Орлова, Л.И. Абросимов.....	47
Метод повторного применения и обмена опытом при коллективном взаимодействии интеллектуальных агентов Ю.В. Дубенко.....	62
Интеграция основных статических структур на этапе инфологического моделирования О.В. Новоселова, А.С. Сидоров.....	73

Радиотехника и связь

Улучшение показателей направленности антенны дифракционного излучения методом вариации профиля излучающего раскрыва Д.Ю. Крюков, А.В. Останков, А.Ю. Чернышев, С.Ю. Дашян.....	79
Исследование малогабаритной УКВ-антенны вибраторного типа с плечами спиральной формы В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров.....	91
Проблемы реализации метода микроволнового радиометрического измерения внутренней температуры тела спортсменов Е.В. Турецкая, Н.В. Астахов, Д.А. Дежин, А.С. Демихова.....	97
Исследование и обзор механизмов балансировки нагрузки на основе SDN в 5G/IMT-2020 Б. Данешманд, Л.А. Ту.....	102
Двухдиапазонная щелевая антенна для смартфона с поддержкой технологии MIMO А.М. Жихарев, Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров, И.А. Черноиваненко.....	112
Модели симметричного вибратора в частотном диапазоне А.С. Разумихин, Ю.О. Филимонова, К.А. Лайко, Е.И. Алгазин.....	117

Модифицированный вибратор Пистолькорса с плечами на основе трех цилиндрических спиралей, замкнутых на торцах

В.И. Николаев, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин..... 123

Декомпозиция сигнального радиопрофиля в пассивной радиосенсорной технической диагностике и аутентификации электронных устройств

К.А. Бойков..... 129

Исследование возможности использования генетического алгоритма для определения амплитудно-фазового распределения антенной решетки

И.А. Баранников, К.А. Бердников, Е.А. Ищенко, К.В. Смусева, С.М. Фёдоров..... 135

Машиностроение и машиноведение

Технический комплекс для восстановительного ремонта поверхностных повреждений трубопроводов методом поверхностного наклепа

О.В. Уразов, А.Д. Данилов..... 140

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

The principle of separation of functions in modal control problems S.L. Podvalny, V.I. Zakhvatov, E.M. Vasil'ev.....	7
Analysis of the influence of typical functional requirements on the information system setup parameters based on cloud technologies using the DEMATEL method A.A. Levchenko, V.V. Taratukhin.....	17
Decision-making model for regulating the temperature of an oil product under conditions of uncertainty V.A. Mustafaev, K.A. Allakhverdieva.....	29
Approximation of the distribution density of time between failures of a computing system by the Rosenblatt-Parzen nonparametric method V.S. Nikulin, A.I. Pestunov.....	36
Overview of voice interface tools and speech recognition technologies V.A. Malinovkin, N.V. Valuyskikh, N.N. Shvedov, S.L. Kenin, N.I. Grebennikova.....	42
Algebraic methodology for modeling loop-free routing H. Khayou, M.A. Orlova, L.I. Abrosimov.....	47
Method of reuse and exchange of experience in the collective interaction of intelligent agents Yu.V. Dubenko.....	62
Integration of basic static structures at the stage of infological modeling O.V. Novoselova, A.S. Sidorov.....	73

Radio engineering and communication

Improvement of directivity characteristics of diffraction radiation antenna by varying profile of radiating opening D.Yu. Kryukov, A.V. Ostankov, A.Yu. Chernyshev, S.Yu. Dachian.....	79
Study of a small-sized VHF antenna of vibrator type with spiral arms V.I. Nikolaev, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, S.M. Fyedorov.....	91
Problems of implementation of the method of microwave radiometric measurement of the internal body temperature of athletes E.V. Turetskaya, N.V. Astakhov, D.A. Dezhin, A.S. Demikhova.....	97
Study and review of SDN-based load balancing mechanisms in 5G / IMT-2020 B. Daneshmand, L.A. Tu.....	102
Dual-band slot antenna for smartphone with MIMO technologies A.M. Zhikharev, E.A. Ishchenko, S.M. Fyedorov, I.A. Chernoiivanenko.....	112
Models of a symmetric vibrator in the frequency range A.S. Razumikhin, Yu.O. Filimonova, K.A. Layko, E.I. Algazin.....	117

Modified Pistohlkors dipole with arms based on three cylindrical spirals closed at the ends V.I. Nikolaev, Yu.G. Pasternak, V.A. Pentyurin.....	123
Decomposition of signal radio profile in passive radio-sensor technical diagnosis and authentication of electronic devices K.A. Boykov.....	129
Research of possibility of using genetic algorithm for determination of antenna array amplitude-phase distribution I.A. Barannikov, K.A. Berdnikov, E.A. Ishchenko, K.V. Smuseva, S.M. Fyedorov.....	135

Mechanical engineering and science of machines

Technical complex for the restoration repair of surface damage of pipelines by the method of surface riveting O.V. Urazov, A.D. Danilov.....	140
--	------------

Информатика, вычислительная техника и управление

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.1.001

УДК 62-50

ПРИНЦИП РАЗДЕЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ В ЗАДАЧАХ МОДАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ

С.Л. Подвальный, В.И. Захватов, Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: выявлены методологические причины трудностей, возникающих при синтезе сложных систем автоматического регулирования. Обоснована необходимость построения таких систем на основе эволюционных принципов многоальтернативности, отражающих механизмы функционирования биологических сообществ. Определена конкретная цель исследования: разработка практических способов и приёмов реализации многоальтернативного принципа разделения функций в системах робастного регулирования. На примере задачи синтеза модального управления нестационарным колебательным объектом показано, что решение этой задачи возможно только в результате разделения собственных чисел характеристической матрицы системы на части, одна из которых определяет характер переходного процесса в системе, а другая – обеспечивает робастные свойства модального регулятора. Сформулированы рекомендации по выбору значений указанных собственных чисел и представлен способ расчёта робастного модального регулятора на основе решения экстремальной задачи математического программирования. Затронуты вопросы плохой обусловленности желаемых характеристических полиномов, выбираемых при синтезе модального регулятора. Приведены аналитические основания раздельного синтеза модального регулятора и наблюдателя координат состояния объекта. Дано доказательство сокращения нулей и полюсов наблюдателя в случае, если параметры наблюдателя точно совпадают с соответствующими параметрами объекта. Проведён анализ чувствительности нулей и полюсов системы к параметрической нестационарности объекта. Продемонстрирована возможность и целесообразность обеспечения робастности системы и показателей её точности и быстродействия раздельными регуляторами, синтез которых вследствие этого разделения значительно упрощается. Представлен числовой пример практического синтеза робастной системы модального управления, результаты которого подтверждают эффективность применения принципа разделения функций при проектировании систем регулирования

Ключевые слова: автоматическое управление, принципы многоальтернативности, модальные регуляторы, наблюдатели координат состояния

Введение

При проектировании современных систем автоматического регулирования достаточно часто возникают ситуации, в которых теоретическая эффективность разрабатываемых алгоритмов управления вступает в противоречие с возможностью их практического выполнения [1]. В частности, наиболее характерна такая ситуация для задач синтеза адаптивных и робастных систем управления нестационарными объектами [2-5].

Основной причиной этого противоречия является стремление разработчиков к созданию универсальных алгоритмов управления, формирующих законы регулирования в результате решения единой многокритериальной задачи, обеспечивающей синтез системы одновременно по многим показателям её качества: точности, быстродействию, параметрической робастности, инвариантности к возмущениям [6]

При этом игнорируется фундаментальная концепция функционирования сложных систем

– концепция “неусложняемой простоты”: увеличение сложности объекта управления не должно сопровождаться ростом сложности алгоритмов для его управления [7]. Каноническим примером этой концепции может служить любая биологическая система, обеспечивающая своё существование и развитие в существенно нестационарных условиях внешней среды. Причём, чем сложнее и разнообразнее состав этой системы, тем эффективнее она противостоит изменениям этих условий, не испытывая ограничений, связанных с “проклятием” размерности [8].

Анализ процессов функционирования живых систем показывает, что механизмы реализации указанной концепции основаны на ряде общих принципов: принципе многоуровневости управления, специализации и разделения функций, принципе модульности структуры, которые можно объединить общим названием – “принципы многоальтернативности” [9-11].

В искусственных системах идея использования альтернативного управления путём изменения знака обратной связи в системе в зависи-

мости от её текущего состояния была высказана ещё в работе А.М. Лётова [12, 13]. В дальнейшем развитие этой идеи привело к появлению самостоятельного научного направления – теории систем с переменной структурой [14, 15].

В качестве примера управления на основе модульности структуры можно привести высоконадёжную систему регулирования солнечными батареями космической станции, в которой при любом значении тока нагрузки происходит регулирование не всей мощности работающих батарей, а только той её части, которая приходится на одну батарею, т.е. один модуль системы управления [16].

Примером многоуровневости регулирования может служить система управления тепловлажностной обработки бетона, в которой используются три канала подачи пара: нерегулируемый канал, регулируемый канал большой тепловой мощности и регулируемый канал малой мощности [17]. Передача управления между этими каналами осуществляется автоматически в зависимости от значения температуры в паровой камере. В результате этого достигается высокая точность регулирования при минимальном расходе тепловой энергии.

В предлагаемой работе будут рассмотрены приёмы реализации одного из принципов многоальтернативности – принципа разделения и специализации функций, существо которого вытекает из его названия: обеспечение отдельных показателей качества системы управления объектом целесообразно осуществлять независимыми средствами и алгоритмами, синтез которых вследствие такого разделения будет существенно упрощаться.

В качестве примера в работе используется задача модального управления нестационарным колебательным объектом, в которой требуется обеспечить подавление колебаний во всём диапазоне параметрической нестационарности объекта (т.е. робастность управления), а также заданную точность и быстродействие системы.

Постановка задачи

Рассмотрим управляемый и наблюдаемый объект:

$$\begin{aligned}\dot{x}(t) &= Kx(t) + Nu(t); \\ y(t) &= Ax(t),\end{aligned}\quad (1)$$

где $x(t)=[x(t)_1 \dots x(t)_n]^T$ – n -мерный вектор состояния объекта; $u(t)$, $y(t)$ – управляющее воздей-

ствие и выходная координата; N – матрицы управления размером $[n \times 1]$; A – матрица выхода, $[1 \times n]$; K – характеристическая матрица, $[n \times n]$.

Передаточная функция $W(s)$ такого объекта имеет вид:

$$W(s) = \frac{y(s)}{u(s)} = A(sE - K)^{-1}N, \quad (2)$$

$E = \text{diag}(1 \dots 1)$, или

$$\begin{aligned}W(s) &= \frac{B(s)}{C(s)} = \\ &= \frac{b_ms^m + b_{m-1}s^{m-1} + \dots + b_1s + b_0}{s^n + c_{n-1}s^{n-1} + \dots + c_1s + c_0},\end{aligned}\quad (3)$$

где $B(s)$ – гурвицев полином, $m < n$.

Формируя управление в виде $u(t) = g(t) - Rx(t)$, где $g(t)$ – задающее воздействие на систему, а R – модальный регулятор $R = [r_1 \dots r_n]$, получим характеристический полином замкнутой системы $D(s) = |sE - K + NR|$, корни которого $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ можно расположить желаемым образом путём выбора соответствующей матрицы R регулятора.

Для демонстрации робастных свойств полученного управления матрицу K удобно представить в форме Фробениуса:

$$K = \begin{bmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{E}_{n-1} \\ -\mathbf{c} & \end{bmatrix}, \quad (4)$$

$\mathbf{c} = [c_0 \dots c_{n-1}]$. При этом матрицы N и A упрощаются: $N = [0 \dots 0 \ 1]^T$; $A = [b_0 \dots b_m \ 0]$, и желаемый характеристический полином $D(s) = s^n + d_{n-1}s^{n-1} + \dots + d_1s + d_0$ системы примет вид:

$$\begin{aligned}D(s) &= s^n + (c_{n-1} + r_n)s^{n-1} + \dots \\ &+ (c_1 + r_2)s + c_0 + r_1,\end{aligned}\quad (5)$$

из которого следует, что выбрав значения коэффициентов регулятора R таким образом, чтобы выполнялось соотношение

$$r_{i+1} \gg c_i, \quad i = \overline{0, n-1}, \quad (6)$$

можно обеспечить практическую нечувствительность корней $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ желаемого полинома (5) к нестационарности параметров объекта, входящих в коэффициенты $\mathbf{c} = [c_0 \dots c_{n-1}]$.

Разделение функций при синтезе модального регулятора

Способ синтеза робастного модального регулятора непосредственно вытекает из условий (5) и (6):

$$\begin{aligned} |sE - K + NR| &= D(s); \\ r_{i+1} &\geq h_r \cdot c_i, \quad i = \overline{0, n-1}, \end{aligned} \quad (7)$$

где h_r – заранее выбранное число, характеризующее требуемую степень доминирования коэффициентов r_{i+1} регулятора над коэффициентами c_i исходного объекта, например, $h_r \gg 1$.

Задача (7) имеет единственное решение, определяемое только уравнением (5), и это решение в общем случае не удовлетворяет условию (6), т.е. система (7) несовместна.

Воспользуемся принципом разделения функций и выделим из желаемых полюсов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ некоторую часть $k < n$ доминирующих корней $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_k^*$, определяющих динамические свойства объекта. Тогда оставшиеся $n - k$ полюсов останутся свободными, и их выбор будет определяться требованиями (6) к робастности модального регулятора. В результате система (7) станет совместной, и будет обеспечена неединственность решения уравнения (5).

Для исключения влияния свободных полюсов на качество системы последние должны быть в $h_\lambda \gg 1$ раз меньше доминирующих корней:

$$\begin{aligned} \operatorname{Re}(\lambda_j) &\leq h_\lambda \cdot \min[\operatorname{Re}(\lambda_i)]; \\ i &= \overline{1, k}; \quad j = \overline{k+1, n}. \end{aligned} \quad (8)$$

Представим теперь коэффициенты характеристического полинома (5) в виде функций $\varphi_q(R)$ коэффициентов модального регулятора:

$$D(s, R) = s^n + \varphi_{n-1}(R)s^{n-1} + \dots + \varphi_1(R)s + \varphi_0(R), \quad (9)$$

и выразим $\varphi_q(R)$ через полюсы системы λ_i :

$$\varphi_q(R) = d_q(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n); \quad q = \overline{0, n-1}. \quad (10)$$

В результате задачу синтеза грубого модального регулятора можно сформулировать в следующем виде:

$$\begin{cases} \lambda_i = \lambda_i^*; & i = \overline{1, k}; \\ \varphi_q(R) = d_q(\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n); & q = \overline{0, n-1}; \\ r_{\ell+1} \geq h_r \cdot c_\ell; & \ell = \overline{0, n-1}; \\ \operatorname{Re}(\lambda_j) \leq h_\lambda \cdot \min[\operatorname{Re}(\lambda_i)]; & j = \overline{k+1, n}. \end{cases} \quad (11)$$

Задача (11) содержит $2n - k$ неизвестных, $2n - k$ неравенств и n уравнений, т.е. имеет множество решений, количество которых определяется числом $n - k$ свободных переменных. Это обстоятельство позволяет при выборе одного решения для (11) воспользоваться дополнительными соображениями. Например, ввести в (11) некоторый критерий J качества регулятора R и сформулировать задачу поиска экстремума этого критерия, т.е. поставить задачу математического программирования.

Практически полезным вариантом такого критерия может служить критерий компактности значений коэффициентов r_i регулятора: минимум среднеквадратическое отклонение r_i от их среднегеометрического значения $\Omega_r = \sqrt[n]{|r_1 \cdot r_2 \cdot \dots \cdot r_n|}$:

$$J = \sum_{i=1}^n (r_i - \Omega_r)^2 \rightarrow \min. \quad (12)$$

Таким образом, задача синтеза робастного модального регулятора сводится к задаче математического программирования, содержащей функцию цели (12) и ограничения (11).

Из (11) следует, что для практического решения поставленной задачи необходимо задаться желаемым расположением доминирующих полюсов $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_k^*$ системы и коэффициентами h_r и h_λ , обеспечивающими необходимую степень параметрической робастности системы.

Выбор желаемых полюсов определяется целью построения регулятора, и без конкретизации этой цели невозможен. В рамках рассматриваемой работы целью синтеза регулятора является демпфирование нестационарных колебаний объекта с сохранением частот сопряжения участков его частотной характеристики (сохранение собственных постоянных времени объекта). Условие сохранения частот сопряжения вытекает из синергетического подхода к управлению объектом [18]: сохранению тех его свойств, которые не препятствуют достижению цели управления. В соответствии с

этим подходом в исходной совокупности полюсов $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$ объекта следует:

сохранить все вещественные корни;

включить дополнительные вещественные корни, равные мнимым частям k комплексных полюсов;

оставшиеся $n - k$ корней оставить свободными (числовой пример представлен ниже).

Выбор коэффициентов $h_r \gg 1$ и $h_\lambda \gg 1$, обеспечивающих необходимую степень параметрической робастности системы, также определяется конкретными условиями задачи. Известный диапазон изменения параметров объекта позволяет вычислить соответствующий диапазон изменения коэффициентов характеристического полинома системы и далее построить корневые годографы, т.е. найти области локализации его корней на комплексной плоскости – области Гершгорина [19, 20].

Для демпфирования колебательных свойств объекта, например до уровня 5-процентного перегулирования, достаточно, чтобы мнимая часть любого корня в области Гершгорина не превышала его вещественную часть. Если указанное условие не обеспечивается, то следует увеличить h_r и h_λ и повторить синтез регулятора, т.е. процесс выбора значений h_r и h_λ является итерационным.

Отметим, что на практике в некоторых случаях при выборе значений h_r и h_λ может обнаружиться проблема плохой обусловленности характеристического полинома, и возникнет дополнительная задача его регуляризации.

С задачей регуляризации полиномов можно познакомиться в работах [21, 22]. В частности в [21] указывается, что частой причиной плохой обусловленности полиномов является наличие у них кратных корней. Применительно к синтезу модального регулятора это означает, что при выборе системы доминирующих корней $\lambda_1^*, \lambda_2^*, \dots, \lambda_k^*$ следует избегать их совпадения или близкого расположения на комплексной плоскости.

Разделение функций при синтезе наблюдателя

Выше было показано, что при синтезе робастного модального регулятора целесообразно воспользоваться описанием объекта в координатах пространства состояний, образующих характеристическую матрицу Фробениуса (4).

Однако такая система координат $x = [x_1 \dots x_n]^T$ в общем случае не имеет физиче-

ского содержания и возникает дополнительная задача получения вектора x координат состояния на основе только двух доступных физическому измерению величин $u(t)$ и $y(t)$. Эта задача является задачей построения наблюдателя координат x .

Из вида матрицы A следует, что величина $y(t)$ не совпадает ни с одной координатой состояния, и необходимо построить наблюдатель полного порядка [23].

$$\begin{aligned}\dot{\hat{x}}(t) &= K_{ob}\hat{x}(t) + N_{ob}u(t) + Q(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) &= A_{ob}\hat{x}(t),\end{aligned}\quad (13)$$

в котором $\hat{x}(t)$ и $\hat{y}(t)$ наблюдаемые величины; Q – матрица ошибок размером $[n \times 1]$, подлежащая определению; K_{ob} , N_{ob} , A_{ob} – матрицы, элементы которых равны элементам соответствующих матриц K , N , A нестационарного объекта (1) при некотором принятом номинальном значении его параметров.

Переходя к изображениям по Лапласу из (13) получим уравнение движения наблюдателя:

$$\begin{aligned}\hat{x}(s) &= (sE - K_{ob} + QA_{ob})^{-1}N_{ob}u(s) + \\ &+ (sE - K_{ob} + QA_{ob})^{-1}Qy(s),\end{aligned}\quad (14)$$

с характеристическим полиномом

$$|sE - K_{ob} + QA_{ob}| = V(s). \quad (15)$$

Полином $V(s)$ содержит элементы $q_0, q_1, \dots, q_n$ матрицы Q . Это обстоятельство позволяет найти $q_0, q_1, \dots, q_n$ путём почленного приравнивания $V(s)$ к типовому, например, биномиальному полиному n -го порядка $V(s) = (s - \Omega_{ob})^n$, в котором полюсы Ω_{ob} наблюдателя выбираются из соотношения:

$$\Omega_{ob} \gg \sqrt[n]{|\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot \dots \cdot \lambda_n|}. \quad (16)$$

Неравенство (16) обеспечивает малую ошибку наблюдения истинных координат x в условиях нестационарности параметров объекта, т.е. в условиях вариаций элементов матриц K , N и A , в отличие от неизменяемых матриц K_{ob} , N_{ob} , A_{ob} , входящих в уравнение движения наблюдателя. Как будет показано в числовом примере, значение Ω_{ob} приходится выбирать значительно больше среднегеометрического корня объекта, т.е. строить наблюдатель с высоким быстродействием.

При цифровой реализации таких наблюдателей на контроллерах могут возникнуть аппа-

ратные ограничения [24] и от грубых наблюдателей с условием (16) следует переходить к более гибким – адаптивным наблюдателям. Задача построения адаптивных структур наблюдения по сложности своей практической реализации сопоставима с трудностями синтеза грубых наблюдателей.

Остановимся теперь на том обстоятельстве, что введение наблюдателя в структуру системы управления вносит в неё дополнительные нули и полюсы.

Действительно, переписав уравнения (1) и (13) движения объекта и наблюдателя в виде единой системы, на вход которой поступает управляющее воздействие $u(t)$:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Kx(t) + Nu(t); \\ y(t) = Ax(t), \\ \dot{\hat{x}}(t) = K_{ob}\hat{x}(t) + N_{ob}u(t) + Q(y(t) - \hat{y}(t)); \\ \hat{y}(t) = A_{ob}\hat{x}(t), \end{cases} \quad (17)$$

или

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}}(t) \\ \dot{\hat{y}}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K & 0 \\ QA & K_{ob} - QA_{ob} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \hat{x}(t) \\ \hat{y}(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} N \\ N_{ob} \end{bmatrix} \cdot u(t), \quad (18)$$

получим характеристический полином системы в виде:

$$\begin{vmatrix} sE - K & 0 \\ -QA & sE - K_{ob} + QA_{ob} \end{vmatrix} = |sE - K| \cdot |sE - K_{ob} + QA_{ob}|, \quad (19)$$

указывающем на то, что в системе множество полюсов объекта объединяется с множеством полюсов наблюдателя. При этом характеристические полиномы объекта и наблюдателя не содержат общих элементов, т.е. выполняется теорема о разделении собственных значений характеристических матриц объекта и наблюдателя, и размещение полюсов наблюдателя при его синтезе не влияет на значения полюсов объекта [25, 26]. Из этого вытекает, что синтез модального регулятора может осуществляться по условию (7) независимо от наблюдателя [27].

Для определения нулей системы (18) перейдем к изображениям по Лапласу вектора координат $\hat{x}(s)$, воспользовавшись для этого уравнением (14) и очевидным равенством $y(s) = A(sE - K)^{-1}Nu(s)$:

$$\hat{x}(s) = (sE - K_{ob} + QA_{ob})^{-1}N_{ob}u(s) + (sE - K_{ob} + QA_{ob})^{-1}QA(sE - K)^{-1}Nu(s), \quad (20)$$

или

$$\hat{x}(s) = (sE - K_{ob} + QA_{ob})^{-1} \times [N_{ob} + QA(sE - K)^{-1}N]u(s). \quad (21)$$

Первоначально примем, что матрицы наблюдателя равны соответствующим матрицам объекта, т.е. $K_{ob} = K$, $N_{ob} = N$, $A_{ob} = A$. Тогда:

$$\hat{x}(s) = (sE - K + QA)^{-1} \times [N + QA(sE - K)^{-1}N]u(s), \quad (22)$$

и общая передаточная матрица $W_{obj,ob}(s)$ объекта с наблюдателем, связывающая управляющее воздействие $u(s)$ с вектором $\hat{x}(s)$ наблюдаемых координат получит вид:

$$W_{obj,ob}(s) = (sE - K + QA)^{-1} \times [E + QA(sE - K)^{-1}]N. \quad (23)$$

Для дальнейшего преобразования выражения (23) введём обозначения $sE - K = C$, $QA = D$.

Перепишем (23) с учётом обозначений:

$$W_{obj,ob}(s) = [(C + D)^{-1} + (C + D)^{-1}DC^{-1}] \cdot N, \quad (24)$$

и для слагаемого $(C + D)^{-1}$ применим тождество Вудбери [28]:

$$(C + D)^{-1} = C^{-1} - (C + D)^{-1}DC^{-1}. \quad (25)$$

После подстановки (25) в (24) имеем:

$$\begin{aligned} W_{obj,ob} &= [(C + D)^{-1} + (C + D)^{-1}DC^{-1}] \cdot N = \\ &= [C^{-1} - (C + D)^{-1}DC^{-1} + \\ &+ (C + D)^{-1}DC^{-1}] \cdot N = C^{-1}N. \end{aligned} \quad (26)$$

В результате получаем:

$$W_{obj,ob}(s) = (sE - K)^{-1}N, \quad (27)$$

т.е. при $K_{ob} = K$, $N_{ob} = N$, $A_{ob} = A$ передаточная матрица $W_{obj,ob}(s)$ объекта с наблюдателем совпадает с соответствующей передаточной матрицей собственно объекта $W_{obj}(s) = (sE - K)^{-1}N$.

Отсюда следует, что в идеальном случае, при равенстве матриц $K_{ob} = K$, $N_{ob} = N$, $A_{ob} = A$ наблюдателя и объекта, нули наблюдателя совпадают с его полюсами и сокращаются [29].

В реальности, в первую очередь из-за нестационарности объекта, указанные матрицы не равны, и нули, вносимые в систему наблюдателем, отличаются от его полюсов, но могут оставаться близкими к ним.

При выборе полюсов наблюдателя по условию (16) заметного влияния нулей наблюдателя на поведение системы, как правило, не возникает, однако при синтезе необходима проверка этого влияния во всём диапазоне нестационарности параметров объекта.

Разделение функций между регуляторами

Описанный выше модальный регулятор исключает возникновение колебаний в системе в заданном диапазоне параметрической нестационарности объекта, т.е. выполняет функцию его робастного демпфирования.

Решение другой задачи синтеза – обеспечение точности системы и её быстродействия – возможно (и целесообразно с точки зрения простоты реализации) возложить на другой регулятор.

В качестве такого регулятора может быть использовано, например, пропорционально-интегрирующее звено, включение которого в прямой канал системы обеспечит ей свойство астатизма.

Если частоту сопряжения такого регулятора выбрать равной нижней частоте сопряжения частной характеристик объекта, то у амплитудной частотной характеристики разомкнутой системы сформируется низкочастотный участок с наклоном (-20) дБ/дек протяжённостью до второй частоты сопряжения.

Это обстоятельство позволяет обеспечить требуемое время регулирования системы введением в её прямой канал обычного безынерционного звена, коэффициент передачи которого не влияет на выбранные параметры астатического регулятора.

Пример синтеза системы с модальным управлением

Пусть объект описывается передаточной функцией $W_{obj}(s)$ с нестационарной частотой p резонансных колебаний:

$$W_{obj}(s) = \frac{0.2(s + 0.2 + 400j)(s + 0.2 - 400j)}{(s + 0.5 + pj)(s + 0.5 - pj)(s + 100)}. \quad (28)$$

Объект содержит комплексные нули $s_{1,2} = -0.2 \pm 400j$, занимающие доминирующее положение на комплексной плоскости s . Значение среднегеометрического корня объекта: $\Omega_{obj} = 34,2 \text{ с}^{-1}$.

Колебательные свойства объекта для диапазона $p = [6 \dots 20 \dots 60] \text{ с}^{-1}$ демонстрируются его амплитудными $L(\omega)$ и фазовыми $\varphi(\omega)$ частотными характеристиками на рис. 1.

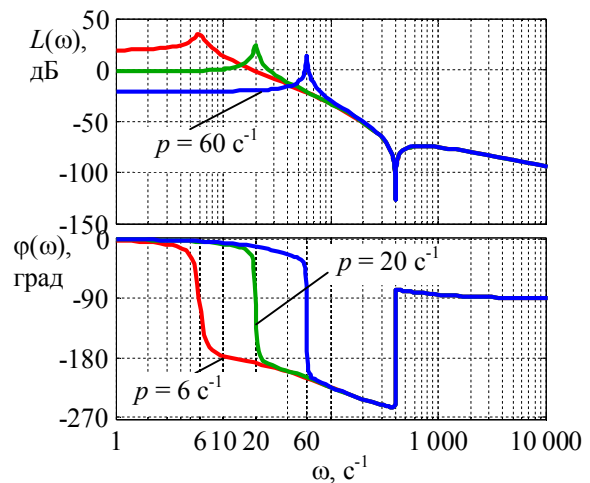


Рис. 1. Логарифмические амплитудные и фазовые частотные характеристики объекта

Синтез модального регулятора в постановке (11) проводился со значениями: $\lambda_1 = -20 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_2 = -100 \text{ с}^{-1}$, $h_r = 5$, $h_\lambda = 5$, где λ_1 и λ_2 выбраны по частотам сопряжения объекта (28) для $p = 20 \text{ с}^{-1}$, см. рис. 1. Полученные коэффициенты модального регулятора: $R = [1133975 \ 71939,75 \ 606]$ обеспечили для этого значения p систему полюсов: $\lambda_1 = -20 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_2 = -100 \text{ с}^{-1}$, $\lambda_3 = -587 \text{ с}^{-1}$. Грубость системы полюсов при изменении p в диапазоне $p = [6 \dots 60] \text{ с}^{-1}$ подтверждается табл. 1.

Таблица 1

Анализ чувствительности полюсов объекта с модальным регулятором при изменении частоты p резонанса

$p, \text{ с}^{-1}$	$\lambda_1, \text{ с}^{-1}$	$\lambda_2, \text{ с}^{-1}$	$\lambda_3, \text{ с}^{-1}$
6	-19,4	-100	-587,6
20	-20	-100	-587
60	-25,7	-100	-581,3

Из табл. 1 следует, что во всём диапазоне изменения частоты p резонанса полюсы системы с модальным регулятором остаются веще-

ственными, т.е. колебательные составляющие в собственном движении объекта отсутствуют (область Гершгорина в данном случае представляет собою отрезок вещественной оси комплексной плоскости корней).

Синтез наблюдателя (13) проводился с выбранными значениями полюсов $\Omega_{ob1} = \Omega_{ob2} = \Omega_{ob3} = 10\Omega_{obj} = -342 \text{ с}^{-1}$. Получены значения матрицы ошибок: $Q = [0,026 \ 8,32 \ 398,4]$. Значения нулей и полюсов, вносимых наблюдателем в систему в диапазоне $p = [6...60] \text{ с}^{-1}$ даны в табл. 2.

Таблица 2

Анализ чувствительности нулей и полюсов, вносимых в систему наблюдателем при изменении частоты p резонанса

$p, \text{ с}^{-1}$	Нули, с^{-1}			Полюсы, с^{-1}
6	$-318+36j$	$-318-36j$	-389	-342,
20	-342	-342	-342	-342,
60	$-382+90j$	$-382-90j$	-262	-342

Табл. 2 показывает, что нули, вносимые в систему наблюдателем во всём диапазоне $p = [6...60] \text{ с}^{-1}$, располагаются достаточно далеко от доминирующего полюса системы $\lambda_1 = -20 \text{ с}^{-1}$ и близки к собственным полюсам наблюдателя $\Omega_{ob1,2,3} = -342 \text{ с}^{-1}$.

Частотные характеристики объекта с наблюдателем и модальным регулятором показаны на рис. 2 и подтверждают отсутствие у него резонансных свойств в рассматриваемом диапазоне нестационарности p .

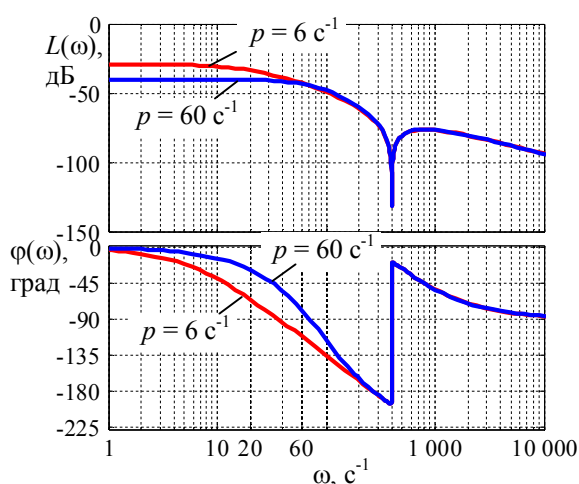


Рис. 2. Частные характеристики объекта с наблюдателем и модальным регулятором для диапазона изменений $p = [6...60] \text{ с}^{-1}$

Анализ полученных частотных характеристик объекта (см. рис. 2) позволяет сообщить

системе свойство астатизма ведением простого пропорционально-интегрирующего звена $W_k(s)$, настроенного на среднюю частоту $p = 20 \text{ с}^{-1}$ и содержащего дополнительный коэффициент передачи, соответствующий подъёму амплитудной характеристики примерно на 20...25 дБ:

$$W_k(s) = \left(1 + \frac{20}{s}\right) \cdot 10. \quad (29)$$

Переходные процессы в системе с наблюдателем, модальным регулятором и пропорционально-интегрирующим звеном показаны на рис. 3.

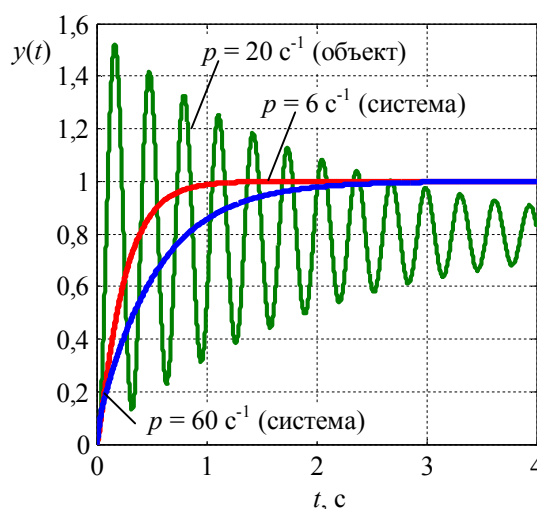


Рис. 3. Переходные процессы на выходе объекта (при $p = 20 \text{ с}^{-1}$) и на выходе системы регулирования (при $p = 6 \text{ с}^{-1}$ и $p = 60 \text{ с}^{-1}$)

Таким образом, результаты численного моделирования подтверждают работоспособность изложенных выше приёмов модального синтеза на основе принципа разделения функций.

Заключение

На примере синтеза робастной системы модального управления нестационарным колебательным объектом продемонстрированы приёмы применения многоальтернативного принципа разделения функций при решении следующих задач:

разделение собственных чисел характеристической матрицы системы на части, одна из которых формирует требуемый монотонный характер переходного процесса в системе, а другая обеспечивает свойство грубости модальному регулятору;

разделение процедур синтеза наблюдателя координат и модального регулятора таким образом, что регулятор и наблюдатель проектируются независимо друг от друга;

разделение задачи обеспечения грубости управления, решаемой модальным регулятором, и задачи обеспечения точности и быстродействия системы, решаемой простейшим пропорционально-интегральным регулятором.

Результаты работы подтверждают методологически ожидаемую эффективность принципа разделения функций, использование которого позволяет существенно упростить многокритериальный синтез систем управления сложными объектами.

Литература

1. Филимонов Н.Б. Методологический кризис "всепобеждающей математизации" современной теории управления // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 5. С. 291-301.
2. Бобцов А.А., Холунин С.А. Развитие методов робастного управления в задачах адаптации // Научно-технический вестник СПб ГИТМО. Вып. 6. Информационные, вычислительные и управляющие системы. СПб.: ГИТМО, 2002. С. 223-228.
3. Дружинина М.В., Никифоров В.О., Фрадков А.Л. Методы адаптивного управления нелинейными объектами по выходу // Автоматика и телемеханика. 1996. № 2. С. 3-33.
4. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Концепция многоальтернативности в синергетической теории управления // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. междунар. науч. конф. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. Т. 7. С. 13-16.
5. Колесников А.А. Синергетическая теория управления: концепция, методы, тенденции развития // Известия Южного федерального университета. Технические науки. 2001. Т. 23. № 5. С. 7-27.
6. Васильев Е.М., Сердечная Е.А., Таволжанский А.В. Синтез высокоточных систем модального управления // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 5. С. 56-63.
7. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Концепция многоальтернативного управления открытыми системами: истоки, состояние и перспективы // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2013. Т. 9. № 2. С. 4-20.
8. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Многоальтернативность: эволюционная стратегия биологических систем // Управление большими системами. 2019. Вып. 77. С. 125-170.
9. 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.
10. 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.
11. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Интеллектуальные системы многоальтернативного управления: принципы построения и пути реализации // XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014: труды. М.: ИПУ РАН, 2014. С. 996-1007.
12. Лётов А.М. Условно устойчивые регулируемые системы (об одном классе оптимальных регулируемых систем) // Автоматика и телемеханика. 1957. № 7. С. 601-604.
13. Уткин В.И. Условно устойчивая система с переменной структурой в работе А.М. Лётова // Автоматика и телемеханика. 2011. № 11. С. 140-142.
14. Емельянов С.В. Системы автоматического регулирования с переменной структурой. М.: Наука, 1967. 336 с.
15. Уткин В.И. Скользящие режимы и их применение в системах с переменной структурой. М.: Наука, 1974. 272 с.
16. Тищенко А.К., Васильев Е.М., Тищенко А.О. Многоальтернативное управление критическими режимами системы электроснабжения космической станции // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2015. Т. 11. № 2. С. 101-106.
17. Васильев Е.М., Таратынов О.Ю. Алгоритмы управления тепловлажностной обработкой бетонных изделий // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 2. С. 13-16.
18. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006. 240 с.
19. Гантмахер Ф.Р. Теория матриц. М.: Наука, 1968. 576 с.
20. Соловьев В.Н. Обобщение теоремы Гершгорина // Изв. АН СССР. Сер. матем. 1983. Т. 47. № 6. С. 1285-1302.
21. Петров Ю.П. Новые главы теории управления и компьютерных вычислений. СПб.: БХВ-Петербург, 2004. 192 с.
22. Васильев Е.М. Синтез модальных регуляторов методом доминирующих корней // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2012. Т. 8. № 1. С. 46-48.
23. Коровин С.К., Фомичев В.В. Наблюдатели состояния для линейных систем с неопределенностью. М.: Физматлит, 2007. 224 с.
24. Анисимов А.А., Тарарыкин С.В. Особенности синтеза параметрически грубых систем модального управления с наблюдателями состояния // Известия РАН. Теория и системы управления. 2012. № 5. С. 3-14.
25. Åström K.J., Murray R.M. Feedback systems: an introduction for scientists and engineers. New Jersey: Princeton University Press, 2021. 528 p.
26. Акимов Л.В., Коцегуб П.Х., Толочко О.И. Особенности синтеза наблюдателей состояния, воздействующих на идентифицируемую часть объекта регулирования // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля. Луганськ. 2002. № 1(47). С. 158-163.
27. Кузовков Н.Т. Модальное управление и наблюдающие устройства. М.: Машиностроение, 1976. 184 с.
28. Golub G.H., Van Loan C.F. Matrix Computations. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 2013. 780 p.
29. Толочко О.И., Коцегуб П.Х., Федоряк Р.В. Анализ линейных систем с наблюдателями состояния // Вестник Харьковского государственного политехнического университета: сб. науч. тр. Тематический выпуск "Проблемы автоматизированного электропривода. Теория и практика". Харьков: ХГПУ, 2000. Вып. 113. С. 78-82.

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

Захватов Владимир Иванович – инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: v.zakhvatov@bk.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

THE PRINCIPLE OF SEPARATION OF FUNCTIONS IN MODAL CONTROL PROBLEMS

S.L. Podvalny, V.I. Zakhvatov, E.M. Vasil'ev

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we identified the methodological reasons for the difficulties arising in the synthesis of complex automatic control systems and substantiated the necessity of building such systems on the basis of the evolutionary principles of multialternative reflecting the mechanisms of functioning of biological communities. We determined the specific goal of the research: the development of practical methods and techniques for the implementation of the multialternative principle of separation of functions in robust control systems. Using the example of the synthesis problem for modal control of a non-stationary oscillatory plant, we showed that the solution of this problem is possible only as a result of dividing the eigenvalues of the characteristic matrix of the system into parts, one of which determines the nature of the transition process in the system, and the other provides robust properties of the modal controller. We formulated recommendations for the choice of the values of the indicated eigenvalues and presented a method for calculating a robust modal controller based on solving an extremal problem of mathematical programming. We discussed the questions of ill-conditioning of the desired characteristic polynomials chosen in the synthesis of a modal controller. We give the analytical foundations of the separate synthesis of the modal controller and the observer of the object state coordinates and a proof of cancellation of the zeros and poles of the observer if the parameters of the observer exactly coincide with the corresponding parameters of the object. We carried out the analysis of the sensitivity of the zeros and poles of the system to the parametric nonstationarity of the object. We demonstrated the possibility and expediency of ensuring the robustness of the system and indicators of its accuracy and performance by separate controllers, the synthesis of which, due to this separation, is significantly simplified. We presented a numerical example of practical synthesis of a robust modal control system, the results of which confirm the effectiveness of the application of the principle of separation of functions in the design of control systems

Key words: automatic control, multialternative principles, modal controllers, state coordinate observers

References

1. Filimonov N.B. "Methodological crisis of "all-conquering mathematization" of modern control theory", *Mechatronics, Automation, Control (Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravlenie)*, 2016, vol. 17, no. 5, pp. 291-301.
2. Bobtsov A.A., Kholunin S.A. "Development of robust control methods in adaptation problems", *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg GITMO. Information, Computing and Control Systems (Nauchno-tekhnicheskiy vestnik SPb GITMO. Informatsionnye, vychislitel'nyye i upravlyayushchie sistemy)*, St. Petersburg, Publishing house of GITMO, 2002, issue 6, pp. 223-228.
3. Druzhinina M.V., Nikiforov V.O., Fradkov A.L. "Methods for adaptive output control of nonlinear objects", *Automation and Telemekhanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 1996, no. 2, pp. 3-33.
4. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "The concept of multi-alternativeness in synergetic control theory", *Mathematical Methods in Engineering and Technology: proc. of the Int. Sci. Conf. "MMTT-30" (Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh: sbornik trudov mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii "MMTT-30")*, St. Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University, 2017, vol. 7, pp. 13-16.
5. Kolesnikov A.A. "Synergetic theory of management: concept, methods, development trends", *News of Southern Federal University. Technical Science (Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskie nauki)*, 2001, vol. 23, no. 5, pp. 7-27.
6. Vasil'ev E.M., Serdechnaya E.A., Tavalzhansky A.V. "Synthesis of high-precision modal control systems", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 5, pp. 56-63.
7. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "The concept of multi-alternative management of open systems: origins, state and prospects", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2013, vol. 9, no.2, pp.4-20.
8. Podvalny 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.
9. Podvalny 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.
10. Podvalny 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.

11. Podvalny S.L., Vasil'ev E.M. "Intelligent systems of multi-alternative control: principles of construction and ways of implementation", *XII All-Russian Meeting on Control Problems of VSPU-2014. Institute of Control Problems. V.A. Trapeznikova RAS: works (XII Vserossiyskoe soveshchaniye po problemam upravleniya VSPU-2014. Institut problem upravleniya im. V.A. Trapeznikova RAN: trudy)*, Moscow, Publishing house of the ICP RAS, 2014, pp. 996-1007.
12. Letov A.M. "Conditionally stable controlled systems (about one class of optimal controlled systems)", *Automation and Telemechanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 1957, no. 7, pp. 601-604.
13. Utkin V.I. "A conditionally stable system with a variable structure in the work of A.M. Letova", *Automation and Telemechanics (Avtomatika i telemekhanika)*, 2011, no. 11, pp. 140-142.
14. Emel'yanov S.V. "Automatic control systems with variable structure" ("Sistemy avtomaticheskogo regulirovaniya s peremennoy strukturoy"), Moscow, Nauka, 1967, 336 p.
15. Utkin V.I. "Sliding modes and their application in systems with variable structure" ("Skol'zyashchie rezhimy i ikh primeneniye v sistemakh s peremennoy strukturoy"), Moscow, Nauka, 1974, 272 p.
16. Tishchenko A.K., Vasil'ev E.M., Tishchenko A.O. "Multi-alternative control of critical modes of the power supply system of the space station", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2015, vol. 11, no.2, pp. 101-106.
17. Vasil'ev E.M., Taratynov O.Yu. "Control algorithms for heat and moisture treatment of concrete products", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no.2, pp. 13-16.
18. Kolesnikov A.A. "Synergetic methods for managing complex systems: the theory of system synthesis" ("Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza"), Moscow, KomKniga, 2006, 240 p.
19. Gantmakher F.R. "Matrix theory" ("Teoriya matrits"), Moscow, Nauka, 1968, 576 p.
20. Solov'ev V.N. "Generalization of Gershgorin's theorem", *News of AS USSR. Mathematical Series (Izvestiya AN SSSR. Seriya matematicheskaya)*, 1983, vol. 7, no. 6, pp. 1285-1302.
21. Petrov Yu.P. "New chapters of control theory and computer calculations" ("Novye glavy teorii upravleniya i komp'yuternykh vychisleniy"), St. Petersburg, BHV-Petersburg, 2004, 192 p.
22. Vasil'ev E.M. "Synthesis of modal controllers by the method of dominant roots", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, vol. 8, no. 1, pp. 46-48.
23. Korovin S.K., Fomichev V.V. "State observers for linear systems with uncertainty" ("Nablyudateli sostoyaniya dlya lineynykh sistem s neopredelennost'yu"), Moscow, Fizmatlit, 2007, 224 p.
24. Anisimov A.A., Tararykin S.V. "Features of the synthesis of parametrically rough modal control systems with state observers", *Bulletin of RAS. Theory and Control Systems (Izvestiya RAN. Teoriya i sistemy upravleniya)*, 2012, no. 5, pp. 3-14.
25. Åström K.J., Murray R.M. "Feedback systems: an introduction for scientists and engineers", New Jersey, Princeton University Press, 2021, 528 p.
26. Akimov L.V., Kotsebug P.Kh., Tolochko O.I. "Features of the synthesis of state observers acting on the identifiable part of the object of regulation", *Bulletin of Skhidnoukrainsky National University named after Volodymyr Dal (Visnik Skhidnoukraïns'kogo natsional'nogo universitetu imeni Volodimira Dalya)*, Lugansk, 2002, no. 1(47), pp. 158-163.
27. Kuzovkov N.T. "Modal control and observing devices" ("Modal'noe upravlenie i nablyudayushchie ustroystva"), Moscow, Mashinostroenie, 1976, 184 p.
28. Golub G.H., Van Loan C.F. "Matrix computations", Baltimore, The Johns Hopkins University Press, 2013, 780 p.
29. Tolochko O.I., Kotsebug P.Kh., Fedoryak R.V. "Analysis of linear systems with state observers", *Bulletin of Kharkov State Polytechnic University: collection of scientific papers. Thematic issue "Problems of an Automated Electric Drive. Theory and Practice (Vestnik Khar'kovskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta: sbornik nauchnykh trudov. Tematicheskii vypusk "Problemy avtomatizirovannogo elektroprivoda. Teoriya i praktika)*, Kharkov, Publishing house of the KhSPU, 2000, issue 113, pp. 78-82.

Submitted 28.12.2021; revised 18.02.2022

Information about the authors

Semyen L. Podvalny, 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
Vladimir I. Zakhvatov, engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: v.zakhvatov@bk.ru, tel.: +7(473) 243-77-18
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

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ТИПОВЫХ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТРЕБОВАНИЙ НА ПАРАМЕТРЫ НАСТРОЙКИ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ НА БАЗЕ ОБЛАЧНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДА DEMATEL

А.А. Левченко¹, В.В. Таратухин²

¹Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

²Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики»,
г. Москва, Россия

Аннотация: в отличие от классических информационных систем класса on-Premises («по запросу»), которые устанавливаются на собственные серверы, системы класса SaaS (Software as a Service, «программное обеспечение как услуга») физически располагаются на удаленных серверах, в облачной среде. Данная особенность накладывает ограничения на доступ к исходному коду системы и не дает возможность его свободного расширения в виде реализаций системных разработок. Таким образом, поскольку информационная система на базе облачных технологий унифицирована и стандартизована, множество реализуемых типовых функциональных требований к системе и множество параметров системы ограничены и представляют собой конечные множества. Цель работы — оценка влияния множества типовых функциональных требований на множество параметров настроек системы и подтверждение влияния множеств друг на друга. В исследовании анализируется влияние множества типовых функциональных требований на множество параметров настройки информационных систем на базе облачных технологий. Для оценки влияния используется метод DEMATEL, который относится к группе методов многокритериального принятия решений. В статье приведены подход к описанию множеств модели объекта исследования, аргументация применения метода DEMATEL и сравнение его с другими методами. Для подтверждения качества исследования расчет выполнялся по количественной шкале через расчет дисперсионного коэффициента конкордации. Приведены пример численного тестового расчета на примере шести факторов, а также результаты применения метода для девятинадцати факторов. Подтверждение факта влияния между множествами позволяет перейти к задаче автоматизированной настройки системы класса SaaS по типовым функциональным требованиям без использования экспертов, которые в настоящее время активно вовлечены при внедрении информационных систем

Ключевые слова: информационные системы, облачные технологии, DEMATEL, функциональные требования, системный анализ, зависимость факторов

Введение

Использование информационных систем для управления операционной деятельностью предприятия в настоящее время является необходимостью. Информационные системы выполняют контроль как внутренних по отношению к предприятию компонентов, таких как материальные ресурсы, финансовые активы, деятельность сотрудников, так и внешних — операции с клиентами, поставщиками, логистическими операторами, банками. Эти сложные технические системы управляют информационными потоками между бизнес-подразделениями в рамках предприятия и между предприятием и рынком.

Развитие технологий, научных методов, моделей ведения бизнеса и других областей знаний за последние годы сильно изменили функциональные возможности, системную архитектуру и методологию внедрения корпоративных информационных систем. Текущие си-

стемы управления предприятия (ERP, Enterprise Resource Planning) уже не только работают в закрытом контуре информационных систем предприятия, они интегрированы с системами поставщиков, клиентов, финансовыми институтами, торговыми площадками, бизнес-сетями, и автоматизированные информационные потоки выходят за пределы информационного ландшафта предприятия. Исследовательская организация Gartner в 2013 году ввела термин «Постмодернистская ERP (Postmodern ERP)», который определен как технологическая стратегия, автоматизирующая и связывающая административные и операционные бизнес-возможности с соответствующими уровнями интеграции [1]. Краткая история развития систем управления ресурсами предприятия представлена на рис. 1. Одна из особенностей нового поколения ERP-систем состоит в использовании таких современных технологий, как интернет вещей, искусственный интеллект, микросервисная архитектура, алгоритмы работы с большими данными, а также облачные технологии.

Название на русском	Системы управления запасами и прогнозами	Планирование потребности в материалах	Планирование потребности в материалах II	Система управления ресурсами предприятия	Система управления ресурсами предприятия II	Постмодернистская система управления ресурсами предприятия
Название на английском	Inventory Control Systems, forecasts	Material Requirement Planning (MRP)	Manufacturing Resource Planning (MRP/II)	Enterprise Resource Planning (ERP)	Enterprise Resource Planning (ERP/II)	Postmodern ERP
Десятилетие	1960	1970	1980	1990	2000	2010+
Особенность	Применение программ для бизнес-операций	Использование спецификации материала и алгоритмов планирования потребности в материалах	Применение замкнутого цикла планирования и расчёт производственных мощностей	Интегрированная база данных, включающая управление персоналом, финансами, контролем качества и другими модулями	Системы, включающие сотрудничество между организациями, например, средствами EDI	Использование стратегии автоматизации и интеграции. Использование технологий искусственного интеллекта, облачных технологий, в т. ч. SaaS, интернета вещей

Рис. 1. История развития систем управления ресурсами предприятия

С появлением облачных технологий изменилась модель взаимодействия между предприятием, использующим информационные системы, и предприятием-поставщиком, предоставляющим данные системы. В частности, это повлияло на методологию внедрения информационных систем, заменив классическую водопадную (waterfall) модель на гибкую модель (agile). Одно из первых определений облачных вычислений было опубликовано Национальным институтом стандартов и технологий в 2011 году [2]. Определение приводится как модель обеспечения повсеместного сетевого доступа к общему пулу настраиваемых вычислительных ресурсов (например, сети, серверы, хранилища, приложения и службы), которые могут быть быстро подготовлены и предоставлены с минимальными усилиями по управлению или взаимодействию с поставщиком услуг. Данное определение не только включает технологическую особенность унификации и стандартизации (единая система с повсеместным доступом для нескольких предприятий), но и отражает преимущество облачных систем (скорость и трудозатраты на внедрение). Облачные технологии позволяют обеспечить сетевой доступ к вычислительным ресурсам провайдера с целью минимизации эксплуатационных затрат. Появившись порядка двадцати лет назад в виде первых облачных CRM-систем и интернет-магазинов, технология усовершенствовалась и является обширной темой для исследователей. Модель облачных вычислений включает пять основных характеристик (самообслуживание, доступ к сети, объ-

единенные ресурсы, эластичность, измеряемый сервис), представлена тремя моделями обслуживания (SaaS — Software as a Service, PaaS — Platform as a Service, IaaS — Infrastructure as a Service) и включает четыре модели развертывания (частное облако, облако сообщества, публичное облако и гибридное облако).

Наибольший сегмент рынка публичных облачных услуг представлен моделью обслуживания типа SaaS [3]. В модели SaaS потребителю предоставляется возможность использовать стандартные информационные системы, работающие в облачной инфраструктуре. Потребитель не контролирует облачную инфраструктуру, которая включает сеть, операционные системы, серверы или в некоторых случаях возможности отдельных приложений, за вероятным исключением ограниченных параметров конфигурации приложения под конкретную компанию как пользователя облачной системы. В случае применения облачных технологий изменение подхода обусловлено изменением системы взаимодействия между предприятием и поставщиком информационных систем на базе облачных технологий, а также ростом влияния на систему типовых функциональных модулей, заложенных в облачных решениях.

В отличие от классических информационных систем класса on-Premises («по запросу»), которые устанавливаются на собственные серверы, системы класса SaaS (Software as a Service, «программное обеспечение как услуга») физически располагаются на удаленных серверах, в облачной среде. Данная особен-

ность накладывает ограничения на доступ к исходному коду системы и не дает возможность его свободного расширения в виде реализаций системных разработок. Таким образом, поскольку информационная система на базе облачных технологий унифицирована и стандартизована, множество реализуемых типовых функциональных требований к системе и множество параметров системы ограничены и представляют собой конечные множества. Несмотря на относительно короткие сроки внедрения благодаря использованию гибких методологий внедрения информационных систем на базе облачных технологий, настройка параметров системы выполняется экспертами вручную на базе предоставленных предприятием функциональных требований.

Цель работы — оценка влияния множества типовых функциональных требований на множество параметров настроек системы и подтверждение влияния множеств друг на друга. Подтверждение факта влияния между множествами позволяет в будущем перейти к решению задачи автоматизированной настройки системы класса SaaS по типовым функциональным требованиям без использования экспертов, которые активно задействуются в настоящее время при внедрении информационных систем.

Для достижения цели были выполнены следующие шаги: анализ имеющихся научных работ в данной области, описание модели задачи исследования, выбор и описание метода исследования, количественный расчет на тестовой выборке данных, расчет на полной выборке факторов модели, анализ результатов и выводы. Статья организована соответствующим образом.

Анализ имеющихся работ

Были проанализированы работы по следующим темам: применение облачных технологий на предприятиях, особенности внедрения облачных информационных систем, методы внедрения и адаптации информационных систем типа SaaS, типовые функциональные требования, методы выбора и поддержки принятия решений для реализации функциональных требований в информационной системе класса SaaS.

Анализ релевантных для исследования работ показал, что типовые функциональные требования успешно применяются при внедре-

нии информационных систем. Применение типовых операционных модулей, которые описывают функциональность информационной системы и включают типовые функциональные требования, позволяет оптимизировать цепочку создания стоимости товара, благодаря этому увеличивается их ценность для предприятий. К примеру, типовые операционные модули были созданы для процессов производства [4], при проектировании архитектуры предприятия [5], для наукоемких предприятий [6], для сферы гостиничного бизнеса [7]. Количественный расчет выгод применения типовых операционных модулей бизнес-процессов предприятия приведен в работе [8].

Формализация функциональных требований при внедрении облачных информационных систем позволяет ИТ-департаментам понять и реализовать пожелания бизнес-департаментов предприятия к автоматизации бизнес-процессов. Проблемы согласованности бизнес-стратегии и ИТ-стратегии для создания ценности бизнеса с помощью облачных информационных систем описаны в работе [9]. В статье перечислены положительные и отрицательные стороны согласованности ИТ-стратегии (применение информационных систем класса SaaS) с бизнес-стратегией (удовлетворение функциональных требований, доступность и возможность гибкой конфигурации системы) для достижения экономической эффективности. Качественное исследование базируется на примере двух предприятий, использующих системы класса SaaS. В статье [10] исследованы факторы, влияющие на согласованность возможностей облачных технологий и функциональных требований предприятий. Основываясь на возможностях предприятий для быстрого изменения бизнес-процессов, авторы предложили модель, базирующуюся на трех факторах, —перспективы динамики предприятия, гибкость организации и гибкость ИТ-функции. В выводах указано, как гибкость организации и гибкость ИТ-функции влияют на согласованность применения на предприятиях облачных технологий в постоянно меняющейся среде. В статье [11] решена количественная оценка финансовой стоимости инвестиций в облачные технологии.

Помимо аналитического анализа, в статье [12] описывается эмпирическое исследование ценности облачных технологий для предприятий, что отчасти послужило концептуальной базой, актуальной для настоящего исследова-

ния. Аспекты согласованности бизнеса и ИТ-функций на предприятии, выраженные в виде формализованных функциональных требований, а также концептуальная модель согласованности бизнеса и ИТ для систем класса SaaS были представлены в работе [9]. В отличие от [13], в данной статье рассматривается ценность, создаваемая использованием типовых операционных модулей, и уделяется больше внимания функциональным требованиям, меньше — стоимости подписки, безопасности и другим аспектам облачных вычислений.

Другими исследователями облачных технологий неоднократно подчеркивается необходимость соответствия между бизнес-процессами и процессами программного обеспечения для SaaS [14]. Предлагается модель настройки систем SaaS, однако модель не устраняет проблему принятия решения о реализации функциональных требований на базе типовых операционных модулей. Другими исследователями отмечено, что процессы закупок сопряжены с наибольшими рисками при применении технологий облачных вычислений для логистической деятельности [15]. В этой работе образцы типовых операционных модулей и данных для вычислительных экспериментов были приведены на примере процессов группы закупок.

Авторы аналитического исследования [16] не отметили ни одного обзора, в котором обсуждается адаптация типовых операционных модулей SaaS компаниями-разработчиками программного обеспечения и влияние функциональных требований на параметры настройки системы, что подчеркивает имеющийся пробел в знаниях в данной области. Авторами обсуждались два важных фактора адаптации: облегчение процесса обновления системы, ее модификации и настройки, а также обеспечение гибкости и масштабируемости пользовательских разработок. Применение типовых операционных модулей и типовых функциональных требований оказывает влияние на оба указанных фактора.

В статье [17] авторы представили концепцию самоадаптирующегося ПО для выполнения динамического обновления облачных систем, однако отсутствует анализ зависимости настроек параметров облачной системы от функциональных требований. В статье [18] представлена модель процесса настройки информационных систем класса SaaS. Основа модели — клиент определяет свои требования к настройке с точки зрения функциональных

возможностей программного обеспечения, а не потребностей бизнеса. Отмечена важность данного подхода для внедрения и адаптации систем класса SaaS. Аналогичные задачи были решены в работе [19] с помощью унифицированной бизнес-ориентированной структуры управления облаком, позволяющей оптимизировать решение и достигнуть цели предприятия с помощью облачных технологий без ограничения выбора конкретного поставщика облачных услуг. В статье описывается подход к снижению сложности управления информационной системой благодаря самоуправлению системы с помощью заданных и настроенных политик. В статье также представлена подробная таксономия.

Еще одна полезная таксономия — метамодель данных — была предложена в [20]. Авторы выполнили подборку наиболее подходящих организационных процессов для аутсорсинга. Данные процессы также хорошо подходят для реализации в облачных информационных системах за счет их унификации. В статье [21] представлена интегрированная структура для непрерывной оценки, управления и развития динамики между разнородными информационными системами класса SaaS и организационными процессами предприятий. Основное внимание уделяется функциональности разнородных систем SaaS и их целостности с точки зрения автоматизации бизнес-процессов предприятия. Авторы определили интегрированную структуру для корреляции функций системы SaaS и бизнес-операций.

В статье [22] обсуждается реализация практик DevOps (development и operations, методология взаимодействия разработчиков системы со специалистами по поддержке и взаимная интеграция их рабочих процессов друг в друга для обеспечения высокого качества информационной системы на базе облачных технологий) в строго регулируемых средах. В этой статье также подчеркивается, что отсутствие централизованного репозитория типовых операционных модулей является серьезной проблемой для внедрения облачных информационных систем. Аналогичная проблема документирования типовых операционных модулей была отмечена на примере аутсорсинга бизнес-процессов в статье [23].

В [24] авторы предложили концептуальный дизайн масштабируемой системной архитектуры для внедрения системы управления процессами в многопользовательской облачной среде. Авторы также подчеркивают про-

блемы перехода типовых операционных модулей с локальных решений класса on-Premise на класс SaaS. Автор рассматривает системы управления описаниями организационных процессов, а не управление отдельными процессами, такими как закупки, поэтому архитектура предложенного в статье решения не подходит для работы с функциональными требованиями в качестве входных данных. В статье [25] уделяется внимание быстрому внедрению облачных систем при низких затратах на ИТ и классификации создания ценности. В соответствии с данной классификацией текущее исследование будет относиться к блоку повышения эффективности за счет большей симметрии информации.

В результате анализа релевантных для изучения работ обнаружен пробел в исследованиях в области оценки влияния множества типовых функциональных требований на множество параметров настроек системы и подтверждения влияния множеств друг на друга. Нехватка научных исследований в этой сфере определяет научную новизну исследования.

Модель задачи исследования

Операционный модуль бизнес-процессов предприятия M определен через функцию

$$M = f(\vec{R}, \vec{S}, \vec{L}) = f(\vec{R}, \vec{R} \rightarrow \vec{S}, \vec{R} \rightarrow \vec{L}), \quad (1)$$

где $\vec{R}$ — вектор функциональных требований к системе, $\vec{S}$ — вектор настроек параметров системы, $\vec{L}$ — вектор ограничений облачной системы.

В структурном виде операционный модуль задан как

$$M_i = \langle R_i, S_i, M_i, P_i, I_i, F_i \rangle, \quad (2)$$

где R_i — описание функциональных требований к системе, S_i — настройка параметров информационной системы, M_i — описание шагов процесса, P_i — описание ролей и полномочий пользователей системы, I_i — описание потоков данных и инструментов загрузки и выгрузки данных из системы, F_i — функциональные спецификации для нестандартных требований. Решение задачи выбора типовых операционных модулей включает анализ возможности и выбор метода преобразования $\vec{R} \rightarrow \vec{S}$.

Поскольку стандартные функциональные требования могут формироваться разными

экспертами в различных формулировках и подвержены неточности, специфичной для человеческих суждений, они имеют лингвистическую неопределенность. Таким образом, могут быть заданы через функции принадлежности и описаны инструментами теории нечетких множеств. Множество функциональных требований R :

$$R = \{\vec{R} | g_i(r_i) \leq 0, i = 1, \dots, n\} \subset RS, \quad (3)$$

где $\vec{R} = \{r_1, r_2, \dots, r_n\}$ — вектор функциональных требований, $g_i(r)$ — функция ограничений допустимых требований, n — число функциональных требований, RS — нечеткое множество допустимых требований. Множество RS является нечетким множеством вида:

$$RS = \{(r_i, \mu_{RS}(r_i)) | r_i \in U\}, \quad (4)$$

где $\mu_{RS}(r_i)$ — функция принадлежности, описывающая, в какой мере элемент r_i принадлежит нечеткому множеству RS , U — универсальное множество.

Множество настроек параметров информационной системы S представляет собой множество конфигураций системы, необходимых для выполнения функциональных требований, может быть представлено в следующем виде:

$$S = \{\vec{S} | g_i(s_i) \leq 0, i = 1, \dots, is\} \subset SS, \quad (5)$$

где $\vec{S} = \{s_1, s_2, \dots, s_{is}\}$ — вектор объекта настройки, $g_i(s_i)$ — функция ограничений (взаимная непротиворечивость конфигурации параметров), is — число параметров настройки, SS — нечеткое множество допустимых значений параметров настройки. Множество SS является множеством вида:

$$SS = \{(s_i, \mu_{SS}(s_i)) | s_i \in U\}, \quad (6)$$

где $\mu_{SS}(s_i)$ — функция принадлежности (характеристическая функция), U — универсальное множество.

Для оценки влияния множества типовых функциональных требований R на множество параметров настроек системы S и подтверждения влияния множеств друг на друга предлагается анализ возможности преобразования векторов $\vec{R} \rightarrow \vec{S}$.

Описание метода DEMATEL

Для анализа связи структурных элементов множества операционных модулей, а именно возможности преобразования $\vec{R} \rightarrow \vec{S}$, был выбран и применен метод DEMATEL (Decision making trial and evaluation laboratory, лаборатория испытаний и оценки принятия решений) [26]. В отличие от других методов многокритериального принятия решений, данный метод позволяет преобразовать взаимосвязи между факторами в понятную структурную модель системы и разделить их на группу причин и группу следствий. В табл. 1 приведено сравнение метода DEMATEL с другими популярными методами многокритериального принятия решений, преимущества и недостатки метода [27, 28].

Таблица 1

Сравнение метода DEMATEL с другими методами

Название метода	Описание метода
Лаборатория испытаний и оценки принятия решений DEMATEL (Decision making trial and evaluation laboratory)	Метод позволяет преобразовать взаимосвязи между факторами в структурную понятную модель системы и разделить их на две группы — причины и следствия
Метод анализа иерархий АНР (Analytic Hierarchy Process)	С помощью этого метода рассматривается распределение цели между сравниваемыми элементами и определяется, какой из них имеет большее влияние на эту цель
Серый реляционный анализ GRA (grey relational analysis)	Модель оценки воздействия, позволяющая измерить степень сходства или различия между двумя последовательностями на основе степени взаимосвязи
Методика предпочтения по подобию идеальному решению TOPSIS (The Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution)	Основной принцип состоит в том, что выбранная альтернатива должна иметь кратчайшее расстояние от идеального решения и максимальное расстояние от отрицательно-идеального решения
Многокритериальная оптимизация и компромиссное решение VIKOR (ViseKriterijumska Optimizacija I Kompromisno Resenje)	Метод, с помощью которого вводится индекс ранжирования, основанный на мере «близости» к идеальному решению. Для этого применяется линейная нормализация
ELECTRE (ELimination Et Choice Translating REality)	Метод, позволяющий выбрать самую лучшую активность по рангу из предложенного набора активностей. Основан на теории многоатрибутной полезности

Преимущества метода DEMATEL:

— позволяет лицам, принимающим решения, понимать, какие факторы оказывают влияние друг на друга. Визуализирует взаимосвязи между факторами;

— применяется для анализа прямых и косвенных взаимных влияний между различными факторами. Тем самым позволяет определить причинно-следственные связи в проблемах принятия решений;

— метод можно использовать для определения критических критериев оценки и измерения веса критериев оценки, а не только для определения ранжирования альтернатив. Хотя АНР может применяться для ранжирования альтернатив и определения весовых коэффициентов критериев, он предполагает, что критерии независимы, и не учитывает их взаимодействия и зависимости. АНР, расширенная версия АНР, может иметь дело с зависимостью и обратной связью между критериями; но предположение о равном весе для каждого кластера для получения взвешенной матрицы в АНР нецелесообразно в практических ситуациях;

— может быть интегрирован с другими методами многокритериального принятия решений, чтобы объединить желаемые свойства.

Недостатки метода DEMATEL:

— не учитывается относительный вес экспертов, выполняющих оценку, при агрегировании в групповые оценки личных суждений экспертов;

— определяется ранжирование альтернатив на основе взаимозависимых отношений, однако при принятии решений прочие критерии не учитываются;

— в отличие от методов GRA и VIKOR, не принимается во внимание уровень стремления альтернатив, а также, в отличие от подхода ELECTRE, получение частичных порядков ранжирования альтернатив.

Таким образом, применение метода позволяет определить наличие причинно-следственной связи и степень корреляции между множеством функциональных требований к облачной информационной системе $\vec{R}$ и множеством системных реализаций $\vec{S}$.

Выборка для метода DEMATEL формировалась на базе группы типовых функциональных требований к процессам закупки и по списку параметров облачной информационной системы. Для оценки влияния между факторами системы функциональных требований и реализации в виде конфигураций настройки параметров экспертам предлагалось заполнить матрицу прямых влияний $FR = [fr_{ij}]_{n \times n}$ с эле-

ментами:

$$fr_{ij} = \frac{1}{l} \sum_{k=1}^l fr_{ij}^k, \quad (7)$$

где $i, j = 1, 2, \dots, n$.

В проводимом эксперименте количество экспертов $E = \{E_1, E_2, \dots, E_l\}$, $l = 3$, количество факторов $F = \{F_1, F_2, \dots, F_n\}$, $n = 96$. Оценка экспертов происходила с применением классической и широко используемой на практике для метода DEMATEL целочисленной шкалы [27, 29] со значениями: 0 (нет влияния), 1 (слабое влияние), 2 (среднее влияние), 3 (высокое влияние), 4 (очень высокое влияние). После выполнения оценки матрица FR была нормализована, и результат представлен матрицей

$$FN = [fn_{ij}]_{n \times n}, \quad FN = \frac{FR}{s}, \quad (8)$$

где s определяется как:

$$\max \left(\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n fr_{ij}, \max_{1 \leq i \leq n} \sum_{i=1}^n fr_{ij} \right). \quad (9)$$

Все элементы матрицы FN соответствуют условиям $0 \leq fn_{ij} \leq 1$, $0 \leq \sum_{j=1}^n fn_{ij} \leq 1$, и по крайней мере для одного i справедливо $0 \leq \sum_{j=1}^n fr_{ij} \leq s$. Далее с помощью нормализованной матрицы FN вычисляется матрица полного влияния факторов функциональных требований и конфигураций системы $FT = [ft_{ij}]_{n \times n}$. Вычисление происходит путем суммирования прямых и не прямых зависимостей:

$$FT = \lim_{h \rightarrow \infty} (FN + FN^2 + FN^3 + \dots + FN^h). \quad (10)$$

Матрица FT позволяет рассчитать векторы влияний $R = [r_i]_{n \times 1} = [\sum_{j=1}^n ft_{ij}]_{n \times 1}$ и $C = [c_j]_{1 \times n} = [\sum_{i=1}^n ft_{ij}]_{1 \times n}$, где r_i — это сумма i -й строки матрицы FT, которая отражает сумму прямых и не прямых влияний фактора F_i на другие факторы, и аналогично c_j — это сумма j -го столбца матрицы FT, которая отражает сумму прямых и не прямых влияний на фактор F_j . Пусть $i = j$ и $i, j = \{1, 2, \dots, n\}$, тогда вектор горизонтальной оси ($R + C$) «Важность» иллюстрирует силу влияния фактора или на фактор и вектор вертикальной оси ($R - C$) «Отношение» иллюстрирует общее влияние фактора на систему. Факторы F_j , для которых справедливо $(r_j - c_j) > 0$, были отнесены к группе причин. Факторы F_j , для которых $(r_j - c_j) < 0$, подвержены влиянию других факторов системы и отнесены к группе следствий.

Применение метода на тестовой репрезентативной выборке

В данном разделе приведен пример использования метода DEMATEL для шести факторов. Факторы приведены в табл. 2. В качестве факторов использовались параметры информационной системы на базе облачных технологий для управления процессами закупки предприятия SAP Arriba [30].

Таблица 2

Тестовая репрезентативная выборка из шести факторов

Код фактора	Описание фактора
R1	Выполнять системную проверку бюджета на этапе создания заявки, а не на этапе финального согласования заявки
R2	Не выполнять проверку бюджета для заявок, загруженных методом интеграции с другой системой
R3	Не позволять создавать и согласовывать заявки для позиций, в которых не найдена статья бюджета
S1	Настройка параметра Application.Budget.CheckBudgetDuringFinalApproval «Проверка бюджета на финальном этапе согласования»
S2	Настройка параметра Application.Budget.CheckEnabledOnReqImport «Активация проверки бюджета для импортированных заявок»
S3	Настройка параметра Application.Budget.FailCheckOnNoBudget «Прерывание функции проверки бюджета при его отсутствии»

Значения матрицы прямых влияний приведены в табл. 3. Значения для матрицы были определены экспертом по настройке информационной системы на базе облачных технологий SAP Arriba.

Таблица 3

Матрица прямых влияний

	R1	R2	R3	S1	S2	S3	Сумма по строке
R1	0	1	1	4	1	3	10
R2	3	0	3	2	4	2	14
R3	2	3	0	2	1	4	12
S1	2	1	2	0	2	2	9
S2	1	2	2	1	0	2	8
S3	1	1	2	1	3	0	8
						Максимум по сумме строк	14

Была выполнена нормализация матрицы. Результат представлен в табл. 4.

Таблица 4
Результат нормализации матрицы прямых влияний

0.0000	0.0714	0.0714	0.2857	0.0714	0.2143
0.2143	0.0000	0.2143	0.1429	0.2857	0.1429
0.1429	0.2143	0.0000	0.1429	0.0714	0.2857
0.1429	0.0714	0.1429	0.0000	0.1429	0.1429
0.0714	0.1429	0.1429	0.0714	0.0000	0.1429
0.0714	0.0714	0.1429	0.0714	0.2143	0.0000

Далее, согласно методу, была рассчитана матрица I — Y (табл. 5).

Таблица 5

Матрица I — Y

1.0000	-0.0714	-0.0714	-0.2857	-0.0714	-0.2143
-0.2143	1.0000	-0.2143	-0.1429	-0.2857	-0.1429
-0.1429	-0.2143	1.0000	-0.1429	-0.0714	-0.2857
-0.1429	-0.0714	-0.1429	1.0000	-0.1429	-0.1429
-0.0714	-0.1429	-0.1429	-0.0714	1.0000	-0.1429
-0.0714	-0.0714	-0.1429	-0.0714	-0.2143	1.0000

Выполнена инверсия (I — Y). Результат представлен в табл. 6.

Таблица 6

Инверсия (I — Y)

1.2576	0.2999	0.3628	0.5211	0.3930	0.546
8144	9575	0505	4189	4297	61612
0.5441	1.3476	0.5934	0.5279	0.6813	0.651
7586	1407	6188	7196	1143	44072
0.4508	0.4788	1.3712	0.4772	0.4838	0.694
248	3950	723	5049	7693	10697
0.3660	0.2967	0.3993	1.2682	0.4227	0.476
5985	5097	8566	7039	5346	51941
0.2985	0.3436	0.3888	0.3144	1.2893	0.453
8701	8018	4011	3037	4814	28849
0.2832	0.2809	0.3760	0.3010	0.4523	1.315
3770	3431	5125	8402	5044	90397

Рассчитанная матрица полного влияния приведена в табл. 7.

Таблица 7

Матрица полного влияния

0.2577	0.3000	0.3628	0.5211	0.3930	0.5466
0.5442	0.3476	0.5935	0.5280	0.6813	0.6514
0.4508	0.4788	0.3713	0.4773	0.4839	0.6941
0.3661	0.2968	0.3994	0.2683	0.4228	0.4765
0.2986	0.3437	0.3888	0.3144	0.2893	0.4533
0.2832	0.2809	0.3761	0.3011	0.4524	0.3159

На основании матрицы полных влияний посчитаны факторы R и C. Значения факторов приведены в табл. 8.

Таблица 8
Значения факторов R и C

	Ri	Ci	Ri + Ci	Ri — Ci	Распознавание
R1	2.3813	2.2006	4.5818	0.1807	Причина
R2	3.3460	2.0478	5.3938	1.2982	Причина
R3	2.9562	2.4918	5.4480	0.4644	Причина
S1	2.2297	2.4101	4.6399	-0.1804	Следствие
S2	2.0882	2.7227	4.8109	-0.6345	Следствие
S3	2.0096	3.1379	5.1474	-1.1283	Следствие

T-матрица приведена в табл. 9.

Таблица 9

T-матрица

	R1	R2	R3	S1	S2	S3
R1	0.2576 8	0.3000 0	0.3628 1	0.5211 4	0.3930 4	0.5466 2
R2	0.5441 8	0.3476 1	0.5934 6	0.5279 7	0.6813 1	0.6514 4
R3	0.4508 2	0.4788 4	0.3712 7	0.4772 5	0.4838 8	0.6941 1
S1	0.3660 6	0.2967 5	0.3993 9	0.2682 7	0.4227 5	0.4765 2
S2	0.2985 9	0.3436 8	0.3888 4	0.3144 3	0.2893 5	0.4532 9
S3	0.2832 4	0.2809 3	0.3760 5	0.3010 8	0.4523 5	0.3159 0

Определенное значение Альфа — 0.41697. Вектор горизонтальной оси (R + C) «Важность» иллюстрирует силу влияния фактора или на фактор, и вектор вертикальной оси (R — C) «Отношение» иллюстрирует общее влияние фактора на систему. Факторы F_j , для которых справедливо $(r_j - c) > 0$, были отнесены к группе причин. Факторы F_j , для которых $(r_j - c) < 0$, подвержены влиянию других факторов системы и отнесены к группе следствий. Результат применения метода представлен на рис. 2.

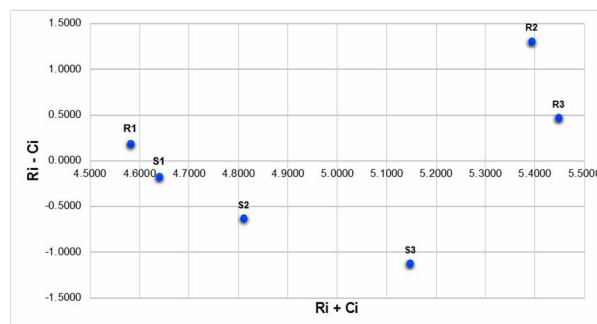


Рис. 2. Результат применения метода для шести факторов

Влияние факторов представлено на рис. 3.

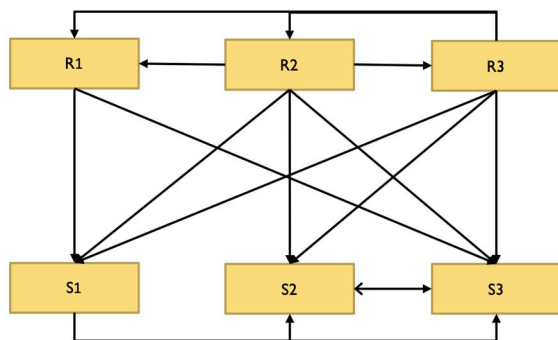


Рис. 3. Влияние факторов друг на друга

Результаты тестирования метода на тестовой репрезентативной выборке признаны успешными на основании обратной связи экспертов по настройке облачных систем. Из результатов применения метода явно видно преобладающее влияние факторов функциональных требований на факторы настроек параметров информационной системы на базе облач-

ных технологий.

Применение метода на полной выборке параметров по одному процессу информационной системы

По аналогии был проведен эксперимент на полной выборке параметров по одному процессу информационной системы. В качестве выбранного процесса использовался процесс создания и согласования заявки на закупку. Результат применения метода на выборке с 96 факторами в результате опроса экспертов представлен на рис. 4.

Из рисунка видно, что группа факторов с обозначением «R» находится выше оси ординат, а группа факторов с обозначением «S» — ниже, что дает основания сделать заключение о возможности преобразования $\vec{R} \rightarrow \vec{S}$.

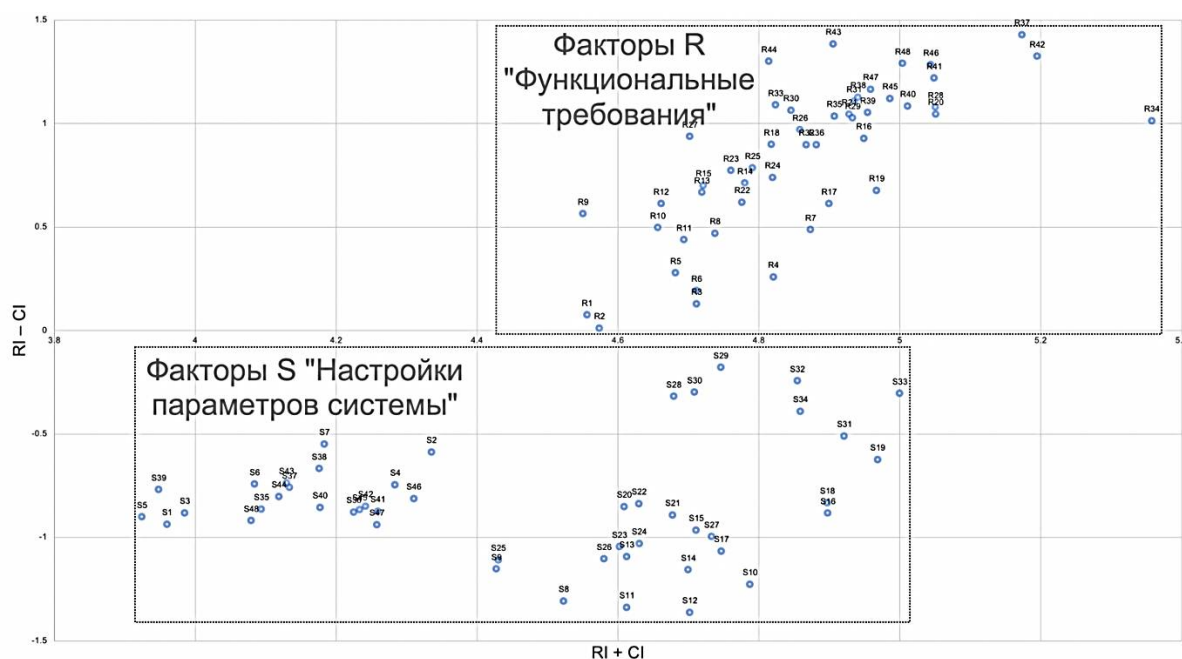


Рис. 4. Результат применения метода DEMATEL на полной выборке

Поскольку в эксперименте принимало участие несколько экспертов, была выполнена количественная оценка согласованности их мнений. Несмотря на то, что данный этап выходит за рамки стандартного метода DEMATEL, для подтверждения качества исследования расчет выполнялся по количественной шкале через расчет дисперсионного коэффициента конкордации:

$$W = \frac{12S}{l^2(n^3 - n) - l \sum_{j=1}^l T_j}; \quad (11)$$

$$T_j = \sum_{k=1}^{H_j} (h_k^3 - h_k); \quad (12)$$

$$S = \sum_{i=1}^n (ft_i - \bar{ft})^2; \quad (13)$$

$$ft_i = \sum_{j=1}^l ft_{ij}; \quad (14)$$

$$\bar{ft} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n ft_i, \quad (15)$$

где $i = 1, 2, \dots, n$, T_j — показатель связанных рангов в j -й ранжировке, H_j — число групп равных рангов в k -й группе связанных рангов при ранжировке j -м экспертом.

Расчетные значения равны: $T1 = 35$, $T2 = 39.5$, $T3 = 40.5$, сумма $T = 115$; $S = 657640.5$, $l =$

3, $n = 96$; $W = 99.12416$ %.

Расчетное значение W равно 0,9912416, что интерпретируется как крайне высокая степень согласованности мнений экспертов. То есть верно заключение о том, что имеется возможность выполнить преобразование векторов $\vec{R}$ в $\vec{S}$.

Заключение

В работе был выполнен анализ влияния вектора функциональных требований на вектор настройки с применением метода DEMATEL и расчетом дисперсионного коэффициента конкордации по количественной шкале. Проверка метода сначала выполнялась на тестовой репрезентативной выборке, а затем на полной выборке типовых функциональных требований и параметров настройки по процессам закупки информационной системы SAP Arriba в части управления заявками на закупку.

Доказано влияние вектора функциональных требований на вектор параметров настройки информационной системы на базе облачных технологий. Данное заключение позволяет перейти к задаче автоматизированной настройки системы класса SaaS по типовым функциональным требованиям без использования экспертов, которые в настоящее время активно вовлечены при внедрении информационных систем.

Литература

1. Gartner Glossary — Postmodern ERP. URL: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/postmodern-erp> (дата обращения: 08.01.2022).
2. Mell P., Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing // National Institute of Standards and Technology. Special Publication 800–145. 2011. P. 1–7.
3. Gartner Forecasts Worldwide Public Cloud End-User Spending to Grow 23 % in 2021 or 21.04.2021 // URL: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-04-21-gartner-forecasts-worldwide-public-cloud-end-user-spending-to-grow-23-percent-in-2021#:~:text=Cloud%20Spending%20Driven%20by%20Emerging,latest%20forecast%20from%20Gartner%2C%20Inc> (дата обращения: 08.01.2022).
4. Taratoukhine V., Yadgarova Y., Skachko E. A Fuzzy Multiagent Approach for Integrated Product Life Cycle Environment // Recent Developments and New Direction in Soft-Computing Foundations and Applications. 2016. № 342. P. 99–110.
5. Shteyngart E.A., Burmistrov A.N. Review and comparative characteristics of methodologies for the development of enterprise architecture (Obzor i sravnitel'naya harakteristika metodologiy razrabotki arhitekturyi predpriyatiy) // Scientific and technical statements of SPbSPU. Economic Sciences (Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbGPU. Ekonomicheskie nauki). 2016. № 3 (245). P. 111–129.
6. Ilyin I.V. Developing a reference model of the information system architecture of high-tech enterprises // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Экономические науки. 2015. № 5 (228). С. 97–107.
7. Топольник В.Г., Крылова Л.В. Функциональное моделирование процессов оказания гостиничных услуг // Экономика, предпринимательство и право. 2017. Т. 7. № 3. С. 185–207.
8. Levina A.I., Ilyin I.V., Esedulaev R.A. Increasing the efficiency of projects for the implementation of information systems of the BPMS class using standard design solutions (Povyishenie effektivnosti proektov vnedreniya informatsionnykh sistem klassa BPMS s ispolzovaniem tipovykh proektnykh resheniy) // Science and business: ways of development (Nauka i biznes: puti razvitiya). 2017. № 4. P. 9–14.
9. Ali M.B., Wood-Harper T., Ramlogan R. Challenges of value creation through cloud SaaS: Business — IT-alignment in service oriented industries // Proc. Conference: 25th UK Academy for Information Systems International. 2020. P. 1–18.
10. Shao M., Li X. An Empirical Study of Impact Factors on the Alignment of Cloud Computing and Enterprise // 2nd International Conference on Advances in Computer Technology, Information Science and Communications (CTISC). 2020. P. 70–74.
11. Quantifying the Financial Value of Cloud Investments: A Systematic Literature Review / P. Rosati, G. Fox, D. Kenny, T. Lynn // Proc. Int. Conf. Cloud Comput. Technol. Sci. CloudCom. 2017. Vol. Decem. P. 194–201.
12. Kyriakou N., Loukis E. Cloud Computing Business Value and Human Determinants // Proc. 21st Pan-Hellenic Conf. Informatics PCI 2017. 2017. P. 1–6.
13. Bernsteiner R., Kilian D., Ebersberger B. Mobile Cloud Computing for Enterprise Systems: A Conceptual Framework for Research // International Journal of Interactive Mobile Technologies (IJIM). 2016. № 10. P. 72–76.
14. Li K.F., Wen H.Y., Yang Z.J. Business logic structure of saas-based E-commerce system // Proc. IEEE 17th Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag. IE EM2010. 2010. P. 316–319.
15. Towards the design of a scalable business process management system architecture in the cloud / H.M. Arthur, C. Ouyang, M. Adams, A.H.M. Hofstede, Y. Yu // 37th International Conference. 2018. P. 334–348.
16. Saltan A., Seffah A. Engineering and business aspects of SaaS model adoption: Insights from a mapping study // CEUR Workshop Proc. 2018. Vol. 2305. P. 115–127.
17. Gey F., Van Landuyt D., Joosen W. Evolving multi-tenant SaaS applications through self-adaptive upgrade enactment and tenant mediation // Proc. 11th Int. Symp. Softw. Eng. Adapt. Self-Managing Syst. SEAMS. 2016. P. 151–157.
18. Khan K.M., Nhlabatsi A., Khan N. A Process Model for Customisation of Software in Multi-tenant SaaS Model // Proc. IEEE/ACM 8th Int. Conf. Util. Cloud Comput. UCC. 2015. P. 418–419.
19. Indonesia P.P., Milwandhari S. Risk Analysis of Cloud Computing in the Logistics Process // Third International Conference on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE). 2020. P. 1–5.
20. A model-driven engineering approach for business process based saas services composition / N. Fattouch, M. Rekik, A.A. Wakrime, K. Boukadi // Proc. IEEE/ACS Int. Conf. Comput. Syst. Appl. AICCSA. 2019. Vol. Novem. P. 1–8.
21. Lu Q. A Unified Business-Driven Cloud Management Framework // IEEE Trans. Serv. Comput. 2016. Vol. 9. No. 6. P. 872–882.
22. Morales J.A., Yasar H., Volkman A. Implementing DevOps practices in highly regulated environments // ACM Int. Conf. Proceeding Ser. 2018. Vol. Part F1477. P. 1–9.
23. Saito S. Understanding Key Business Processes for Business Process Outsourcing Transition // Proc. ACM/IEEE

14th Int. Conf. Glob. Softw. Eng. ICGSE. 2019. P. 35–39.

24. Shah V.S. Evolving dynamics of heterogeneous SAAS applications and business process automation in real-time enterprises // Towar. Digit. World Ind. X.0 Proc. 29th Int. Conf. Int. Assoc. Manag. Technol. IAMOT. 2020. No. September. P. 47–61.

25. Value creation using clouds: Analysis of value drivers for start-ups and small and medium sized enterprises in the textile industry/ A. Mladenow, E. Fuchs, P. Dohmen, C. Strauss // Proc. 26th IEEE Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl. Work. WAINA. 2012. P. 1215–1220.

26. Gabus A. & Fontela E. World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL. Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Center, 1972. P. 1–8.

27. DEMATEL Technique: A Systematic Review of the

State-of-the-Art Literature on Methodologies and Applications/ S.-L. Si, X.-Y. You, H.-C. Liu, P. Zhang // Mathematical Problems in Engineering. 3696457. 2018. P. 1–33.

28. Velasquez M., Hester P. An analysis of multi-criteria decision making methods // International Journal of Operations Research. 2013. № 10. P. 56–66.

29. Панди М., Литория Р., Панди П. Применение подхода Fuzzy-DEMATEL при анализе проблем мобильных приложений // Труды ИСП РАН. 2019. Т. 31. Вып. 4. С. 73–96.

30. Решения коллаборативной коммерции для всего закупочного процесса // Цифровая трансформация всего процесса закупок: [сайт]. URL: <https://www.ariba.com/ru-ru/solutions/solutions-overview> (дата обращения: 08.01.2022).

Поступила 10.01.2022; принята к публикации 21.02.2022

Информация об авторах

Левченко Артем Андреевич — соискатель кафедры информационных технологий управления, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: artyom.levchenko@gmail.com

Таратухин Виктор Владимирович — канд. техн. наук, профессор базовой кафедры компании «САП» (программные решения для управления бизнесом), Национальный исследовательский университет «Высшая школа экономики» (101000, Россия, г. Москва, ул. Мясницкая, д. 20), e-mail: vtaratoukhine@hse.ru

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF TYPICAL FUNCTIONAL REQUIREMENTS ON THE INFORMATION SYSTEM SETUP PARAMETERS BASED ON CLOUD TECHNOLOGIES USING THE DEMATEL METHOD

A.A. Levchenko¹, V.V. Taratukhin²

¹Voronezh State University, Voronezh, Russia

²National Research University Higher School of Economics, Moscow, Russia

Abstract: unlike classic on-Premises information systems, which are installed on their own servers, SaaS (Software as a Service) systems are physically located on remote servers in the cloud. This feature imposes restrictions on access to the system's source code and does not allow its free extension in the form of system development implementations. Thus, since the information system based on cloud technologies is unified and standardized, the set of standard functional requirements for the system's design and the set of parameters of the system are limited and represent finite sets. The work aims to assess the influence of a set of typical functional requirements on a set of system settings parameters and to confirm the influence of the sets on each other. The study analyzes the impact of many typical functional requirements on many settings for configuring cloud-based information systems. The DEMATEL method is used to assess the impact, which belongs to the group of multi-criteria decision-making methods. The article provides an approach to describing the sets of the model of research's objects, the argumentation of the DEMATEL method's application, and the comparison of the method with others. We performed the calculation on a quantitative scale through the dispersion coefficient of concordance to confirm the study's quality. We give an example of a numerical test calculation for the example of six factors and the results of applying the method for ninety-six factors. Confirmation of the influence between the sets allows you to move on to the task of automated configuration of a SaaS-class system according to typical functional requirements without the use of experts who are currently actively involved in the implementation of information systems

Key words: information systems, cloud technologies, DEMATEL, functional requirements, system analysis, dependence of factors

References

1. Gartner Glossary - Postmodern ERP, available at: <https://www.gartner.com/en/information-technology/glossary/postmodern-erp> (date of access: 08.01.2022).
2. Mell P., Grance T. "The NIST definition of cloud computing", National Institute of Standards and Technology, Special Publication 800–145, 2011, pp. 1–7.
3. Gartner Forecasts Worldwide Public Cloud End-User Spending to Grow 23 % in 2021, available at: <https://www.gartner.com/en/newsroom/press-releases/2021-04-21-gartner-forecasts-worldwide-public-cloud-end-user-spending-to-grow-23-percent-in-2021#:~:text=Cloud%20Spending%20Driven%20by%20Emerging,latest%20forecast%20from%20Gartner%2C%20Inc> (date of access: 08.01.2022).
4. Taratoukhine V., Yadgarova Y., Skachko E. "A fuzzy multiagent approach for integrated product life cycle environment", *Recent Developments and New Direction in Soft-Computing Foundations and Applications*, 2016, no. 342, pp. 99–110.
5. Shteyngart E.A., Burmistrov A.N. "Review and comparative characteristics of methodologies for the development of en-

- terprise architecture”, *Scientific and Technical Statements of SPbSPU. Economic Sciences (Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPBG-PU. Ekonomicheskie nauki)*, 2016, 3 (245), pp. 111–129.
6. Ilyin I.V. “Developing a reference model of the information system architecture of high-tech enterprises”, *Scientific and Technical Statements of SPbSPU. Economic Sciences (Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPBGPU. Ekonomicheskie nauki)*, 2015, no. 5 (228), pp. 97–107.
7. Topolnik V.G., Krylova L.V. “Functional modeling of hotel service processes”, *Economics, Entrepreneurship and Law (Ekonomika, predprinimatelstvo i pravo)*, 2017, vol. 7, no. 3, pp. 185–207.
8. Levina A.I., Ilyin I.V., Esedulaev R.A. “Increasing the efficiency of projects for the implementation of information systems of the BPMS class using standard design solutions”, *Science and Business: Ways of Development (Nauka i biznes: puti razvitiya)*, 2017, no. 4, pp. 9–14.
9. Ali M.B., Wood-Harper T., Ramlogan R. “Challenges of value creation through cloud SaaS: Business — IT-alignment in service-oriented industries”, *Proc. of Conf.: 25th UK Academy for Information Systems International*, 2020, pp. 1–18.
10. Shao M., Li X. “An empirical study of impact factors on the alignment of cloud computing and enterprise”, *2nd Int. Conf. on Advances in Computer Technology, Information Science and Communications (CTISC)*, 2020, pp. 70–74.
11. Rosati P., Fox G., Kenny D., Lynn T. “Quantifying the financial value of cloud investments: a systematic literature review”, *Proc. of Int. Conf. Cloud Comput. Technol. Sci. CloudCom.*, 2017, vol. Decem., pp. 194–201.
12. Kyriakou N., Loukis E. “Cloud computing business value and human determinants”, *Proc. 21st Pan-Hellenic Conf. Informatics PCI 2017*, 2017, pp. 1–6.
13. Bernsteiner R., Kilian D., Ebersberger B. “Mobile cloud computing for enterprise systems: a conceptual framework for research”, *Int. J. of Interactive Mobile Technologies (IJIM)*, 2016, no. 10, pp. 72–76.
14. Li K.F., Wen H.Y., Yang Z.J. “Business logic structure of SaaS-based E-commerce system”, *Proc. IEEE 17th Int. Conf. Ind. Eng. Eng. Manag. IE EM2010*, 2010, pp. 316–319.
15. Arthur H.M., Ouyang C., Adams M., Hofstede A.H.M., Yu Y. “Towards the design of a scalable business process management system architecture in the cloud”, *37th Int. Conf.*, 2018, pp. 334–348.
16. Saltan A., Seffah A. “Engineering and business aspects of SaaS model adoption: Insights from a mapping study”, *CEUR Workshop Proc.*, 2018, vol. 2305, pp. 115–127.
17. Gey F., Van Landuyt D., Joosen W. “Evolving multi-tenant SaaS applications through self-adaptive upgrade enactment and tenant mediation”, *Proc. 11th Int. Symp. Softw. Eng. Adapt. Self-Managing Syst. SEAMS*, 2016, pp. 151–157.
18. Khan K.M., Nhlabatsi A., Khan N. “A process model for customisation of software in multi-tenant SaaS model”, *Proc. IEEE/ACM 8th Int. Conf. Util. Cloud Comput. UCC.*, 2015, pp. 418–419.
19. Indonesia P.P., Milwandhari S. “Risk analysis of cloud computing in the logistics process”, *Third Int. Conf. on Vocational Education and Electrical Engineering (ICVEE)*, 2020, pp. 1–5.
20. Fattouch N., Rekik M., Wakrime A.A., Boukadi K. “A model-driven engineering approach for business process based on SaaS services composition”, *Proc. IEEE/ACS Int. Conf. Comput. Syst. Appl. AICCSA*, 2019, vol. Novem., pp. 1–8.
21. Lu Q. “A unified business-driven cloud management framework”, *IEEE Trans. Serv. Comput.*, 2016, vol. 9, no. 6, pp. 872–882.
22. Morales J.A., Yasar H., Volkman A. “Implementing DevOps practices in highly regulated environments”, *ACM Int. Conf. Proceeding Ser.*, 2018, vol. Part F1477, pp. 1–9.
23. Saito S. “Understanding key business processes for business process outsourcing transition”, *Proc. ACM/IEEE 14th Int. Conf. Glob. Softw. Eng. ICGSE*, 2019, pp. 35–39.
24. Shah V.S. “Evolving dynamics of heterogeneous SAAS applications and business process automation in real-time enterprises”, *Toward. Digit. World Ind. X.0 Proc. 29th Int. Conf. Int. Assoc. Manag. Technol. IAMOT*, 2020, no. September, pp. 47–61.
25. Mladenow A., Fuchs E., Dohmen P., Strauss C. “Value creation using clouds: Analysis of value drivers for start-ups and small and medium sized enterprises in the textile industry”, *Proc. 26th IEEE Int. Conf. Adv. Inf. Netw. Appl. Work. WAINA*, 2012, pp. 1215–1220.
26. Gabus A., Fontela E. “World problems, an invitation to further thought within the framework of DEMATEL”, Geneva, Switzerland: Battelle Geneva Research Center, 1972, pp. 1–8.
27. Si S.-L., You X.-Y., Liu H.-C., Zhang P. “DEMATEL Technique: A systematic review of the state-of-the-art literature on methodologies and applications”, *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, vol. 3696457, pp. 1–33.
28. Velasquez M., Hester P. “An analysis of multi-criteria decision making methods”, *Int. J. of Operations Research*, 2013, no. 10, pp. 56–66.
29. Pandey M., Litoria R., Pandey P. “Application of fuzzy-DEMATEL approach to analysis of mobile applications problems”, *Proc. of ISP RAS (Trudy ISP RAN)*, 2019, vol. 31–4, pp. 73–96.
30. Collaborative commerce solutions for the entire procurement process. Digital transformation of the entire procurement process, available at: <https://www.ariba.com/ru-ru/solutions/solutions-overview> (date of access: 08.01.2022)

Submitted 10.01.2022; revised 21.02.2022

Information about the authors

Artem A. Levchenko, seeker, Voronezh State University (1 Universitetskaya Square, Voronezh 394018, Russia), e-mail: artyom.levchenko@gmail.com

Victor V. Taratoukhin, Cand. Sc. (Technical), Professor, Nizhny Novgorod Branch of the National Research University Higher School of Economics (30 Sormovskoe shosse, Nizhny Novgorod 603014, Russia), e-mail: vtaratoukhine@hse.ru

МОДЕЛЬ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ НЕФТЕПРОДУКТА В УСЛОВИЯХ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ

В.А. Мустафаев, К.А. Аллахвердиева

Сумгаитский государственный университет, г. Сумгаит, Азербайджанская Республика

Аннотация: разработана модель определения температуры нефтепродукта в резервуаре в условиях неопределенности в виде нечетких сетей Петри. Структурные элементы нечетких сетей Петри представлены в матричном виде, определена входная, выходная и матрица инцидентности сети. Разработан граф-модель определения температуры нефтепродукта в резервуаре. Вычислены элементы матрицы Грамма и определены правила срабатываемых переходов сети. В результате компьютерного эксперимента получена последовательность срабатывания переходов из начальной маркировки. Разработана модель принятия решений для регулирования температуры нефтепродукта в условиях неопределенности. Предложен подход принятия решений для регулирования температуры нефтепродукта в условиях неопределенности. Сформирована база правил для регулирования температуры нефтепродукта в резервуаре. Определены элементы множества термов всех входных и выходных лингвистических переменных базы нечетких производственных правил. Осуществлена фаззификация всех термов входных переменных. Вычислены степени истинности условий в правилах нечеткой продукции. Выполнены процедуры активизации и аккумуляции и найдены все значения степеней истинности подзаключений для каждого правила. Реализована в трехмерном пространстве процедура дефаззификации в среде *Matlab* с использованием пакета расширения *fuzzy logic Toolbox*. Представлено интерактивное окно всех входных и выходных лингвистических переменных по средствам треугольных функций принадлежности

Ключевые слова: температура нефтепродукта, модель, нечеткие сети Петри, производственные правила, фаззификация

Введение

Как предприятие нефтебаза предназначена для приема, хранения и отпуска нефтепродуктов различным социальным и промышленным отраслям [1]. Основное назначение нефтебаз - сохранение качества нефтепродуктов и сокращение до минимума их потерь при приеме, хранении и отпуске потребителям. При хранении и отпуске нефтепродуктов в основном измеряются плотность и температура нефтепродукта [2].

Плотность нефтепродукта [3] определяется с помощью нефтенсиметра. Плотность нефтепродукта вычисляется формулами, используя температуру нефтепродукта в резервуаре. Искомая плотность нефтепродукта при данной температуре определяется через плотность нефтепродукта при 20°C и учитывается поправка изменения температуры на 1°C . При этом не учитываются параметры избыточного давления и высота уровня нефтепродукта.

На современном этапе развития вычислительных и информационных технологий требуются разработки новых подходов для определения плотности и температуры нефтепродукта на основе экспериментальных и экс-

пертных данных с использованием нечеткой логики и искусственного интеллекта.

В этой связи в представленной работе рассматривается разработка модели определения и регулирования температуры нефтепродукта в условиях неопределенности.

Модель определения температуры нефтепродукта в резервуаре

Модель определения температуры нефтепродукта в резервуаре в условиях неопределенности представляется в виде нечетких сетей Петри (НСП) [4]:

$C = (P, T, I, O, \mu)$, где $P = \{p_i\}$ ($i = 1, \dots, n$; n – число позиций) –

нечеткое множество позиций; $T = \{t_j\}$ ($j = 1, \dots, m$; m – число переходов; $I: P \times T \rightarrow (0, 1, 2, \dots)$; $O: T \times P \rightarrow (0, 1, 2, \dots)$)

– соответственно входная и выходная функции сети; маркировка $\mu: P \rightarrow [0, 1]$ – начальное состояние сети. Модель определения температуры нефтепродукта в резервуаре представлена в виде НСП, также определено множество позиций и переходов. Граф-модель определения температуры нефтепродукта в резервуаре представлена на рис. 1.

Множество позиций:

- p_1 - резервуар для хранения нефтепродукта;
- p_2 - температура нефтепродукта соответствует допуску;
- p_3 - температура нефтепродукта соответствует ниже допуска;
- p_4 - температура нефтепродукта соответствует выше допуска;
- p_5 - диапазон высоты уровня нефтепродукта соответствует допуску;
- p_6 - диапазон высоты уровня нефтепродукта соответствует ниже допуска;
- p_7 - диапазон высоты уровня нефтепродукта соответствует выше допуска;
- p_8 - диапазон плотности нефтепродукта соответствует допуску;
- p_9 - колонна для пропуска нефтепродукта;

p_{10} - нагревание нефтепродукта в резервуаре;

p_{11} - охлаждение нефтепродукта в резервуаре.

Множество переходов:

t_1 - определение температуры нефтепродукта в резервуаре;

t_2 - определение высоты уровня нефтепродукта в резервуаре;

t_3 - определение плотности нефтепродукта в резервуаре;

t_4 - выполнение процесса пропуска нефтепродукта;

t_5 - регулирование вентиля электрического нагревателя на небольшой угол влево;

t_6 - регулирование вентиля электрического нагревателя на небольшой угол вправо.

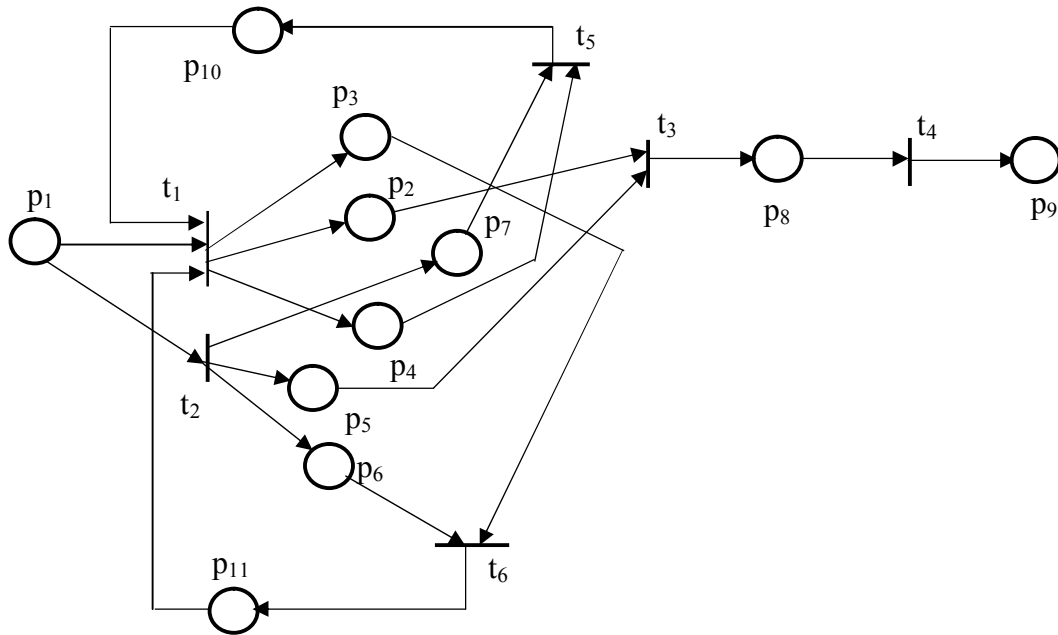


Рис. 1. Граф-модель определения температуры нефтепродукта в резервуаре

Структурные элементы НСП представляются в матричном виде [5]:

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

$$d_{ij}^+ = \begin{cases} 1, \text{ если } p_i \in O(t_j); \\ 0, \text{ если } p_i \notin O(t_j); \end{cases}$$

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

Функции входной и выходной инцидентности НСП представляются соответственно матрицами D^- и D^+ :

$$D^- = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix},$$

$$D^+ = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Элементы матрицы инцидентности НСП вычисляются по формуле:

$$d_{ij} = d_{ij}^+ - d_{ij}^-; \quad i = \overline{1,11}; j = \overline{1,6}.$$

Матрица инцидентности выглядит следующим образом:

$$D = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & -1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Начальное состояние сети задается векторами:

$$\begin{aligned} \mu(0;1) &= (1.000 \ 0.000); \\ \mu(0;2) &= (1.000 \ 0.000); \\ \mu(0;3) &= (1.000 \ 0.000); \\ \mu(0;4) &= (0.000 \ 0.400 \ 0.600); \\ \mu(0;5) &= (0.200 \ 0.300 \ 0.500); \\ \mu(0;6) &= (0.000 \ 0.100 \ 0.000 \ 0.900); \\ \mu(0;7) &= (0.200 \ 0.500 \ 0.300); \\ \mu(0;8) &= (0.000 \ 0.100 \ 0.300 \ 0.600); \\ \mu(0;9) &= (0.300 \ 0.000 \ 0.000 \ 0.700); \\ \mu(0;10) &= (1.000 \ 0.000); \\ \mu(0;11) &= (1.000 \ 0.000). \end{aligned}$$

На основе алгоритма [6] вычисляются элементы матрицы Грамма и вектора диагональной сверки НСП. В результате компьютерного эксперимента получена последовательность срабатывания переходов $\tau_1 = (t_1, t_2, t_3, t_4)$, $\tau_2 = (t_1, t_5, t_1)$, $\tau_3 = (t_2, t_6, t_2)$ из начальной маркировки μ_0 .

При запуске срабатывания переходов $\tau_1 = (t_1, t_2, t_3, t_4)$ получена последовательность из начальной маркировки μ_0 .

Состояние сети после срабатывания перехода t_1 :

$$\begin{aligned} \mu(1;1) &= (1.000 \ 0.000); \\ \mu(1;2) &= (0.300 \ 0.700); \\ \mu(1;3) &= (0.200 \ 0.800); \\ \mu(1;4) &= (0.100 \ 0.200 \ 0.400); \\ \mu(1;5) &= (0.400 \ 0.600); \\ \mu(1;6) &= (0.100 \ 0.100 \ 0.000 \ 0.800); \\ \mu(1;7) &= (0.500 \ 0.500); \\ \mu(1;8) &= (0.100 \ 0.300 \ 0.600); \\ \mu(1;9) &= (0.200 \ 0.100 \ 0.000 \ 0.700); \\ \mu(1;10) &= (0.500 \ 0.500); \\ \mu(1;11) &= (1.000 \ 0.000). \end{aligned}$$

Состояние сети после срабатывания перехода t_2 :

$$\begin{aligned} \mu(2;1) &= (1.000 \ 0.000); \\ \mu(2;2) &= (0.300 \ 0.700 \ 0.000); \\ \mu(2;3) &= (0.100 \ 0.000); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu(2;4) &= (0.000 \ 0.400 \ 0.600); \\ \mu(2;5) &= (0.500 \ 0.500); \\ \mu(2;6) &= (0.000 \ 0.100 \ 0.000 \ 0.900); \\ \mu(2;7) &= (0.100 \ 0.400 \ 0.500); \\ \mu(2;8) &= (0.200 \ 0.100 \ 0.300 \ 0.300); \\ \mu(2;9) &= (0.300 \ 0.000 \ 0.100 \ 0.600); \\ \mu(2;10) &= (1.500 \ 0.500); \\ \mu(2;11) &= (1.000 \ 0.000). \end{aligned}$$

Состояние сети после срабатывания перехода t_3 :

$$\begin{aligned} \mu(3;1) &= (0.200 \ 0.700 \ 0.100); \\ \mu(3;2) &= (1.000 \ 0.000); \\ \mu(3;3) &= (0.100 \ 0.000); \\ \mu(3;4) &= (0.400 \ 0.600); \\ \mu(3;5) &= (0.200 \ 0.500 \ 0.300); \\ \mu(3;6) &= (0.000 \ 0.200 \ 0.000 \ 0.800); \\ \mu(3;7) &= (0.100 \ 0.300 \ 0.600); \\ \mu(3;8) &= (0.200 \ 0.100 \ 0.300 \ 0.400); \\ \mu(3;9) &= (0.300 \ 0.000 \ 0.000 \ 0.700); \\ \mu(3;10) &= (1.000 \ 0.000); \\ \mu(3;11) &= (0.500 \ 0.500). \end{aligned}$$

Состояние сети после срабатывания перехода t_4 :

$$\begin{aligned} \mu(4;1) &= (1.000 \ 0.000); \\ \mu(4;2) &= (0.300 \ 0.700 \ 0.000); \\ \mu(4;3) &= (0.100 \ 0.000); \\ \mu(4;4) &= (0.000 \ 0.400 \ 0.600); \\ \mu(4;5) &= (0.500 \ 0.500); \\ \mu(4;6) &= (0.000 \ 0.100 \ 0.000 \ 0.900); \\ \mu(4;7) &= (0.100 \ 0.400 \ 0.500); \\ \mu(4;8) &= (0.200 \ 0.100 \ 0.300 \ 0.300); \\ \mu(4;9) &= (0.300 \ 0.000 \ 0.100 \ 0.600); \\ \mu(4;10) &= (1.500 \ 0.500); \\ \mu(4;11) &= (1.000 \ 0.000). \end{aligned}$$

Модель принятия решения для регулирования температуры нефтепродукта

База нечетких продукционных правил принятия решений регулирования температуры нефтепродукта в резервуаре записывается в следующем виде [7]:

ПРАВИЛО «#»: ЕСЛИ Y_1 есть y_1 и Y_2 есть y_2 , то Y_3 есть y_3 ;

где Y_1, Y_2, Y_3 - названия лингвистической переменной; y_1, y_2, y_3 - их значения.

При фаззификации переменных «температура нефтепродукта в резервуаре», «скорость изменения температуры нефтепродукта в резервуаре» и «вентиль электрического нагревателя» использована треугольная функция принадлежности [8]:

$$f_{\Delta}(x, x_1, x_2, x_3) = \begin{cases} 0, & \text{если } x \leq x_1; \\ \frac{x - x_1}{x_1 - x_2}, & \text{если } x_2 \leq x \leq x_1; \\ \frac{x_3 - x}{x_3 - x_2}, & \text{если } x_1 \leq x \leq x_3; \\ 0, & \text{если } x_3 \leq x; \end{cases}$$

где x_1, x_2, x_3 - модальное число, удовлетворяющее условию $x_2 \leq x_1 \leq x_3$.

В результате фаззификации всех термов переменных база нечетких продукций для регулирования температуры нефтепродукта в условиях неопределенности состоит из следующих правил.

Правило 1: *ЕСЛИ* температура нефтепродукта в резервуаре соответствует ниже допуска *И* скорость изменения температуры в резервуаре отрицательная, *ТО* следует регулировать вентиль электрического нагревателя на большой угол вправо;

Правило 2: *ЕСЛИ* температура нефтепродукта в резервуаре соответствует ниже допуска *И* скорость изменения температуры в резервуаре нуль, близко к нулю, *ТО* следует регулировать вентиль электрического нагревателя на небольшой угол вправо;

Правило 3: *ЕСЛИ* температура нефтепродукта в резервуаре соответствует ниже допуска *И* скорость изменения температуры в резервуаре положительная, *ТО* следует регулировать вентиль электрического нагревателя на небольшой угол вправо;

Правило 4: *ЕСЛИ* температура нефтепродукта в резервуаре соответствует допуску *И* скорость изменения температуры в резервуаре отрицательная, *ТО* следует оставить вентиль электрического нагревателя как есть;

Правило 5: *ЕСЛИ* температура нефтепродукта в резервуаре соответствует допуску *И* скорость изменения температуры в резервуаре нуль, близко к нулю, *ТО* следует оставить вентиль электрического нагревателя как есть;

Правило 6: *ЕСЛИ* температура нефтепродукта в резервуаре соответствует допуску *И* скорость изменения температуры в резервуаре по-

ложительная, *ТО* следует оставить вентиль электрического нагревателя как есть;

Правило 7: *ЕСЛИ* температура нефтепродукта в резервуаре соответствует выше допуска *И* скорость изменения температуры в резервуаре отрицательная, *ТО* следует регулировать вентиль электрического нагревателя на небольшой угол влево;

Правило 8: *ЕСЛИ* температура нефтепродукта в резервуаре соответствует выше допуска *И* скорость изменения температуры в резервуаре нуль, близко к нулю, *ТО* следует регулировать вентиль электрического нагревателя на небольшой угол влево;

Правило 9: *ЕСЛИ* температура нефтепродукта в резервуаре соответствует выше допуска *И* скорость изменения температуры в резервуаре положительная, *ТО* следует регулировать вентиль электрического нагревателя на большой угол влево.

Инструментальные и программные средства принятия решения для регулирования температуры нефтепродукта в резервуаре в условиях неопределенности реализованы в среде *MATLAB* с использованием пакета расширения *Fuzzy Logic Toolbox* [9].

Для реализации фаззификации входной лингвистической переменной «температура нефтепродукта в резервуаре» значения всех термов на универсуме $[-50, +50]$ задаются в виде следующих треугольных нечетких чисел:

$tn\ 1 = \langle -10; -5; 5 \rangle$; $tn\ 2 = \langle -15; -5; \rangle$;
 $tn\ 3 = \langle -20; -5; 5 \rangle$; $tn\ 4 = \langle 10; 5; 5 \rangle$;
 $tn\ 5 = \langle 15; 5; 5 \rangle$; $tn\ 6 = \langle 20; 5; 5 \rangle$;
 $tn\ 7 = \langle 25; 5; 5 \rangle$; $tn\ 8 = \langle 30; 5; 5 \rangle$;
 $tn\ 9 = \langle 40; 5; 5 \rangle$.

На рис. 2 представлено интерактивное окно, через которое фаззифицируются 9 термов лингвистической переменной «температура нефтепродукта в резервуаре» по средствам треугольных функций принадлежности на универсуме $[-50, +50]$.

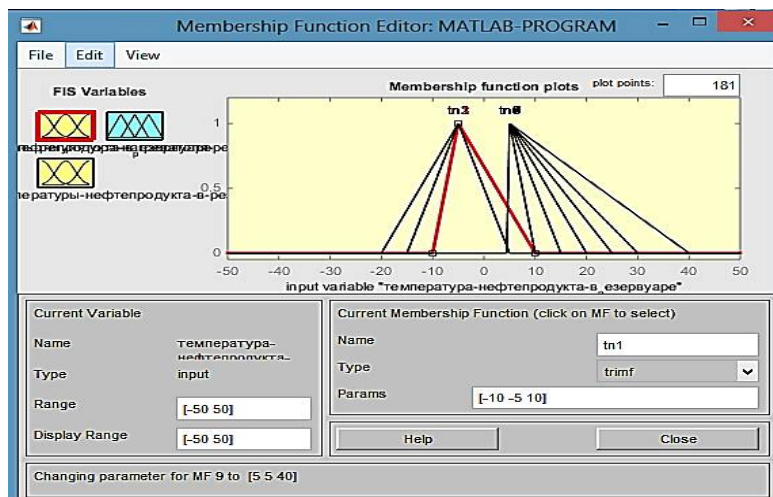


Рис. 2. Треугольные функции принадлежности нечетких множеств, изображающие термы входной лингвистической переменной «температура нефтепродукта в резервуаре»

Для реализации фаззификации входной лингвистической переменной «скорость изменения температуры в резервуаре» значения всех термов на универсуме $[-5, +5]$ задаются в виде следующих треугольных нечетких чисел:

$$\begin{aligned} st\ 1 &= \langle -2; -1; 1 \rangle; \quad st\ 2 = \langle -3; -1; 1 \rangle; \\ st\ 3 &= \langle -4; -1; 1 \rangle; \quad st\ 4 = \langle 0; 1; 1 \rangle; \\ st\ 5 &= \langle 1; 1; 1 \rangle; \quad st\ 6 = \langle 2; 1; 1 \rangle; \end{aligned}$$

$$st\ 7 = \langle 2.5; 1; 1 \rangle; \quad st\ 8 = \langle 3; 1; 1 \rangle;$$

$$st\ 9 = \langle 3.5; 1; 1 \rangle.$$

На рис. 3 представлено интерактивное окно, через которое фаззифицируются 9 термов лингвистической переменной «скорость изменения температуры в резервуаре» по средствам треугольных функций принадлежности на универсуме $[-5, +5]$.

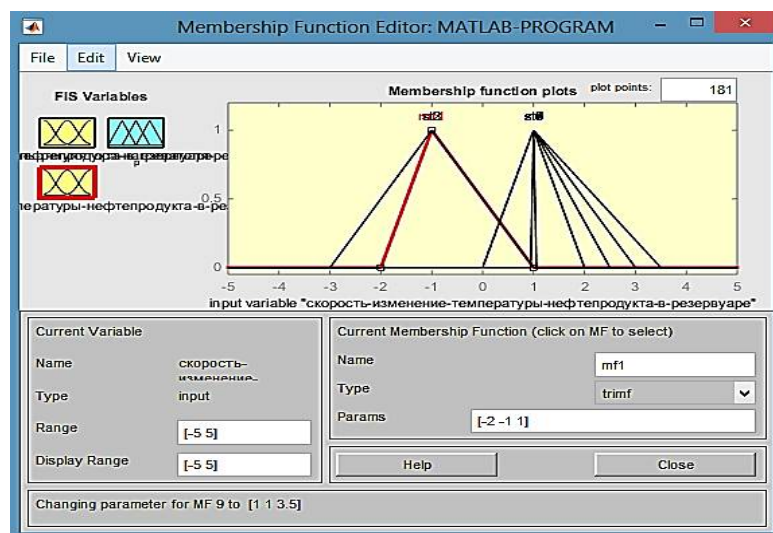


Рис. 3. Треугольные функции принадлежности нечетких множеств, изображающие термы входной лингвистической переменной «скорость изменения температуры в резервуаре»

Для реализации фаззификации выходной лингвистической переменной «вентиль электрического нагревателя» значения всех термов на универсуме $[-90, +90]$ задаются в виде следующих треугольных нечетких чисел:

$$\begin{aligned} vr\ 1 &= \langle 70; 10; 10 \rangle; \quad vr\ 2 = \langle 60; 10; 10 \rangle; \\ vr\ 3 &= \langle 55; 10; 10 \rangle; \quad vr\ 4 = \langle 40; 10; 10 \rangle; \\ vr\ 5 &= \langle 45; 10; 10 \rangle; \quad vr\ 6 = \langle 50; 10; 10 \rangle; \end{aligned}$$

$$vr\ 7 = \langle -70; -10; 10 \rangle; \quad vr\ 8 = \langle 60; -10 \rangle;$$

$$vr\ 9 = \langle -55; -10; 10 \rangle.$$

На рис. 4 представлено интерактивное окно, через которое фаззифицируются 9 термов лингвистической переменной «вентиль электрического нагревателя» по средствам треугольных функций принадлежности на универсуме $[-90, +90]$.

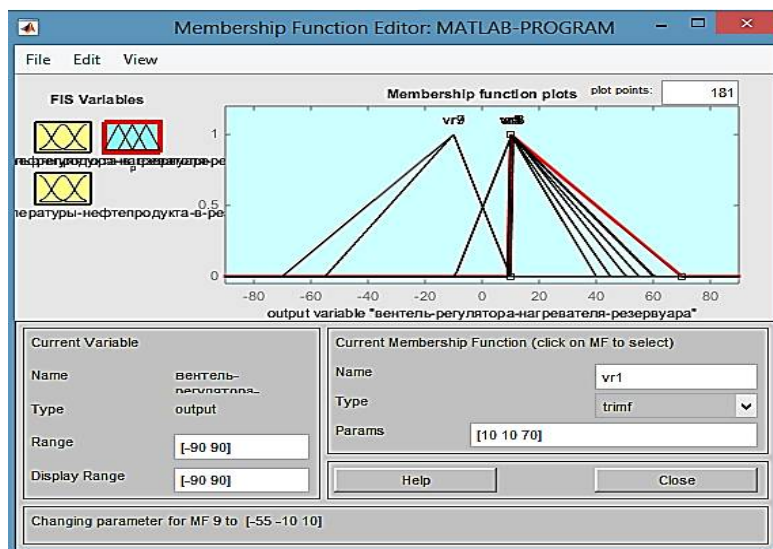


Рис. 4. Треугольные функции принадлежности нечетких множеств, изображающие термиы выходной лингвистической переменной «вентиль электрического нагревателя»

Трехмерное изображение результата дефазификации выходных переменных «вен-

тиль электрического нагревателя» представлено на рис. 5.

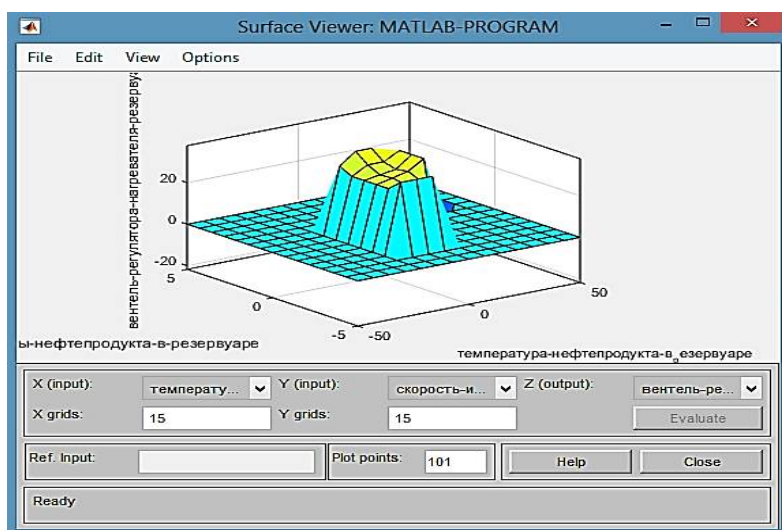


Рис. 5. Трехмерное изображение результата дефазификации выходных переменных «вентиль электрического нагревателя»

Заключение

Разработана модель определения температуры нефтепродукта в резервуаре в условиях неопределенности в виде НСП. Определены структура и правила срабатывания переходов сети. На основе компьютерного эксперимента получена последовательность срабатывания переходов из начальной маркировки.

Предложен подход принятия решений для регулирования температуры нефтепродукта в условиях неопределенности. Сформирована база правил для регулирования температуры нефтепродукта в резервуаре. Осуществлена

фазификация всех термов входных переменных. Вычислены степени истинности условий в правилах нечеткой продукции. Выполнены процедуры активизации и аккумуляции и найдены все значения степеней истинности подзаключений для каждого правила. Реализована в трехмерном пространстве процедура дефазификации в среде Matlab с использованием пакета расширения fuzzy logic Toolbox. Представлено интерактивное окно всех входных и выходных лингвистических переменных по средствам треугольных функции принадлежности.

Литература

1. <http://www.vashdom.ru/gost/51069-97>.
2. http://www.nge.ru/g_8_595-2004.htm
3. <http://docs.cntd.ru/document/1200121059>.
4. Лескин А.А., Мальцев П.А., Спиридонов А.М. Сети Петри в моделировании и управлении. Л.: Наука, 1989. 133 с.
5. Котов Е.Е. Сети Петри. М.: Наука, 1984. 180 с.
6. Мустафаев В.А. Анализ нечетких продукционных

моделей динамических взаимодействующих процессов // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2012. № 5. С. 25-30.

7. Борисов В.В., Круглов В.В., Федулов Ф.С. Нечеткие модели и сети. М.: Телеком, 2012. 725 с.
8. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzy TECH. СПб.: БХВ - Петербург, 2005. 717 с.
9. Дьяконов В.П. MATLAB. Полный самоучитель. М.: ДМК Пресс, 2012. 768 с.: ил.

Поступила 06.12.2021; принята к публикации 21.02.2022

Информация об авторах

Мустафаев Валех Азад оглы - д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой «Информатика», Сумгаитский государственный университет (AZ 5008, Республика Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал), тел. +994505342506, e-mail: valex-sdu@mail.ru

Аллахвердиева Конуль Асвер кызы - докторант кафедры информации и компьютерной техники, Сумгаитский государственный университет (AZ 5008, Республика Азербайджан, г. Сумгаит, 43-й квартал), e-mail: konul636@mail.ru, тел.: +994 51 636 93 32

DECISION-MAKING MODEL FOR REGULATING THE TEMPERATURE OF AN OIL PRODUCT UNDER CONDITIONS OF UNCERTAINTY

V.A. Mustafaev, K.A. Allakhverdieva

Sumgait State University, Sumgait, Azerbaijan Republic

Abstract: we developed a model for determining the temperature of an oil product in a tank under uncertainty in the form of fuzzy Petri nets. We presented the structural elements of fuzzy Petri nets in matrix form and determined the input, output and incidence matrix of the network. We calculated the elements of the Gram matrix and the rules of triggered network transitions. As a result of a computer experiment, we obtained a sequence of triggering transitions from the initial marking. We propose a decision-making approach for regulating the temperature of petroleum products under uncertainty. We formed a database of rules for regulating the temperature of petroleum products in the tank. We carried out fuzzification of all terms of input variables and calculated the degree of truth of the conditions in the rules of fuzzy production. We performed activation and accumulation procedures and found all the values of the degrees of truth of the conclusions for each rule. We implemented in three-dimensional space, the defuzzification procedure in the Matlab environment using the fuzzy logic Toolbox extension package. We present an interactive window of all input and output linguistic variables by means of triangular membership functions

Key words: oil product temperature, model, fuzzy Petri nets, production rules, fuzzification

References

1. <http://www.vashdom.ru/gost/51069-97>.
2. http://www.nge.ru/g_8_595-2004.htm
3. <http://docs.cntd.ru/document/1200121059>.
4. Leskin A.A., Maltsev P.A., Spiridonov A.M. "Petri nets in modeling and control" ("Seti Petri v modelirovanii i upravlenii"), Leningrad: Nauka, 1989, 133 p.
5. Kotov E.E. "Petri nets" ("Seti Petri"), Moscow: Nauka, 1984, 180 p.
6. Mustafaev V.A. "Analysis of fuzzy production models of dynamic interacting processes", *Bulletin of Computer and Information Technologies (Vestnik komp'yuternykh i informatsionnykh tekhnologiy)*, 2012, no. 5, pp. 25-30.
7. Borisov V.V., Kруглов V.V., Fedulov F.S. "Fuzzy models and networks" ("Nechetkie modeli i seti"), Moscow: Telekom, 2012, 725 p.
8. Leonenkov A.V. "Fuzzy modeling in MATLAB and fuzzy TECH" ("Nechetkoe modelirovanie v srede MATLAB u fuzzy TECH"), St. Petersburg: BHV - Petersburg, 2005, 717 p.
9. Dyakonov V.P. "MATLAB. Complete tutorial" ("MATLAB. Polnyy samouchitel"), Moscow: DMK Press, 2012, 768 p.

Submitted 06.12.2021; revised 21.02.2022

Information about the authors

Valeh Azad Mustafaev, Dr. Sc. (Technical), Professor, Sumgayit State University (Sumgait 43-rd quarter, Az 5008, Republic of Azerbaijan), e-mail: valex-sdu@mail.ru, tel.: +994 50 534 25 06

Konul Asvar Allakhverdieva, Cand. Sc., Sumgait State University (Sumgait 43-rd quarter, Az 5008, Republic of Azerbaijan), e-mail: konul636@mail.ru, tel.: +994 51 636 93 32

АППРОКСИМАЦИЯ ПЛОТНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ РАБОТЫ МЕЖДУ ОТКАЗАМИ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НЕПАРАМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ РОЗЕНБЛАТТА-ПАРЗЕНА

В.С. Никулин, А.И. Пестунов

Новосибирский государственный университет экономики и управления,
г. Новосибирск, Россия

Аннотация: определение причин возникновения отказов оборудования является одной из главных задач организации экспериментальной оценки надежности объектов. Решению данной задачи в наибольшей степени отвечает статистическое оценивание плотности распределения случайных величин. Под случайной величиной в теории надежности рассматривают такие временные показатели, как моменты отказа и восстановления оборудования, а также время работы между отказами и время, требуемое для его восстановления после отказа. Проведено исследование по аппроксимации плотности распределения времени работы между отказами по данным из эксплуатации составного оборудования вычислительной системы. Данное оборудование является высоконадежным и характеризуется малым количеством отказов, а также отсутствием априорной информации о законе распределения случайных величин. По этим причинам в качестве метода аппроксимации рассмотрен непараметрический метод Розенблатта-Парзена. В исследуемом методе функция ядра отвечает за гладкость, а параметр сглаживания за точность аппроксимации плотности распределения. В качестве ядра выбрана функция Гаусса, ранее рассмотренная в работах по теории надежности. На основе метода Хука-Дживса разработан алгоритм поиска оптимального параметра сглаживания, отвечающего за точность аппроксимации. Оценка влияния параметра сглаживания и объема выборки на точность аппроксимации проведена на основе анализа оценивания ошибок в метрике L_1 -пространства и графического представления. Проведенное исследование позволяет сделать выводы о том, что использование оптимального параметра сглаживания при наличии выборки различного объема позволяет уменьшить итоговую ошибку аппроксимации

Ключевые слова: статистический анализ, экспериментальная надежность, вычислительная система, непараметрический метод Розенблатта-Парзена

Введение

В теории надежности сложных технических систем методы оценки показателей надежности объектов подразделяют на расчетные и экспериментальные [1, 2]. Методы расчетной оценки показателей надежности объекта основаны на использовании справочных данных о надежности его составных частей. Данные методы позволяют выбирать оборудование на этапе проектирования, отвечающее требованиям заказчика к режиму функционирования объекта. В свою очередь, методы экспериментальной оценки показателей надежности основаны на использовании статистических данных, полученных при испытаниях объекта на надежность или в процессе его эксплуатации [3, 4].

Выбор показателей надежности сложных технических систем (объектов) зависит от типа решаемой задачи и режима эксплуатации оборудования. Например, одной из главных задач организации наблюдений за эксплуатационной

надежностью восстанавливаемых объектов является выявление причин отказов с целью уменьшения их влияния на надежность и эффективность применения составных элементов [5]. Решению данной задачи в наибольшей степени отвечает оценка плотности распределения времени работы между отказами. Данный показатель предоставляет наибольшую информацию для анализа надежности элемента, и на их основе могут быть получены другие показатели надежности [3].

Под случайной величиной в теории надежности рассматривают такие временные показатели, как моменты отказа и восстановления оборудования, а также время работы между отказами и время, требуемое для его восстановления после отказа. При этом отсутствие априорной информации о виде (законе) функции распределения случайной величины не позволяет использовать параметрические методы в качестве универсального подхода к оцениванию плотности распределения. Дополнительными требованиями является повышение надежности эксплуатируемого оборудования и уменьшение количества возникающих

отказов. В таких случаях принято обращаться к непараметрическим методам [6].

В данной работе проведена аппроксимация плотности распределения времени работы между отказами на примере вычислительной системы непараметрическим методом Розенблатта-Парзена [7]. Его достоинством является положительная определенность (при выборе неотрицательного ядра), что не выполняется для оценок на основе ортогональных разложений [8, 9].

Рассмотренный метод является машинно-ориентированным и не привязанным к конкретным видам распределений случайных величин, а также пригодным для работы с малыми выборками.

Исследование непараметрического метода Розенблатта-Парзена

Оценка плотности распределения времени работы между отказами методом Розенблатта-Парзена осуществляется по формуле (1), рассмотренной в работе [9]:

$$f(t) = \frac{1}{n\sigma} \sum_{i=1}^n K\left(\frac{t - \varepsilon_i}{\sigma}\right), \quad (1)$$

где ε_i – значение времени работы между отказами, $K(x)$ – функция ядра (чётная, нормированная функция), σ – параметр сглаживания, n – объем зафиксированных наблюдений.

Как отмечают авторы работ [10, 11], функция ядра $K(x)$ влияет на гладкость итоговой функции распределения, при этом в меньшей степени отвечает за точность аппроксимации. По этим причинам оценка влияния данной функции на точность аппроксимации не проводилась, и в качестве $K(x)$ выбрана функция Гаусса (2), ранее рассмотренная в работах по теории надежности [3]:

$$K(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \cdot e^{-\frac{x^2}{2}}. \quad (2)$$

Параметр сглаживания σ отвечает за точность аппроксимации итоговой функции распределения. Для его определения на основе метода прямого поиска Хука-Дживса [12] составлен алгоритм поиска оптимального значения параметра сглаживания с вычислением логарифмической функции правдоподобия (3):

$$L(\sigma) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \log \left[\sum_j K\left(\frac{t - \varepsilon_i}{\sigma}\right) \right] - \log[(n-1)\sigma] \quad (3)$$

Ниже представлены шаги алгоритма поиска оптимального значения параметра сглаживания:

1) расчет базисного значения σ_b по выражению (4), по методу Сильвермана [13]:

$$\sigma_b = 0.9 \min\left(\hat{\sigma}, \frac{\mu}{1.34}\right) n^{-\frac{1}{5}}, \quad (4)$$

где $\hat{\sigma}$ – стандартное отклонение, n – размер и μ – медиана выборки.

Задаем шаг изменения $d = \sigma_b/2$, выбираем значение останова алгоритма e ;

2) расчет значения $L(\sigma_b)$;

3) расчет новых значений параметра сглаживания $\sigma^+ = \sigma_b + d$ и $L(\sigma^+)$;

4) если $L(\sigma^+) > L(\sigma_b)$, то $\sigma_b = \sigma^+$ и переход на п. 3, иначе переход на п. 5;

5) расчет нового значения параметра сглаживания $\sigma^- = \sigma_b - d$, переход на п. 6;

6) если $\sigma^- < 0$, то переход на п. 9, иначе переход на п. 7;

7) расчет $L(\sigma^-)$;

8) если $L(\sigma^-) > L(\sigma_b)$, то $\sigma_b = \sigma^-$ и переход на п. 3, иначе переход на п. 9;

9) сравнение значений d и e . Если $d < e$, то искомое значение σ_o найдено и выход из алгоритма, в противном случае присвоение значения $d = d/2$ и переход на п. 3.

Схема алгоритма расчета оптимального значения параметра сглаживания приведена на рис. 1.

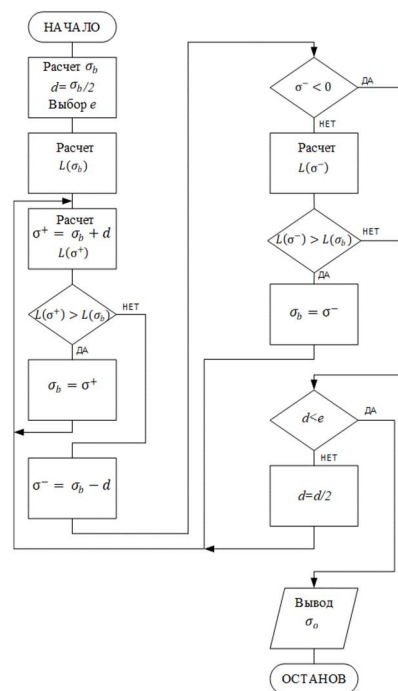


Рис. 1. Алгоритм расчета оптимального значения параметра сглаживания

Оценка точности аппроксимации на примере данных из эксплуатации вычислительной системы

Таблица 1

Значения наработок времени между отказами
элементов

Эл-т	Значения времени между отказами	Кол-во
NV1	2506, 13264, 1853, 2176, 6579, 4400, 1672, 5618, 2870	9
NV2	98, 2230, 778, 269, 687, 4798, 696, 4013, 2629, 3735, 2414, 1633, 4432, 504, 1280, 838, 5316, 3530	18
NV3	485, 1888, 2163, 6756, 1762, 9221, 571, 8843, 7322	9
NV4	3875, 59, 5015, 1840, 1438, 3515, 5361, 1071, 672, 7578, 5820, 1855, 2262	13
NV5	136, 2361, 2711, 4426, 1291, 4517, 5714, 924, 531, 7179, 1608, 7135	12
NV6	2778, 3434, 5232, 1242, 1163, 8254, 663, 3628, 11431	9
NV7	1639, 397, 1060, 7740, 1548, 1589, 6481, 1421, 3446, 1671, 2895, 10412	12
NV8	588, 3991, 7772, 12137, 4712, 10286	6
NV9	915, 3936, 1169, 6680, 13708, 1983, 12607	7
NV10	272, 3416, 1288, 6055, 4219, 7779, 3226, 6166, 5455, 504	10
NV11	114, 4172, 321, 8400, 8272, 5160, 3293, 1206, 680, 5352, 628	11
NV12	4172, 7965, 1865, 6351, 937, 5476, 10789, 2380	8
NV13	560, 1955, 862, 8743, 826, 1056, 15111, 1339, 8358, 1125	10
NV14	204, 2164, 1741, 1201, 3677, 6085, 5289, 1510, 7495, 2562	10
NV15	2040, 3581, 5022, 1696, 8730, 5911, 12007	7
NV16	1883, 1263, 9163, 5707, 3259, 10626, 5179, 1907	8
NV17	475, 4106, 4917, 3835, 7839, 18554	6
NV18	861, 2322, 3406, 8742, 5183, 1886, 8379, 6444	8
NV19	4893, 4952, 2578, 13857	4
NV20	587, 17068, 1716, 4990, 8292, 9104	6

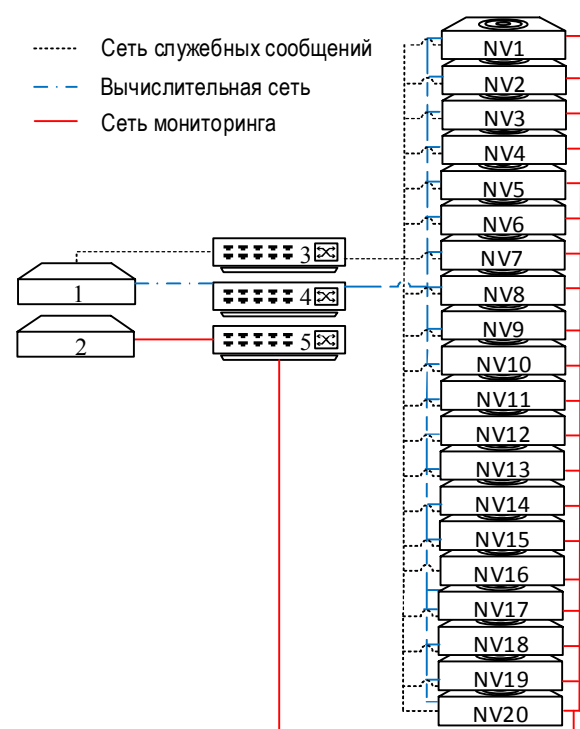


Рис. 2. Схема взаимодействия элементов вычислительной системы и системы мониторинга: 1 – управляющий сервер, 2 – сервер мониторинга, 3 – коммутатор служебных сообщений, 4 – высокоскоростной коммутатор вычислительной сети, 5 – коммутатор сети мониторинга, NV1 – NV20 – вычислительные сервера

Зафиксированные события предварительно обрабатываются в соответствии с методикой подготовки данных, представленной в работе [13]. После этого данные становятся структурированными и пригодными для оценки и представимы в виде массива наработок времени между отказами по каждому элементу вычислительной системы (табл. 1).

Как видно из табл. 1, всего за период эксплуатации объекта зафиксировано 183 наработки времени между отказами по совокупности однотипных элементов. В частности, по каждому элементу преобладают выборки малого объема до 10 отказов. При этом однотипность используемых элементов, а также общий период эксплуатации позволяет объединить полученные наработки на отказ в генеральную совокупность событий.

Оценка влияния параметра сглаживания и объема выборки на точность аппроксимации плотности распределения времени между отказами осуществляется на основе анализа

ошибок и анализа графического представления. Для этого:

- из генеральной совокупности событий сформированы две выборки в соотношении 80% (основная) и 20% (тестовая) от объема соответственно;

- из основной выборки сформированы случайные выборки различного объема $n = 5, 10, 30, 50, 100, 130$;

- для тестовой и каждой случайной выборки рассчитано оптимальное значение параметра сглаживания σ_0 ;

- на основе случайных выборок по выражению (1) с различным значением параметра сглаживания равными σ_b, σ_0 , а также двумя величинами σ_s, σ_m характеризующие малое и большое значение параметра сглаживания построены плотности распределения времени работы между отказами;

- выводы о точности оценок основывались на вычислении ошибок оценивания e_n в метрике L_1 -пространства (L_1 -расстояние) по выражению (5):

$$e_n = \int_0^{\infty} |f_t(t) - f_s(t)| dt, \quad (5)$$

где $f_t(t)$ – плотность распределения времени между отказами по тестовому набору, $f_s(t)$ – по случайным выборкам. Полученное значение e_n сравнивается с заданным уровнем точности 0,02.

В табл. 2 представлены максимальные значения ошибок оценивания функции e_n при различных объемах случайных выборок и их параметров сглаживания.

Таблица 2

Значения ошибок оценивания функции e_n

	n = 5	n = 10	n = 30	n = 50	n = 100	n = 130
σ_b	0,033	0,022	0,021	0,019	0,017	0,016
σ_0	0,031	0,019	0,018	0,015	0,011	0,009
σ_s	0,053	0,039	0,031	0,026	0,0223	0,020
σ_m	0,036	0,034	0,029	0,024	0,019	0,019

Графический анализ аппроксимации плотности распределения при различных объемах наработок времени между отказами с оптимальными параметрами сглаживания представлен на рис. 3-8.

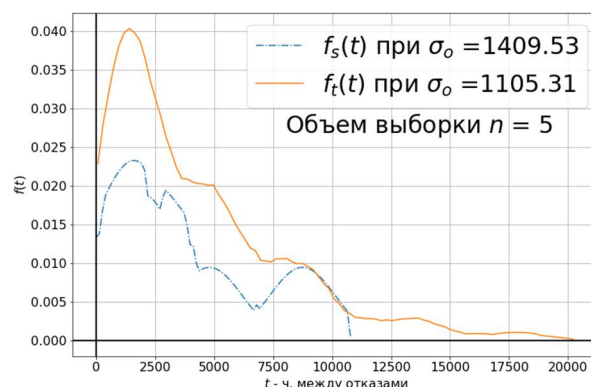


Рис. 3. Аппроксимация плотности распределения по n=5

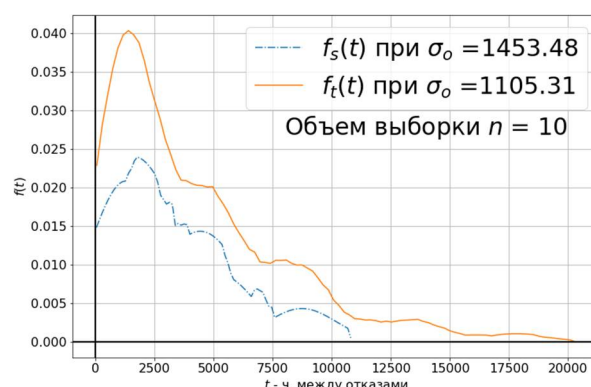


Рис. 4. Аппроксимация плотности распределения по n=10

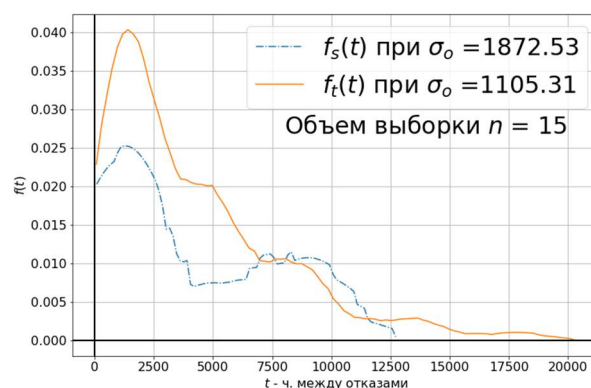


Рис. 5. Аппроксимация плотности распределения по n=15

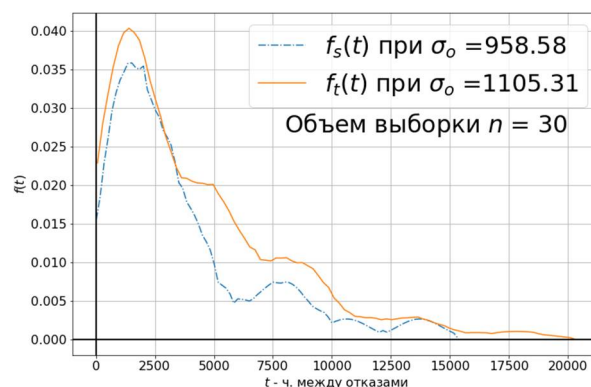


Рис. 6. Аппроксимация плотности распределения по n=30

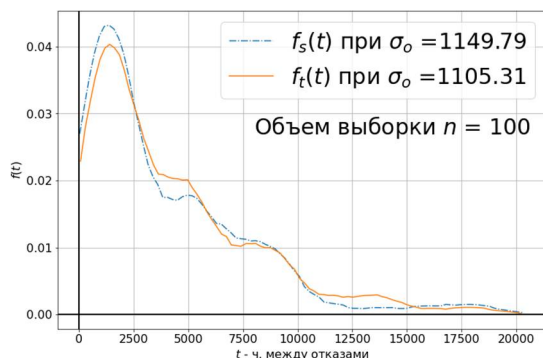


Рис. 7. Аппроксимация плотности распределения по $n=100$

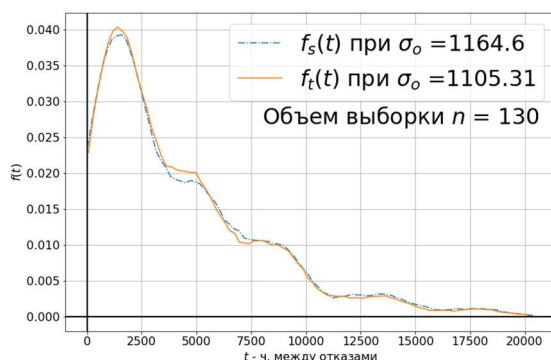


Рис. 8. Аппроксимация плотности распределения по $n=130$

На рис. 3-8 приняты следующие обозначения: $f_t(t)$ - плотность распределения времени между отказами по тестовому набору, $f_s(t)$ - по случайным выборкам, t - время работы между отказами, σ_o - оптимальное значение параметра сглаживания, n - объем выборки.

Заключение

Полученные зависимости позволяют сделать выводы об общей тенденции улучшения точности оценивания при использовании оптимального параметра сглаживания и объема выборки. При этом уже от 10 случайных величин и использовании оптимального параметра сглаживания полученная оценка плотности достигает заданного уровня точности.

Помимо оценки точности итоговой функции плотности распределения, графический анализ используется для проведения технологического анализа надежности объекта и корректировки режимов его эксплуатации.

Литература

1. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. 2-е изд. СПб.: БХВ-Петербург, 2008. 97 с.
2. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения: утв. постановлением Госстандарта СССР от 15 ноября 1989 г. № 3375.
3. Антонов А.В., Никулин М.С. Статистические модели в теории надежности. М.: Абрис, 2012. 390 с.
4. Бостанджиян В.А. Пособие по статистическим распределениям. Черногоровка: Редакционно-издательский отдел ИПХФ РАН, 2013. 1060 с.
5. Чепурко В.А. Ядерная оценка параметра потока отказов. Диагностика и прогнозирование состояния сложных систем // Сборник научных трудов каф. АСУ НИЯУ МИФИ. 2004. № 15. С. 19-31.
6. Гаскаров Д.В., Шаповалов В.И. Малая выборка. М.: Статистика, 1978. 248 с.
7. Rozenblatt, M. Remark on some nonparametric estimates of a density function // Annals of Mathematical Statistics. 1956. № 27. P. 832-837.
8. Захаров Д.Н., Никулин В.С. Анализ методов статистической оценки эксплуатационной надежности вычислительных комплексов. // Научные технологии в космических исследованиях Земли. 2020. Т. 12. № 1. С. 64-69.
9. Богданов Ю.И. Основная задача статистического анализа данных: корневой подход. М.: МИЭТ, 2002. 132 с.
10. Антонов А.В. Статистический анализ эксплуатационной надежности электронасосных агрегатов ЦН 60-180 реакторов ВВЭР-1000 методами ядерного оценивания // Известия вузов. Ядерная энергетика. 2009. № 3. С. 5-14.
11. Parzen E. On estimation of a probability density function and mode. 33rd ed. Annals of Mathematical Statistics, 1962. 1065-1076 pp.
12. Деврой Л., Дьерфи Л. Непараметрическое оценивание плотности. L1-подход. М.: Мир, 1988. 408 с.
13. Hooke R., Jeeves T. "Direct Search" Solution of Numerical and Statistical Problems // ACM Journals. 1961. Pp. 212-229. <https://doi.org/10.1145/321062.321069>
14. Silverman B.W. Density estimation for Statistics and Data Analysis. London: monographs on Statistics and Applied Probability, 1986. Pp. 20-23
15. Никулин В.С. Методика подготовки данных для интеллектуального анализа надежности вычислительных комплексов // Вестник СИБГУТИ. 2020. № 3. С. 26-37.

Поступила 30.11.2021; принята к публикации 18.02.2022

Информация об авторах

Никулин Владимир Сергеевич - аспирант кафедры информационных технологий, Новосибирский государственный университет экономики и управления (630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52/1 оф. 5-210), e-mail: nikulin-94@inbox.ru

Пестунов Андрей Игоревич - канд. физ.-мат. наук, заведующий кафедрой информационных технологий, Новосибирский государственный университет экономики и управления (630099, Россия, г. Новосибирск, ул. Каменская, 52/1 оф. 5-210), e-mail: pestunov@gmail.com

APPROXIMATION OF THE DISTRIBUTION DENSITY OF TIME BETWEEN FAILURES OF A COMPUTING SYSTEM BY THE ROSENBLATT-PARZEN NONPARAMETRIC METHOD

V.S. Nikulin, A.I. Pestunov

Novosibirsk State University of Economics and Management, Novosibirsk, Russia

Abstract: determining the causes of equipment failures is one of the main tasks of organizing an experimental assessment of the reliability of objects. The solution of this problem is best met by statistical estimation of the distribution density of random variables. A random variable in reliability theory considers such time indicators as the moments of equipment failure and recovery, as well as the operating time between failures and the time required to restore it after the failure. In this work, we carried out a study on the approximation of the distribution density of the operation time between failures, according to data from the operation of the composite equipment of a computer system. This equipment is highly reliable and is characterized by a small number of failures, as well as the absence of a priori information about the law of distribution of random variables. For these reasons, the nonparametric Rosenblatt-Parzen method is considered as an approximation method. In the method under study, the kernel function is responsible for smoothness, and the smoothing parameter is responsible for the accuracy of the distribution density approximation. The Gaussian function, previously considered in works on reliability theory, is chosen as the kernel. Based on the Hooke-Jeeves method, we developed an algorithm for finding the optimal smoothing parameter responsible for the approximation accuracy. We carried out the assessment of the effect of the smoothing parameter and the sample size on the accuracy of the approximation on the basis of an analysis of the estimation of errors in the L_1 -space metric and a graphical representation. The conducted study allows us to conclude that the use of the optimal smoothing parameter in the presence of samples of different sizes can reduce the final approximation error

Key words: statistical analysis, experimental reliability, computer system, Rosenblatt-Parzen method

References

1. Polovko A.M., Gurov S.V. "Foundations of the theory of reliability" ("Osnovy teorii nadezhnosti"), St. Petersburg: BHV-Petersburg, 2008.
2. GOST27.002-89. "Industrial product dependability. General concepts. Terms and definitions", 1989
3. Antonov A.V., Nikulin M.S. "Statistical models in the theory reliability" ("Statisticheskie modeli v teorii nadezhnosti"), Moscow: Abris, 2012, 390 p.
4. Bostandzhiyan V.A. "A guide to statistical distributions" ("Posobie po statisticheskim raspredeleniyam"), Chernogolovka: Editorial and Publishing Department of IPHF RAS, 2013, 1060 p.
5. Chepurko V.A. "Nuclear estimation of the failure stream parameter. Diagnostics and forecasting of the state of complex systems", *Collection of Scientific Papers (Sbornik nauchnykh trudov)*, MEFI, 2004, no. 15, pp. 19-31.
6. Gaskarov D.V., Shapovalov V.I. "Small sample" ("Malaya vyborka"), Moscow: Statistika, 1978, 248 p.
7. Rozenblatt M. "Remark on some nonparametric estimates of a density function", *Annals of Mathematical Statistics*, 1956, no. 27, pp. 832-837.
8. Zaharov D.N., Nikulin V.S. "Analysis of methods of statistical evaluation of operational reliability of computational complexes", *Scientific Technologies in Space Research of the Earth (Naukovyemkie tekhnologii v kosmicheskikh issledovaniyakh Zemli)*, 2020, vol. 12, no. 1, pp. 64-69.
9. Bogdanov Yu.I. "The main objective of statistical data analysis: the root approach" ("Osnovnaya zadacha statisticheskogo analiza dannykh: kornevoy podkhod"), Moscow: MIET, 2002, pp. 25-34.
10. Antonov A.V. "Statistical analysis of the operational reliability of electric pumping units TsN 60-180 of VVER-1000 reactors using nuclear assessment methods", *News of Higher Universities. Nuclear Power (Izvestiya vuzov. Yadernaya Energetika)*, 2009, no.3, pp. 5-14.
11. Parzen E. "On estimation of a probability density function and mode", 33rd ed. *Annals of Mathematical Statistics*, 1962, pp. 1065-1076.
12. Devroye L., Györfi L. "Nonparametric density estimation", Wiley, 1985, 408 p.
13. Hooke R., Jeeves T. "Direct Search" solution of numerical and statistical problems", *ACM Journals*, 1961, pp. 212-229, available at: <https://doi.org/10.1145/321062.321069>
14. Silverman B.W. "Density estimation for statistics and data analysis", *Monographs on Statistics and Applied Probability*, London, 1986.
15. Nikulin V.S. "Methods of data preparation data for intelligent analysis of the computer systems reliability", *Bulletin of Sib-SUTI (Vestnik SibGUTI)*, 2020, no. 3(51), pp. 26-37.

Submitted 30.11.2021; revised 18.02.2022

Information about the authors

Vladimir S. Nikulin, Graduate student, Novosibirsk State University Economic and Management (office № 5-210, 52/1 Kamenskaya st., Novosibirsk 630099, Russia), e-mail: nikulin-94@inbox.ru

Andrey I. Pestunov, Cand. Sc. (Phys.-Math.), Head of Information Technology Dept., Novosibirsk State University Economic and Management (office № 5-210, 52/1 Kamenskaya st., Novosibirsk 630099, Russia), e-mail: pestunov@gmail.com

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ СРЕДСТВ ГОЛОСОВОГО ИНТЕРФЕЙСА И ТЕХНОЛОГИЙ РАСПОЗНАВАНИЯ РЕЧИ

В.А. Малиновкин¹, Н.В. Валуйских¹, Н.Н. Шведов¹, С.Л. Кенин², Н.И. Гребенникова¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²ООО "Атос Айти Солюшенс Энд Сервисез", г. Воронеж, Россия

Аннотация: задача распознавания речи - одна из самых сложных и востребованных задач в настоящее время. Голосовые помощники, реализованные с помощью голосовых интерфейсов, заметно упрощают управление различными системами в ограниченных условиях. Такие интерфейсы должны обладать интуитивно понятным интерфейсом для комфортного пользования людьми с различного рода ограничениями. При разработке системы выполнение этого критерия является одной из главных задач при создании современных технических систем. В настоящее время мировой рынок распознавания речи имеет огромный объем и высокую динамику развития, в то время как рынок систем распознавания речи в России невелик, но имеет перспективы к развитию. Рассмотрены наиболее известные голосовые помощники: Google Assistant, Amazon Alexa, Microsoft Cortana, Siri, Яндекс Алиса, произведено сравнение по общим показателям. Были выявлены как положительные стороны, так и отрицательные. Преимущества обусловлены такими параметрами, как наличие высокого уровня «человечности», способность к самообучению, автоматическое воспроизведение операций. Среди недостатков наиболее критичны такие моменты, как несоответствие качества по времени отклика и предоставленным функционалом, отсутствие быстрой интеграции с другими системами и универсальной принадлежности

Ключевые слова: средства голосового интерфейса, технологии распознавания речи, обеспечение комфортных условий для пользователей современных технических систем

Введение

В настоящее время трудно представить создание какой-либо системы без интерфейсов, которые реализуются с использованием различных средств и методов. При разработке такой системы необходимо учитывать ее восприятие. Получение на выходе интуитивно понятного и естественного интерфейса является одной из главных задач при создании современных технических систем [6].

Для создания более комфортных условий управления технической системой часто используется голосовой интерфейс. Такое средство упрощает управление для людей с разного рода ограничениями в движении. Голосовые интерфейсы используют для управления такими системами, как «Умный дом», звонками, поиском информации в интернете.

Согласно сведениям «Рынок приложений автоматического распознавания речи 2010-2013», мировой рынок речевых технологий сегодня оценивается примерно в 900 миллионов долларов. Также наблюдается рост примерно на 28% в год. Такая ситуация на рынке определяет стремительное развитие голосовых технологий и широкий охват сферы повседневной жизни.

В современном мире рынок систем распознавания речи в России мал. По оценкам Stela - Computer Systems, объем этого рынка составляет около 10 миллионов долларов, а динамика порядка 15-30%. Поэтому в настоящее время существует проблема создания систем, обеспечивающих голосовой интерфейс для специалистов и обычных пользователей, а также существует необходимость интеграции таких систем с существующими. На практике решить такую задачу нетривиально.

Обзор функциональных возможностей голосовых помощников

Google Assistant

Google был одним из первых поставщиков голосовых помощников [7]. Google Assistant - это обновленная версия программы, которая работает на Android, iOS и браузере Chrome. Он способен понимать разговорный язык, поддерживать простейшие диалоги, постепенно осваивать функции, которые нужны пользователю. Например, функция звонка, бронирования билетов и мест в различных сервисах и ожидания ответа оператора. В программе есть функция прослушивания всех звонков на автоответчике и уведомления пользователя, когда кто-то поднимает трубку. [1].

Рассмотрим функции системы голосового помощника по основным параметрам:

- система позиционируется как помощник для поиска информации;
- система предназначена для управления умными девайсами, осуществлять информационный поиск и получать справочную информацию;
- система может понимать голосовые команды и реагировать на произвольную речь;
- система применима на следующих мобильных ОС: Android, IOS;
- система насчитывает использование порядка 30 языков.

Основные минусы системы: слишком инициативна, показывает уведомления, на которые вы не подписывались; крайне низкий уровень «человечности», не может поддержать беседу [2].

Яндекс Алиса

Яндекс Алиса - лучшее изобретение российского рынка, ничем не уступающее программам Amazon и Microsoft. У этой системы много преимуществ, так как функциональность рассчитана на российского пользователя. У Алисы есть функция воспроизведения информации о погоде и последних новостей, включения музыки, запуска программ и облегчения беседы. Работает в браузере Яндекс для мобильных устройств, на Android и iOS. Ассистент может идентифицировать товары на картинках и находить их на «Яндекс.Маркет».

Основные параметры:

- система позиционируется как средство воспроизведения музыки;
- система предназначена для обработки голосовых запросов;
- реализовано управление медиа системами;
- реализована возможность интегрирования системы с социальными сетями и некоторыми сервисами;
- возможность распознавания команд и отзыв на произвольную речь;
- система может использоваться на следующих мобильных ОС: Android, IOS.

Среди недостатков можно выделить чрезмерную человечность.

Amazon Alexa

Amazon Alexa появился в колонке производителя и постепенно переходит на мобильные устройства. Это часть «Умного дома», контролирующая работу большого количества технических устройств. Например, поддерживает

функцию открывания жалюзи и дверей гаража, включения света и телевизора, настройки термостата и систему кондиционирования. Искусственный интеллект является обучаемым, Amazon регулярно выпускает обновления. На данный момент голосовой помощник - один из лучших систем в мире [9].

Основные параметры:

- платформа позиционируется для управления сервисом «Умный дом»;
- система предназначена для управления умными девайсами, взаимодействия с товарами и сервисами Amazon, заказа товаров и просмотра справочных материалов;
- система может использоваться на следующих мобильных ОС: Android, IOS;
- система может работать на 6 языках.

Основные недостатки заключаются в следующем: система пытается перевести все ответы с целью приобретения товара; использование ограничено домом.

Microsoft Cortana

Microsoft Cortana в первую очередь имела реализацию на персональный компьютер и ноутбуках этого производителя. Со временем голосовой помощник появился на Android-смартфонах, что позволяет выполнять задачи на ходу и тратить меньше времени. В отличие от программ от Google и Apple, использующих браузер Chrome, Cortana использовала разработку Microsoft Bing. Ассистент добавлен в умную колонку Harmon Kardon Invoke и консоль Xbox One [10]. Основные параметры:

- система позиционируется как помощник для поиска информации;
- система предназначена для управления сервисами Microsoft, способна выполнять уникальные функции, принимать голосовые команды;
- система может использоваться на следующих мобильных ОС: Android, IOS;
- система обладает «человечностью».

Основные недостатки заключаются в недоработанной реализации уникальных функций.

Siri

Siri проста в использовании и может выполнять короткие команды. Искусственный интеллект подстраивается за несколько недель под человека, начинает лучше реагировать на пользователя, что помогает улучшить распознавание речи. Существует возможность корректировки произношения Siri. Также есть поддержка русского языка [8].

Рассмотрим функционал голосового помощника по основным параметрам:

- система позиционируется как средство воспроизведения музыки;
- система имеет реализацию управления умными девайсами;
- способность осуществления поиска информации в интернете;

– система способна к интеграции к различным социальным сетям;

– система может использоваться на следующих мобильных ОС: Android, IOS;

– система может работать на 21 языке, включая диалекты.

Основные недостатки заключаются в медленной работе, низком уровне «человечности», в недоступности для многих приложений и сервисов.

Сравнительные характеристики функциональных возможностей голосовых помощников

Сравнительные особенности	Google Assistant	Яндекс Алиса	Amazon Alexa	Microsoft Cortana	Siri
Компания-производитель	Google	Яндекс	Amazon	Microsoft	Apple
Активационная фраза	«О`кей, Google»	«Привет, Алиса»	«Alexa»	нет	«Привет, Siri»
Позиционирование	Поисковик	Музыкальная колонка	Управление умным домом	Поисковик	Музыкальная колонка
Решаемые задачи	Управление умными устройствами; поиск информации в интернете; справочная информация	Обработка голосового запроса; управление медиа	Управление умными устройствами; взаимодействие с товарами и сервисами Amazon; дозаказ новых продуктов; справочная информация	Получать сведения о ближайших собраниях; поиск информации в интернете; управление умными устройствами; создание уникальных функций	Управление умными устройствами; поиск информации в интернете; цифровая няня
Интеграция с умными устройствами	Да	Да	Да	Да	Да
Интеграция с социальными сетями и почтовыми сервисами	Нет	Да	Нет	Да	Нет
«Человечность» (нестандартность ответов на нестандартные вопросы)	Может поддерживать самые простые диалоги	Может поддерживать разговор, рассказывать сказки или шутить	Нет	Нет	Может поддерживать самые простые диалоги
Понимает команды и произвольную речь	Да	Да	Да	Да	Зависит от голосовых команд
Мобильное приложение	Android, iOS, браузер Chrome	Android, iOS, браузер Яндекс	Android, iOS	Android, iOS	Android, iOS
Язык	Порядка 30 языков	русский	английский; французский; немецкий; японский; испанский; хинди	английский; французский; немецкий; японский; испанский; португальский; китайский	21 язык, включая диалекты

Вывод

Исходя из проведенного анализа вышеупомянутых систем, можно сделать вывод, что рассмотренные системы обладают искусственным интеллектом. Они способны распознавать речь, давать ответы, выполнять команды. Рассмотренные системы имеют ряд преимуществ, таких как наличие высокого уровня «человечности», способность к самообучению, автоматически воспроизводить операции, но также есть и недостатки. Данные платформы не соответствуют качеству по соответствию времени отклика и предоставленным функционалом, отсутствует быстрая интеграция с другими системами и универсальной принадлежности. В дальнейшем будет представлена платформа, решающая поставленные задачи.

Литература

1. Применение распознавания речи в автоматизированных системах массового обслуживания / В.А. Жожикашвили и др. // Автоматизация и современные технологии. 2003. № 11. С. 23-29.

2. Краткое описание индивидуальных особенностей электронных помощников. URL: <https://markakachestva.ru/rating-of/4006-luchshie-golosovye-pomoschniki.html>.

3. Основные характеристики популярных электронных помощников. URL: <https://blog.dti.team/voice-assistants-1/>.

4. Бабин Д.Н., Мазуренко И.Л., Холоденко А.Б. О перспективах создания системы автоматического распознавания слитной устной русской речи // Интеллектуальные системы. 2003. Т. 6. Вып. 1-4. С. 5 – 24.

5. Baker J.K. Stochastic modeling for automatic speech understanding // Speech Recognition / ed. D.R. Reddy. New York: Academic Press, 1975. P. 521–542.

6. Раскин Д. Интерфейс: новые направления в проектировании компьютерных систем. М.: Символ, 2019.

7. Деангелис О., Деангелис Д. Google. М.: ИД Комсомольская правда, 2020.

8. Каммингс Д.Д. Apple. М.: ИД Комсомольская правда, 2020.

9. Шеннон М. Amazon. М.: ИД Комсомольская правда, 2020.

10. Лора Л. Microsoft. М.: ИД Комсомольская правда, 2020.

Поступила 30.11.2021; принята к публикации 17.02.2021

Информация об авторах

Малиновкин Владислав Алексеевич – магистрант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: malinovkin@mail.ru

Валуysких Никита Владимирович – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: workvaluyskikh@mail.ru

Шведов Николай Николаевич – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: nik.shvedov.2018@mail.ru

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

Гребенникова Наталия Ивановна – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: g-naty@yandex.ru

OVERVIEW OF VOICE INTERFACE TOOLS AND SPEECH RECOGNITION TECHNOLOGIES

V.A. Malinovkin¹, N.V. Valuyskikh¹, N.N. Shvedov¹, S.L. Kenin², N.I. Grebennikova¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²LLC "Atos IT Solutions and Services", Voronezh, Russia

Abstract: speech recognition task is one of the most difficult and demanded tasks at the present time. Voice assistants implemented using voice interfaces greatly simplify the management of various systems in limited conditions. Such interfaces should have an intuitive interface for comfortable use by people with various kinds of limitations. When developing a system, the fulfillment of this criterion is one of the main tasks in creating modern technical systems. Currently, the global speech recognition market is of huge volume and high dynamics of development, while the market for speech recognition systems in Russia is small but has prospects for development. This article reviewed the most advanced voice assistants: Google Assistant, Amazon Alexa, Microsoft Cortana, Siri, Yandex Alice. We made a comparison in terms of general indicators. Both positive and negative aspects were identified. The advantages are due to such parameters as: the presence of a high level of "humanity", the ability to self-learn, automatically reproduce operations. Among the drawbacks, the most critical are such moments as: mismatch in quality in terms of compliance with the response time and the provided functionality, the lack of quick integration with other systems and universal accessory

Key words: voice interface tools, speech recognition technologies, providing comfortable conditions for users of modern technical systems

References

1. Jozhikashvili V.A. et al. "Application of speech recognition in automated queuing systems", *Automation and Modern Technologies (Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii)*, 2003, no. 11, pp. 23-29.
2. A brief description of the individual characteristics of electronic assistants, available at: <https://markakachestva.ru/rating-of/4006-luchshie-golosovye-pomoschniki.html>.
3. The main characteristics of popular electronic assistants, available at: <https://blog.dti.team/voice-assistants-1/>.
4. Babin D.N., Mazurenko I.L., Kholodenko A.B. "On the prospects of creating a system of automatic recognition of the continuous speech in Russian", *Intellectual Systems (Intelektual'nye sistemy)*, 2003, vol. 6, no. 1-4, pp. 5-24.
5. Baker J.K. "Stochastic modeling for automatic speech understanding", *Speech Recognition*, ed. D.R. Reddy, New York: Academic Press, 1975, pp. 521-542.
6. Raskin D. "Interface: new directions in the design of computer systems", 2019
7. De Angelis O., De Angelis D. "Google", 2020
8. Cammings J.D. "Apple", 2020
9. Shennon M. "Amazon", 2020
10. Lora L. "Microsoft", 2020

Submitted 30.11.2021; revised 17.02.2021

Information about the authors

Vladislav A. Malinovkin, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: malinovkin@mail.ru

Nikita V. Valuyskikh, bachelor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: workvaluiskish@mail.ru

Nikolay N. Shvedov, bachelor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: nik.shvedov.2018@mail.ru

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

Nataliya I. Grebennikova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: g-naty@yandex.ru

АЛГЕБРАИЧЕСКАЯ МЕТОДОЛОГИЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ БЕСЦИКЛОВОЙ МАРШРУТИЗАЦИИ

Х. Хаю, М.А. Орлова, Л.И. Абросимов

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт»,
г. Москва, Россия

Аннотация: задачу маршрутизации можно сформулировать следующим образом: учитывая сеть G , необходимо найти наилучший путь между узлами i и j из сети. Однако понятие «лучшее» расплывчато, и оно зависит от того, какие параметры в составной метрике сетевые операторы пытаются оптимизировать. Для разделения проблем была введена алгебра маршрутизации для моделирования того, что пытаются решить протокол маршрутизации, сохраняя при этом общий алгоритм маршрутизации. Тем не менее все протоколы маршрутизации должны решать проблему свободы от циклов. Цель этой статьи – представить теорию бесциклового маршрутизации с произвольной метрикой. Показано, что выбор базовой алгебры может повлиять на производительность самого алгоритма, как в представленном примере для протокола маршрутизации (EIGRP). Кроме того, модификация алгебры маршрутизации может помочь во внедрении новых алгоритмов маршрутизации. Примером может служить протокол DSN (Распределенный порядковый номер), который использует гибридный алгоритм состояния каналов и дистанционно-векторный. В метрику DSN добавлены новые компоненты, которые представляют собой порядковый номер и бит флага для запроса увеличения порядкового номера. Это помогло, как показано в этой статье, решить проблему бесциклового маршрутизации с незначительными изменениями в исходном дистанционно-векторном алгоритме. В данной работе решены следующие задачи. Условия для бесциклового маршрутизации и отношения между ними были представлены алгебраически и доказаны. Введена концепция монотонной маршрутизации. Была исследована бесцикловая маршрутизация при наличии и отсутствии монотонности. На основании сформулированных теорем разработана алгебраическая модель и валидация бесциклового алгоритма, используемого в протоколе DSN

Ключевые слова: полукольца, алгебра маршрутизации, бесцикловая маршрутизация, алгоритм Беллмана-Форда, диффузионные вычисления

Введение

Маршрутная петля – это распространенная проблема в компьютерных сетях. Это происходит, когда вычисленный путь к определенному пункту назначения содержит петлю из-за неточных таблиц маршрутизации, поэтому пакеты данных, предназначенные для этого пункта назначения, будут бесконечно за циклироваться, пока в итоге не будут отброшены. Это особенно верно для ранних протоколов дистанционно-векторной маршрутизации, таких как протокол маршрутной информации (RIP), который склонен к за цикливанию. В протоколах, основанных на технологии отслеживания состояния канала, таких как протокол динамической маршрутизации (OSPF) и протокол маршрутизации промежуточных систем (IS-IS), петли маршрутизации все еще могут возникать [1], однако они недолговечны, поскольку исчезают, как только информация о новой топологии распространяется по сети и все маршрутизаторы синхронизируют свои базы данных состояния канала.

Новые протоколы дистанционно-векторной маршрутизации, такие как протокол пограничного шлюза (BGP) и улучшенный протокол маршрутизации внутреннего шлюза (EIGRP), разработаны для предотвращения петель до их возникновения. Протокол EIGRP – это собственный протокол компании Cisco, основанный на протоколе внутреннего шлюза (IGRP). EIGRP был преобразован в открытый стандарт в 2013 году и опубликован в Рабочем предложении RFC 7868 в 2016 году [2]. В EIGRP используется алгоритм диффузионного обновления (DUAL). Время сходимости или конвергенции при использовании DUAL превосходит время сходимости любого другого существующего протокола маршрутизации [3]. В EIGRP используется SNC (Source Node Condition – условие исходного узла), которое является одним из достаточных условий для отсутствия петель. Это условие выполняется, когда объявленное расстояние соседа для конкретного пункта назначения строго меньше, чем выполнимое расстояние для этого пункта назначения [1,4]. Другие подходящие условия включают DIC (Distance Increase Condition – условие увеличения расстояния) и CSC (Current

Successor Condition – условие текущего маршрутизатора).

Доказано, что DUAL не содержит циклов в каждый момент времени и сходится за конечное время после возникновения изменений стоимости соединения [1]. Однако EIGRP использует ту же составную метрику, что и IGRP, которая использует доступную пропускную способность, задержку, использование нагрузки и надежность соединения для вычисления метрики. В работе [5] составная метрика моделируется с помощью алгебраической конструкции, называемой функциональным продуктом, где авторы показали, что метрика EIGRP не является монотонной, в результате чего EIGRP решает локальное оптимальное решение в отличие от глобального оптимального решения, которое решается классической задачей о кратчайшем пути. Насколько нам известно, формального доказательства корректности DUAL с немонотонной метрикой пока не было.

В этой статье исследуется концепция бесцикловой маршрутизации с общей метрикой, используя матричную модель с полукольцами. Дано алгебраическое представление для условий достаточности бесцикловой маршрутизации в модели полукольцо. Также исследуется связь между ними и предоставляется алгебраическое доказательство их корректности. Более того, вводится понятие монотонной маршрутизации. Было замечено, что если маршрутизация уменьшалась (или увеличивалась) в одной итерации, то она будет продолжать это делать и в следующих итерациях, пока топология является фиксированной. Универсальность модели помогает показать некоторые теоретические основы и рекомендации по разработке новых протоколов бесцикловой маршрутизации при наличии и отсутствии монотонности.

В [6] был предложен простой гибридный протокол состояния каналов и дистанционно-векторного алгоритма. Дистанционно-векторный алгоритм сохраняется, и операции с циклической свободой передаются для вычисления метрики путем добавления порядкового номера (SN) к метрике. Дистанционно-векторный алгоритм используется для вычисления наилучших путей между узлами инфраструктуры. Проблема нехватки (когда у узла нет возможного маршрутизатора) решается с помощью алгоритма распределенного порядкового номера, который распределяет запрос на увеличение порядкового номера (RISN) в обновлениях до тех пор, пока он не достигнет владельца маршрута. После RISN достигает

владельца маршрута, владелец маршрута выдает обновление с увеличенным SN. Это действует как сброс для расчета для этого маршрута. Алгоритм состояния каналов используется для распределения сетей (префиксов) в пределах одной области и между разными областями вместо самих каналов.

В разделе «Алгоритм распределения порядковых номеров» предоставляется алгебраическая модель и валидация для DSN с использованием полумодулей. Полумодули были предложены в [7] и [8] для моделирования различных проблем интернет-маршрутизации.

1. Обзор смежных работ

В последнее время было предпринято несколько попыток применить формальные методы, в частности, алгебраические спецификации к существующим протоколам маршрутизации. В работах [9] и [10] автор Сорбиньо разработал алгебраическую схему для исследования свойств сходимости протоколов дистанционно-векторной маршрутизации и векторного пути. Показано, что "монотонность" (свойство, связанное с инфляционным свойством, представленным в разделе 2) подразумевает протокол сходимости в каждой сети, но не обязательно к "глобальному оптимуму" (понятие оптимальности определено в разделе 2). Однако "изотоничность" (это свойство, связанное с дистрибутивностью, называется монотонностью в этой статье) гарантирует сходимость к глобальным оптимальным путям, когда протокол конвергирует. Для протоколов состояния каналов Сорбиньо представил более конкретную и менее общую алгебраическую схему [4]. Было замечено, что для моделирования протокола междоменной маршрутизации, такого как BGP, больше подходит локальная оптимальность, а не глобальная оптимальность [9-13].

Гриффин и Сорбиньо предложили метамаршрутизацию как средство разработки протоколов маршрутизации на высоком уровне и в декларативной форме [14]. Метамаршрутизация была основана на алгебре Сорбиньо. Модель Сорбиньо использует отношение частичного порядка для построения алгебры. Существует другой подход к моделированию проблем путей с помощью алгебраических структур, называемых полукольцами ([15], и [16] содержат современные обзоры этой области). Эти две модели могут быть связаны друг с другом [17]. Операции маршрутизации в модели полуколец становятся матричными операциями.

Диффузионная концепция вычислений была впервые предложена Дейкастрой и Шолтенем [18]. После этого большая часть работы по бесцикловой маршрутизации была проделана Гарсией, который представил DUAL [1,4] и доказал, что алгоритм не образует петель. Позже DUAL был принят в EIGRP [3]. DIC обсуждался в литературе до работы Яффе и Мосса, однако они были первыми, кто доказал, что DIC достаточно эффективен для отсутствия образования петель [19]. CSC и SNC были предложены и доказаны Гарсией [1,4]. Гауда и Шнайдер [20] с помощью теории графов показали, что протоколы IGRP и EIGRP ведут себя не так, как ожидалось, из-за составной метрики, которая в общем случае не является немонотонной. Алгебраическая теория маршрутизации также использовалась в более поздних исследованиях в [5,8,21,22]. В [23] автор разработал алгоритмы для оптимального решения задачи о кратчайшем пути для подобных метрик IGRP.

2. Полукольца и графы

В данном разделе кратко описаны вводимые обозначения и обосновано использование полуколец для решения задачи о кратчайшем пути. Данный подход подробно изложен в [24]. В данном разделе приведены доказательства известных теорем авторами с точки зрения поиска кратчайшего пути без циклов.

Рассмотрим множество $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$, S – непустое и нетривиальное множество, а аксиомы в таблице справедливы. Полукольца отличаются от колец тем, что аддитивные операции не обязательно должны допускать инверсии. То есть требуется, чтобы $(S, \oplus)$ был только моноидом, а не группой [15]. Это позволяет определить нетривиальное естественно упорядоченное множество на S :

$$a \leq_{\oplus} b \equiv a = a \oplus b.$$

Что определяет строгий вариант записи этого множества:

$$a <_{\oplus} b \equiv a = a \oplus b \neq b.$$

Нам нужно, чтобы операция $\oplus$ была идемпотентной ($\forall a \in S: a \oplus a = a$), тогда, если существует отношение $\leq_{\oplus}$, такое множество становится частично упорядоченным множеством (рефлексивным, антисимметричным и переходным). Если операция $\oplus$ также является селективной ($\forall a, b \in S: a \oplus b \in \{a, b\}$), то если существует отношение $\leq_{\oplus}$, то такое множество

становится линейно упорядоченным множеством. Кроме того, определяется канонически упорядоченное множество на полугруппе $(S, \oplus)$ следующим образом

$$a \leq_{\oplus} b \equiv \exists c \in S: a = b \oplus c.$$

Если $\oplus$ коммутативна и идемпотентна, то

$$\forall a, b \in S: a \leq_{\oplus} b \Leftrightarrow a \leq_{\oplus} b.$$

Монотонность слева и справа соответственно определяется следующим образом

$$\begin{aligned} a \leq_{\oplus} b &\Rightarrow c \otimes a \leq_{\oplus} c \otimes b \\ a \leq_{\oplus} b &\Rightarrow a \otimes c \leq_{\oplus} b \otimes c. \end{aligned}$$

Аксиомы полукольца

Аксиома	Пояснение
$\oplus$ Ассоциативность	$a \oplus (b \oplus c) = (a \oplus b) \oplus c$
$\oplus$ Коммутативность	$a \oplus b = b \oplus a$
$\otimes$ Нейтральный элемент	$a \otimes \bar{0} = \bar{0} \otimes a = a$
$\otimes$ Ассоциативность	$a \otimes (b \otimes c) = (a \otimes b) \otimes c$
$\otimes$ Нейтральный элемент	$a \otimes \bar{1} = \bar{1} \otimes a = a$
$\otimes$ Поглощающий элемент	$a \otimes \bar{0} = \bar{0} \otimes a = \bar{0}$
Дистрибутивность слева	$a \otimes (b \oplus c) = (a \otimes b) \oplus (a \otimes c)$
Дистрибутивность справа	$(a \oplus b) \otimes c = (a \otimes c) \oplus (b \otimes c)$

Более того, определяется строгое инфляционное свойство слева и справа соответственно

$$\begin{aligned} \forall a, b \in S, a \neq \bar{0}, b \neq \bar{1}: a <_{\otimes} b \otimes a \\ \forall a, b \in S, a \neq \bar{0}, b \neq \bar{1}: a <_{\otimes} a \otimes b. \end{aligned}$$

Полукольцо $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ можно использовать для определения множества $(M_n(S), \oplus, \otimes, J, I)$ матриц $n \times n$, где Матрицы J и I определяются как:

$$\begin{aligned} J(i, j) &= \bar{0} \\ I(i, j) &= \begin{cases} \bar{1}, & \text{если } i = j \\ \bar{0}, & \text{иначе} \end{cases} \end{aligned}$$

Классическая задача поиска кратчайшего пути может быть смоделирована полукольцами [25]. Для данного полукольца $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ и графа $G = (V, E)$ весовая функция – это отображение $w: E \rightarrow S - \{\bar{0}\}$. Граф представляется с помощью взвешенной матрицы смежности.

$$A(i, j) = \begin{cases} w(e), & \text{если } e = (i, j) \in E \\ \bar{0}, & \text{иначе} \end{cases}$$

Путь $p = v_1, v_2, \dots, v_{k+1}$ длины k представляет собой последовательность узлов, таких что $(v_m, v_{m+1}) \in E, \forall m \in \{1, \dots, k\}$. Его вес может быть задан как:

$$w(p) = w(v_1, v_2) \otimes w(v_2, v_3) \otimes \dots \otimes w(v_k, v_{k+1}).$$

Нулевые пути обозначаются ϵ и имеют вес $\bar{1}$. Несуществующим путям присваивается вес $\bar{0}$.

Степени матрицы A определяются индуктивно:

$$\begin{aligned} A^0 &= A^{(0)} = I \\ A^{k+1} &= A \otimes A^k \\ A^{(k+1)} &= A^{k+1} \oplus A^{(k)}. \end{aligned}$$

Пусть $P^k(i, j)$ – набор путей от узла i до j , который имеет ровно k дуг. $P^{(k)}(i, j)$ – это набор путей от узла i до j с не более чем k дугами. $P(i, j)$ – это набор всех возможных путей от узла i до j . Обозначим p простым путем, если в нем нет циклов. $SP(i, j)$ обозначает множество всех возможных простых путей от узла i до j . Кроме того, $SP^{(k)}(i, j)$ – это набор всех простых путей от i до j , имеющих не более k дуг длины.

Теорема 1.

$$\begin{aligned} A^k(i, j) &= \bigoplus_{p \in P^k(i, j)} w(p) \\ A^{(k)}(i, j) &= \bigoplus_{p \in P^{(k)}(i, j)} w(p) \end{aligned}$$

Если существует $q \geq 0$ такое, что $A^{(q+1)} = A^{(q)}$, то $\forall k \geq q: A^{(k)} = A^{(q)}$. Тогда можно утверждать, что A является стабильным. Также можно сказать, что $A^{(k)}$ сходится к $A^* = A^{(q)}$, и назовем A^* матрицей замыкания A .

$$A^*(i, j) = \bigoplus_{k \geq 0} A^{(k)} = \bigoplus_{p \in P(i, j)} w(p)$$

Последнее уравнение интерпретируется как: A^* – это решение глобальной задачи об оптимальном пути. Определим, когда такое решение существует. Из Теоремы 2 следует, что инфляционного свойства достаточно для глобальной оптимальности в полукольцах, и решение достигается не более чем за $n - 1$ итераций. Теорема 3 гласит, что решение будет таким же, если оно будет построено с использованием только простых путей. Поскольку используются только простые пути, решение будет достигнуто после $d \leq n - 1$ итераций, где d – диаметр графа. Для удобства представлено доказательство теоремы 2.

Теорема 2. Пусть $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ – идемпотентное полукольцо, и пусть $\bar{1}$ – аннигилятор (поглощающий элемент) для $\oplus$. Тогда все взвешенные матрицы смежности в $(M_n(S), \oplus, \otimes, J, I)$ являются $(n - 1)$ -стабильными [24].

Доказательство

Пусть $A \in M_n(S)$, где A – взвешенная матрица смежности графа $G = (V, E)$. Достаточно показать, что $A^{(n)} = A^{(n-1)}$. Пусть $(a, b) \in S^2$, тогда

$$\begin{aligned} a \oplus (a \otimes b) &= (a \otimes \bar{1}) \oplus (a \otimes b) = a \otimes (\bar{1} \oplus b) = a \otimes \bar{1} = a. \end{aligned}$$

Это означает, что $\forall (a, b) \in S^2 : a \leq_{\oplus} a \otimes b$, что является левым инфляционным свойством. Аналогично, $\forall (a, b) \in S^2 : a \leq_{\oplus} b \otimes a$ – правое инфляционное свойство. Чтобы инфляционное свойство сохранялось в классической задаче о кратчайшем пути (полукольцо $(\mathbb{R} \cup \{\infty\}, \min, +, \infty, 0)$), необходимо ограничить набор $\mathbb{R}_+$, поэтому используются только положительные числа для весов пути.

Пусть $p \in P^n(i, j), i \neq j$. Так как все узлы в графе, отличные от i и j , равны $n - 2$. Тогда любой простой путь будет иметь не более $n - 1$ дуги. Это означает, что p – не является простым путем. Значит, он содержит по крайней мере одну петлю. Пусть петля находится в узле k , $p_{i,k}$ – это часть пути от i до k , $p_{k,k}$ петля в узле k , $p_{k,j}$ – часть пути от k до j , и, наконец, p' – путь после удаления петли, который можно получить от присоединения $p_{i,k}$ и $p_{k,j}$. Имеем:

$$\begin{aligned} w(p) &= w(p_{i,k}) \otimes w(p_{k,k}) \otimes w(p_{k,j}) \\ w(p') &= w(p_{i,k}) \otimes w(p_{k,j}) \\ w(p) \oplus w(p') &= (w(p_{i,k}) \otimes w(p_{k,k}) \otimes w(p_{k,j})) \oplus (w(p_{i,k}) \otimes w(p_{k,j})) \\ &= w(p_{i,k}) \otimes ((w(p_{k,k}) \otimes w(p_{k,j})) \oplus w(p_{k,j})) \\ &= w(p_{i,k}) \otimes w(p_{k,j}) \\ &= w(p') \end{aligned}$$

Таким образом, если $p \in P^n(i, j)$, то существует путь $p' \in P^{(n-1)}(i, j)$, такой что $w(p) \oplus w(p') = w(p')$. Путем переупорядочения элементов суммы $\oplus$, поскольку $\oplus$ коммутативна, получим:

$$\begin{aligned} A^{(n)}(i, j) &= \bigoplus_{q \in P^{(n)}(i, j)} w(q) \\ &= \left(\bigoplus_{q \in P^{(n)}(i, j), q \neq p, q \neq p'} w(q) \right) \oplus (w(p) \oplus w(p')) \end{aligned}$$

$$= \left(\bigoplus_{q \in P^{(n)}(i,j), q \neq p, q \neq \bar{p}} w(q) \right) \oplus w(p)$$

$$= \bigoplus_{q \in P^{(n)}(i,j), q \neq p} w(q)$$

Это означает, что p может быть исключено из предыдущей суммы без ущерба для результата. Поскольку это можно сделать для любого $p \in P^n(i, j)$, получаем:

$$A^{(n)}(i, j) = \bigoplus_{q \in P^{(n)}(i,j), q \notin P^n(i,j)} w(q)$$

Так как $P^{(n)}(i, j) - P^n(i, j) = P^{(n-1)}(i, j)$ тогда

$$A^{(n)}(i, j) = \bigoplus_{q \in P^{(n-1)}(i,j)} w(q) = A^{(n-1)}(i, j)$$

Таким образом, $M_n(S)$, является $(n-1)$ -стабильным.

Теорема 3. Пусть $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ – идемпотентное полукольцо и пусть $\bar{1}$ – аннигилятор для $\oplus$. Тогда

$$A^{(k)}(i, j) = \bigoplus_{q \in SP^{(k)}(i,j)} w(q)$$

Доказательство

Пусть $p \in P^{(k)}(i, j) - SP^{(k)}(i, j)$. Это означает, что p содержит по крайней мере одну петлю. Следовательно, можно найти путь $p' \in p^{(k)}(i, j)$ такой же, как и в теореме 2, который формируется путем исключения петли из пути p , такой что $w(p) \oplus w(p') = w(p')$.

$$A^{(k)}(i, j) = \bigoplus_{q \in P^{(k)}(i,j), q \neq p} w(q).$$

То же самое можно сделать для всех путей в $P^{(k)}(i, j) - SP^{(k)}(i, j)$. Поскольку множество $P^{(k)}(i, j) - SP^{(k)}(i, j)$ конечно. Тогда

$$A^{(k)}(i, j) = \bigoplus_{q \in SP^{(k)}(i,j)} w(q).$$

Алгоритм Беллмана-Форда может быть смоделирован с помощью следующей итерации [8, 17, 21]

$$A^{(0)} = I.$$

$$A^{(k+1)} = A \otimes A^{(k)} \oplus I. \quad (1)$$

Эта итерация называется итерацией вектора расстояния. Если A – взвешенная матрица смежности графа $G = (V, E)$, то (1) можно записать как

$$A^{(k+1)}(i, j) = I(i, j) \oplus \bigoplus_{q \in V} A(i, q) \otimes A^{(k)}(q, j). \quad (2)$$

Если $N(i) \subseteq V$ – множество соседей узла i , то можно свести сумму к множеству $N(i)$, поскольку $A(i, q) = \bar{0}$, когда $q \notin N(i)$

$$A^{(k+1)}(i, j) = I(i, j) \oplus \bigoplus_{q \in N(i)} A(i, q) \otimes A^{(k)}(q, j). \quad (3)$$

Предположим, что левое строгое инфляционное свойство сохраняется и звенья не могут иметь вес $\bar{1}$, то маршрутизация не имеет петель для статической топологии, т.е. будут рассматриваться только простые пути. В этом легко убедиться из теоремы 3. Если $\otimes$ сократима, а $\bar{1}$ является аннигилятором для $\oplus$, то левые и правые строгие инфляционные свойства сохраняются.

$$a \neq \bar{0}, a \otimes b = a \otimes c \Rightarrow b = c$$

$$c \neq \bar{0}, a \otimes c = b \otimes c \Rightarrow a = b$$

В динамической топологии, если некоторые звенья выходят из строя, то могут возникнуть петли, вызывающие проблему сходимости или бесконечности счета. Это можно легко объяснить алгебраически [8]. Предположим, что итерация вектора расстояния начинается с произвольной матрицы M , а не с I . M представляет матрицу наилучших весов путей до изменения топологии, в то время как A – это новая взвешенная матрица смежности после изменения топологии.

$$A_M^{(0)} = M$$

$$A_M^{(k+1)} = A \otimes A_M^{(k)} \oplus I \quad (4)$$

Отсюда находим, что для $k \geq 1$

$$A_M^{(k)} = (A^k \otimes M) \oplus A^{(k-1)}. \quad (5)$$

Если A является $(n-1)$ -стабильным и для $k \geq n$ имеем

$$A_M^{(k)} = (A^k \otimes M) \oplus A^*. \quad (6)$$

Хотя член A^* может быть скоро найден, может оказаться, что член $A^k \otimes M$ предпочтительнее. Таким образом, итерация будет продолжаться до тех пор, пока $A^* \leq_{\oplus} A^k \otimes M$. Этого может не произойти, при отсутствии пути, соединяющего узлы i и j [8] – в этом случае счёт продлится до бесконечности. Решения этой проблемы включают ограничение числа переходов до 15, как в протоколе RIP [26]. В BGP транслируется весь путь, и алгоритм модифицируется для рассмотрения только простых путей [27]. Другое возможное решение –

использование алгоритма DUAL, который, как доказано, не содержит петель [1,4].

3. Достаточные условия отсутствия петель при дистанционно-векторной маршрутизации

В данном разделе сформулированы и доказаны условия «выполнимости» (т.е. отсутствия петель) при дистанционно-векторной маршрутизации. Пусть $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ является левым строгим инфляционным, избирательным и идемпотентным полукольцом. При этом $\bar{1}$ не может быть использовано в качестве веса звена. Селективность (избирательность) нужна нам для того, чтобы иметь возможность определить узел-маршрутизатор, который является узлом следующего перехода, выбранным узлом i , который соответствует наилучшему пути к узлу назначения j .

Необходимо модифицировать модель дистанционно-векторной маршрутизации в (1) и учесть изменения топологии. Для случая изменения топологии принято изменение взвешенной матрицы смежности A . Пусть матрица, вычисленная путем итерации дистанционно-векторной маршрутизации “матрицей маршрутизации”.

Узел $q \neq i$ является нисходящим узлом для i в направлении j , если путь, выбранный i , проходит через q . Тогда q – восходящий узел для i , а i – нисходящий узел для q . Уравнение (7) описывает модель дистанционно-векторной маршрутизации в динамической топологии. M_k описывает матрицу маршрутизации (веса наилучших путей) на этапе k , а A_{k+1} представляет собой новую взвешенную матрицу смежности, которая отражает новую топологию (она будет такой же, как A_k , если на этапе $k + 1$ не произойдет изменений топологии).

$$M_{k+1} = A_{k+1} \otimes M_k \oplus I \quad (7)$$

Маршрутизатором i в пути к j ($i \neq j$) на этапе $k + 1$ является узел s , выбранный i так, что

$$M_{k+1}(i, j) = \bigoplus_{q \in V} A_{k+1}(i, q) \otimes M_k(q, j) = A_{k+1}(i, s) \otimes M_k(s, j). \quad (8)$$

Это справедливо, поскольку $\oplus$ является выборочной операцией.

Важность бесциклового маршрутизации заключается в том, что она гарантирует сходи-

мость в динамической топологии согласно Теореме 4.

Теорема 4. Если получена матрица M , и топология устанавливается на взвешенной матрице смежности A (без дальнейшего изменения топологии), и впоследствии маршрутизация не содержит петель (проверяются только простые пути), то маршрутизация будет сходиться к A^* .

Доказательство

Пусть $k \geq n$, тогда A^k будет эквивалентно J , поскольку не существует простого пути с числом дуг больше $n - 1$ и предполагается, что алгоритм рассматривает только простые пути. Тогда $A^{(k)} = J \otimes M \oplus A^* = A^*$.

Существует 3 достаточных условия бесциклового маршрутизации [1]. Выразим их алгебраически следующим образом:

Условие 1 – увеличения расстояния DIC. Узел i может изменить маршрутизатор в направлении j на узел s , который удовлетворяет (8), если расстояние не увеличивается, т.е. $M_{k+1}(i, j) \leq_{\oplus} M_k(i, j)$. В противном случае узел i должен поддерживать текущий маршрутизатор в направлении j .

Условие 2 текущего маршрутизатора CSC. Узел i может изменить маршрутизатор в направлении j на узел s , который удовлетворяет (8), если $M_k(s, j) \leq_{\oplus} M_{k-1}(s', j)$, где s' является маршрутизатором на предыдущем этапе (шаг k). В противном случае узел i должен поддерживать текущий маршрутизатор.

Условие 3 исходного узла SNC. Узел i может изменить маршрутизатор в направлении j на узел s , удовлетворяющий (8), если $M_k(s, j) <_{\oplus} M_k(i, j)$. В противном случае узел i должен поддерживать текущий маршрутизатор.

Далее доказана корректность перечисленных условий.

Теорема 5. *Условие 3* является достаточным условием бесциклового маршрутизации.

Доказательство

В (8) предположим, что получена матрица маршрутизации M . Пусть i выбирает маршрутизатор s_1 на следующем шаге маршрутизации в направлении j , сформирован цикл $(i, s_1, s_2, \dots, s_k, i)$. Если учитывается *условие 3* при выборе маршрутизатора, имеем

$$\begin{aligned} M(s_1, j) &<_{\oplus} M(i, j) \\ M(s_2, j) &<_{\oplus} M(s_1, j) \\ &\vdots \\ M(s_k, j) &<_{\oplus} M(s_{k-1}, j) \\ M(i, j) &<_{\oplus} M(s_k, j). \end{aligned}$$

То есть получаем:

$$M(i, j) <_{\oplus} M(s_k, j) <_{\oplus} M(s_{k-1}, j) <_{\oplus} \dots \\ \dots <_{\oplus} M(s_1, j) <_{\oplus} M(i, j).$$

Но это приводит к противоречию $M(i, j) <_{\oplus} M(i, j)$. Т.к. никакой цикл не может быть сформирован, что и требовалось доказать.

Теорема 6. При выполнении условия 1 выполняется условие 3.

Доказательство

В (8) предположим, что получена матрица маршрутизации M , а взвешенная матрица смежности равна A . Предположим, что узел i выбирает узел s в качестве маршрутизатора в направлении j . Тогда новое расстояние до узла j равно $A(i, s) \otimes M(s, j)$, если узел i учитывает условие 1 при выборе маршрутизатора. Тогда имеем $A(i, s) \otimes M(s, j) \leq_{\oplus} M(i, j)$. Соответственно $M(s, j) <_{\oplus} A(i, s) \otimes M(s, j)$, так как $A(i, s) \neq \bar{1}$. Следовательно, $M(s, j) <_{\oplus} M(i, j)$ и условие 3 выполняется.

Теорема 7. При выполнении условия 2 выполняется условие 3.

Доказательство.

В (8) предположим, что узел i выбирает s в качестве маршрутизатора на шаге $k+1$ в направлении узла назначения j . Пусть s' был маршрутизатором на шаге k . Теперь, если условие 2 выполняется, то $M_k(s, j) \leq_{\oplus} M_{k-1}(s', j)$. Тогда $M_k(i, j) = A_k(i, s') \oplus M_{k-1}(s', j)$. Следовательно, $M_{k-1}(s', j) <_{\oplus} M_k(i, j)$ и, следовательно, $M_k(s, j) <_{\oplus} M_k(i, j)$.

Следствие 1. Условие 1 и условие 2 являются достаточными условиями бесцикловой маршрутизации.

4. Монотонная маршрутизация

Теорема 8 гласит, что если матрица маршрутизации увеличивается (или уменьшается) при одной итерации вектора расстояния и топология фиксирована, то она будет продолжать увеличиваться (или уменьшаться) на следующих итерациях. Теорема 10 доказывает, что при уменьшении матрица маршрутизации сходится за конечное число итераций вектора расстояний.

Теорема 8. Пусть $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ – идемпотентное полукольцо. В уравнении (4)

1. Если $A_M^{(1)} \leq_{\oplus}^L M$, то $\forall k > 0 :$
 $A_M^{(k+1)} \leq_{\oplus}^L A_M^{(k)}$
2. Если $M \leq_{\oplus}^L A_M^{(1)}$, то $\forall k > 0 :$
 $A_M^{(k)} \leq_{\oplus}^L A_M^{(k+1)}$

Доказательство.

Уравнение 1 будет доказано методом индукции. Уравнение 2 может быть доказано аналогичным образом. Предположим, что неравенство в 1 справедливо для k , тогда

$$A_M^{(k+1)} \oplus A_M^{(k)} = A_M^{(k+1)}.$$

Из дистрибутивности $\otimes$ на $\oplus$ следует, что

$$(A \otimes A_M^{(k+1)}) \oplus (A \otimes A_M^{(k)}) = A \otimes A_M^{(k)}.$$

Тогда имеем

$$((A \otimes A_M^{(k+1)}) \oplus I) \oplus ((A \otimes A_M^{(k)}) \oplus I) = \\ (A \otimes A_M^{(k)}) \oplus I.$$

Так как $I \oplus I = I$, тогда

$$A_M^{(k+2)} \oplus A_M^{(k+1)} = A_M^{(k+2)}.$$

Значит, неравенство справедливо для $k+1$, тогда оно справедливо и для $\forall k \geq 0$.

В общем случае маршрутизация может уменьшаться для некоторых узлов назначения и увеличиваться для некоторых других, тем не менее маршрутизация к узлу не зависит от маршрутизации к другим узлам, что подтверждается наблюдением 9.

Наблюдение 9. Маршрутизация к узлу j не зависит от маршрутизации к другим узлам.

Это справедливо, потому что значения столбца $M_{k+1}(-, j)$ строятся с использованием только значений в столбце $M_k(-, j)$. Поэтому можно ограничиться только узлом назначения j .

Теорема 10. Пусть $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ – левое инфляционное идемпотентное полукольцо. В (4), если $A_M^{(1)} \leq_{\oplus}^L M$, то маршрутизация будет сходиться к $A^* \otimes (A^n \otimes M \oplus I)$.

Доказательство

Из теоремы 2 известно, что A будет $(n-1)$ -стабильным. Из (6) для $k \geq 0$ имеем

$$A_M^{(k+n)} = (A^{k+n} \otimes M) \oplus A^*$$

Из теоремы 8 получаем

$$A_M^{(k+n)} \leq_{\oplus}^L A_M^{(k-1+n)} \leq_{\oplus}^L \dots \leq_{\oplus}^L A_M^{(1+n)} \leq_{\oplus}^L A_M^{(k+n)}$$

Таким образом

$$A_M^{(k+n)} = A_M^{(n)} \oplus A_M^{(n+1)} \oplus \dots \oplus A_M^{(k+n)}$$

в других формах

$$A_M^{(k+n)} = ((A^n \otimes M) \oplus A^*) \\ \oplus ((A^{n+1} \otimes M) \oplus A^*) \oplus \dots \\ \oplus ((A^{k+n} \otimes M) \oplus A^*)$$

Следовательно

$$\begin{aligned} A_M^{(k+n)} &= (A^n \otimes M) \oplus (A^{n+1} \otimes M) \oplus \dots \\ &\quad \oplus (A^{k+n} \otimes M) \oplus A^* \\ &= (I \oplus A \oplus A^2 \oplus \dots \oplus A^k) \otimes (A^n \otimes M) \\ &\quad \oplus A^* \end{aligned}$$

Тогда для $k \geq n - 1$ получаем

$$\begin{aligned} A_M^{(k+n)} &= A^* \otimes (A^n \otimes M) \oplus A^* \\ &= A^* \otimes (A^n M \oplus I) \end{aligned}$$

Следствие 2. Пусть $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ – левое строгое инфляционное, избирательное и идемпотентное полукольцо, и звенья не могут иметь вес $\bar{1}$. В (4), если $A_M^{(1)} \leq_{\oplus}^L M$, тогда процедура будет сходиться к A^* .

Это справедливо, поскольку маршрутизация не будет иметь петель из-за условия 1. Это наводит на мысль, что для того, чтобы сделать бесцикловую маршрутизацию после изменения топологии, матрица маршрутизации M должна быть изменена таким образом, чтобы результирующая маршрутизация уменьшалась. С другой стороны, в полукольцах, если A стабильно, то A^* является “наибольшим” решением (фиксированной точкой) уравнения $X = (A \otimes X) \oplus I$ [24]. Это объясняется тем, что $X = (A^{k+1} \otimes X) \oplus A^k$, что можно доказать индуктивно. Таким образом, после изменения топологии необходимо увеличить начальную матрицу M так, чтобы маршрутизация уменьшилась до A^* . Отметим, что если в полукольцах выполняется свойство индуктивности, то увеличение маршрутизации может быть вызвано только петлями.

5. Бесцикловая маршрутизация в немонотонной алгебре

Монотонность не требуется для доказательства того, что условие 3 является достаточным условием для бесцикловой маршрутизации. Более того, корректность условия 1 и условия 2 может быть доказана без монотонности, где вместо этого предполагается строгое инфляционное свойство.

Уменьшение маршрутизации является фундаментом для бесцикловой маршрутизации. Однако, если базовая алгебра не является монотонной, то маршрутизация не обязательно будет уменьшаться даже в статической топологии. В качестве примера рассмотрим метрику протокола EIGRP (см. уравнение (9) [2,5]). Используются значения K по умолчанию ($K_1 = K_3 = 1, K_2 = K_4 = K_5 = 0$). Тогда метрика при-

мет вид (bw, d) где b – пропускная способность, а d – задержка. На простом графе, представленном на рис. 1, пусть расстояние от узла k до j равно $(2 \times 10^6, 1)$.

$$\begin{aligned} f: \mathbb{N}^\infty \times \mathbb{N}^\infty \times \mathbb{N}[1,255] \times \mathbb{N}[1,255] &\rightarrow \mathbb{R}_+^\infty \\ f(bw, d, l, r) &= 256 \times \left(K_1 \times \frac{10^7}{bw} + K_2 \times \frac{10^7}{bw \times (256 - l)} + K_3 \times \right. \\ &\quad \left. d \right) \times \begin{cases} 1, & \text{если } K_5 = 0 \\ \frac{K_5}{K_4 + r}, & \text{иначе} \end{cases} \end{aligned} \quad (9)$$

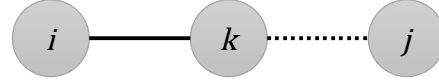


Рис. 1. Простой граф

После применения функции стоимости на этом расстоянии получаются

$$f(2 \times 10^6, 1) = 256 \times (5 + 1) = 1530.$$

Предположим также, что стоимость звена от i до k равна $(2 \times 10^6, 1)$. Вычисленное расстояние в узле i до узла j в этом случае равно $(\min(2 \times 10^6, 2 \times 10^6), 1 + 1) = (2 \times 10^6, 2)$.

Применяя функцию стоимости на указанном выше расстоянии, получаются

$$f(2 \times 10^6, 2) = 256 \times (5 + 2) = 1792.$$

Теперь предположим, что узел k выбирает другой путь к j . Пусть расстояние нового пути равно $(5 \times 10^6, 3)$. Это расстояние предпочтительнее предыдущего расстояния узла k , так как

$$f(5 \times 10^6, 4) = 256 \times (2 + 3) = 1280.$$

Вычисленное расстояние от i до j становится

$$(\min(5 \times 10^6, 2 \times 10^6), 3 + 1) = (2 \times 10^6, 4).$$

Применяя функцию стоимости на указанном выше расстоянии, получаем

$$f(2 \times 10^6, 4) = 256 \times (5 + 4) = 2304.$$

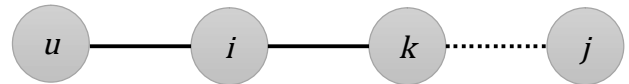


Рис. 2. Простой граф 2

Из приведенного выше обсуждения следует, что расстояние в узле k уменьшилось, однако расстояние в узле i увеличилось. Таким образом, ясно, что маршрутизация в этом случае не уменьшается, даже если топология статична. Если используется условие 1 в качестве условия выполнимости при бесцикловой маршрутизации это приведет к диффузионным вычислениям

ям в узле i . Аналогичные сценарии можно найти для других достаточных условий при бесцикловой маршрутизации. Например, если используется *условие 2*, и есть узел u , который использует узел i в качестве маршрутизатора при маршрутизации в направлении j (см. рис. 2). Увеличение расстояния в узле i приведет к диффузионным вычислениям в u . Если используется *условие 3* и расстояние в i после увеличения становится “больше”, чем расстояние в u , то в u произойдет диффузионное вычисление. Обратите внимание, что, если используется оригинальный распределенный алгоритм Беллмана-Форда (вместо DUAL) в последнем случае, узел i выберет узел u в качестве маршрутизатора, что приведет к образованию петли маршрутизации. Это означает, что алгоритм DBF не обязательно свободен от циклов в статической топологии, если лежащая в основе алгебра не монотонна, что объясняет, почему не ограничено $n - 1$ итерацией для достижения сходимости в немонотонной алгебре.

При использовании DUAL затронутый узел после изменения топологии начинает диффузионные вычисления. Таким образом, все вышележащие узлы изменяют свое расстояние до нужного значения. В результате маршрутизация уменьшится до сходимости, когда не произойдет никаких других изменений топологии, и в будущем не произойдет никаких диффузионных вычислений [1]. Это справедливо, если имеет место монотонность, поскольку Гарсия использовал в своем обсуждении оригинальную проблему о кратчайшем пути. Однако в немонотонной алгебре, такой как метрика EIGRP, нет гарантии, что после завершения исходного диффузионного вычисления не произойдет никаких последующих диффузионных вычислений. Тем не менее если новое диффузионное вычисление произойдет, и если предположить, что новая топология не изменилась, то она затронет только подмножество узлов из исходных узлов восходящего потока, которые были затронуты при первом диффузионном вычислении. Это означает, что каждое последующее диффузионное вычисление будет влиять на меньший набор узлов. Затем через некоторое время никаких диффузионных вычислений никогда не произойдет, и протокол достигнет точки равновесия и сойдется. Единственное отличие состоит в том, что протокол будет сходиться к локальному оптимальному решению, а не к глобальному оптимальному решению из-за потери монотонности. Оптимальность заклю-

чается в том смысле, что узел не может переключить свой маршрутизатор на лучший путь, учитывая выбор соседних узлов. Алгебраически локальное оптимальное решение является фиксированной точкой для уравнения $L = (A \otimes L) \oplus I$.

6. Алгоритм распределения порядковых номеров

Особенность данного алгоритма в использовании пересылок, которая позволяет использовать его в виртуальных сетях дата центров. Поэтому необходимо пояснить различие между пересылкой и маршрутизацией. При маршрутизации требуется определить стоимость пути до узла назначения, в то время как при пересылке требуется определить стоимость пути до некоторой сети на основании ее описания в удалённых маршрутизаторах. Для моделирования этого используется та же модель полукольца, которая использовалась ранее. Пусть V – множество узлов инфраструктуры $n = |V|$, а R – множество узлов пересылки (сетей) $d = |R|$, где $V \cap R = \emptyset$. Матрица смежности A размерностью $n \times n$, которая берет свои значения из полукольца $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$, представляет собой веса связей на графе $G = (V, E)$, в то время как существует другая матрица M размерности $n \times d$, называемая матрицей отображения, данная матрица моделирует, как узлы в R прикреплены (или подключены) к узлам инфраструктуры в V . В простейшем случае предположим, что матрица M также принимает свои значения в S . Если $\bar{1}$ – это аннигилятор для $\oplus$ (это подразумевает, что $\oplus$ идемпотентна $a \oplus a = (a \otimes \bar{1}) \oplus (a \otimes \bar{1}) = a \otimes (\bar{1} \oplus \bar{1}) = a \otimes \bar{1} = a$), то A^* существует и решает уравнение $L = (A \otimes L) \oplus I$.

Тогда $A^* \otimes M$ решает уравнение:

$$F = (A \otimes F) \oplus M. \quad (10)$$

Поэтому задача нахождения матрицы пересылки F делится на две подзадачи: решение проблемы поиска маршрута к узлам инфраструктуры V и распределение матрицы отображения M по узлам инфраструктуры. Первая задача может быть решена с помощью алгоритма дистанционно-векторной маршрутизации с использованием порядковых номеров, а вторая задача решается с помощью алгоритма состояния каналов (см. рис. 3 в качестве примера [7]).

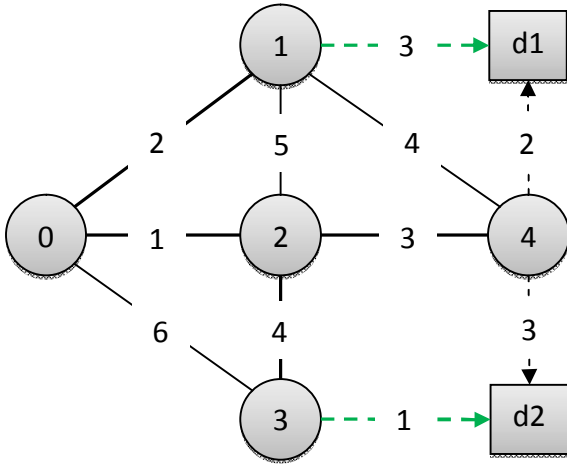


Рис. 3. Пример простой маршрутизации и пересылки

$$M = \begin{matrix} & d_1 & d_2 \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \infty & \infty \\ 3 & \infty \\ \infty & \infty \\ \infty & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix} \end{matrix} \quad F = \begin{matrix} & d_1 & d_2 \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 5 & 6 \\ 3 & 7 \\ 5 & 5 \\ 9 & 1 \\ 2 & 3 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Другая алгебраическая конструкция, называемая полумодулями, используется для моделирования порядкового номера. В более общем случае M принимает свои значения в другой алгебраической структуре $(N, \boxplus, \triangleright)$, где $\triangleright \in S \times N \rightarrow N$. Операция $\boxplus$ между матрицами определяется как $A \boxplus B = C$, где A , B и C одинаковой размерности и $C(i, j) = A(i, j) \boxplus B(i, j)$. Более того, определяется $\triangleright$ между матрицами как функцию $A \triangleright B = C$. Если A имеет размерность $n \times m$ и B размерность $m \times d$, то C имеет размерность $n \times d$.

$$C(i, j) = \bigoplus_{1 \leq k \leq m} A(i, k) \triangleright B(k, j)$$

Пусть $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$ является полукольцом, структура $(N, \boxplus, \triangleright, \bar{0}_N)$ называется полумодулем над S , если выполняются следующие условия:

- $(N, \boxplus, \bar{0}_N)$ коммутативная полугруппа
- $\triangleright \in (S \times N) \rightarrow N$
- $(a \otimes b) \triangleright c = a \triangleright (b \triangleright c)$
- $\bar{0} \triangleright m = \bar{0}_N$
- $s \triangleright \bar{0} = \bar{0}_N$
- $\bar{1} \triangleright m = m$
- LD : $s \triangleright (m \boxplus n) = (s \triangleright m) \boxplus (s \triangleright n)$
- RD : $(s \oplus t) \triangleright m = (s \triangleright m) \boxplus (t \triangleright m)$

Можно проверить, верны ли следующие утверждения о матрицах (размерности I, A, B равны $n \times n$, а C, M равны $n \times d$).

- 1) $I \triangleright C = C$

- 2) $(A \otimes B) \triangleright C = A \triangleright (B \triangleright C)$
- 3) $A \triangleright (C \boxplus M) = (A \triangleright C) \boxplus (A \triangleright M)$
- 4) $(A \oplus B) \triangleright C = (A \triangleright C) \boxplus (B \triangleright C)$

Если $(N, \boxplus, \triangleright, \bar{0}_N)$ является полумодулем полукольца $(S, \oplus, \otimes, \bar{0}, \bar{1})$, а $\bar{1}$ является аннигилятором для $\otimes$. Пусть A – матрица смежности, которая принимает свои значения в S , а F – матрица отображения, которая принимает свои значения в N , тогда $A^* \triangleright M$ является решением уравнения

$$F = (A \triangleright F) \boxplus M. \quad (11)$$

Для решения проблемы пересылки необходимо решить уравнение $F = (A \triangleright F) \boxplus M$. Однако это уравнение будет использоваться также для решения проблемы маршрутизации.

В данном алгоритме каждый узел выбирает порядковый номер. Тогда стоимость пути от узла i к самому себе имеет вид $(s_i, \bar{1}_S)$, например, если $(S, \oplus, \otimes) = (R_+, \min, +)$, то $\bar{0}_S = \infty$ и $\bar{1}_S = 0$. Теперь определим коммутативные полугруппы $(N, \max, 0)$. Пусть $\boxplus$ определяется следующим образом (лексикографическое произведение $\max \times \min$):

$$(s_1, d_1) \boxplus (s_2, d_2) = \begin{cases} (s_1, d_1) & s_1 > s_2 \\ (s_2, d_2) & s_1 < s_2 \\ (s, \min(d_1, d_2)) & s = s_1 = s_2 \end{cases}$$

Функция $\triangleright_{\text{fst}} \in (S \times (N \times S)) \rightarrow (N \times S)$ также определяется следующим образом:

$$d_1 \triangleright_{\text{fst}} (s, d_2) \stackrel{\text{def}}{=} (s, d_1 \otimes d_2),$$

отключённые узлы не сообщают никакой информации: $\bar{0}_S \triangleright_{\text{fst}} (s, d) \stackrel{\text{def}}{=} (0, \bar{0}_S)$.

И отношение $\triangleright$ определяется следующим образом:

$$(L \triangleright M)(i, j) = \bigoplus_{q \in V} L(i, q) \triangleright_{\text{fst}} M(q, j)$$

Затем определяем матрицу M , которая имеет размерность $n \times n$. $M(i, i) = (s_i, \bar{1}_S)$ и $M(i, j) = (0, \bar{0}_S)$, где $i \neq j$. И затем алгоритм вычисляет решение уравнения $F = (A \triangleright F) \boxplus M$, где M и F имеют одинаковую размерность, а расчет стоимости производится для узлов инфраструктуры. Идея состоит в том, что при изменении матрицы смежности A у некоторых узлов из узлов инфраструктуры не будут найдены маршрутизаторы для некоторых пунк-

тов назначения, если увеличить порядковый номер для таких пунктов назначения, это равносильно сбросу для маршрутизации до данных пунктов назначения. Рассмотрим пример на рис. 4 и сформируем матрицы:

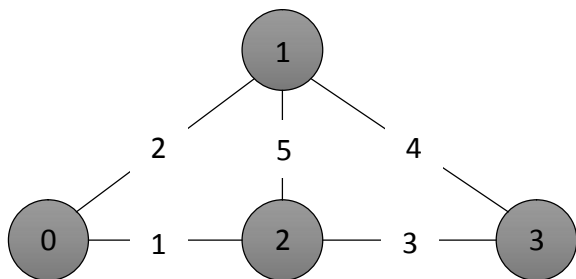


Рис. 4. Иллюстрация алгоритма распределения порядковых номеров

$$A = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \infty & 2 & 1 & \infty \\ 2 & \infty & 5 & 4 \\ 1 & 5 & \infty & 3 \\ \infty & 4 & 3 & \infty \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$A^* = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} 0 & 2 & 1 & 4 \\ 2 & 0 & 3 & 4 \\ 1 & 3 & 0 & 3 \\ 4 & 4 & 3 & 0 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$M = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (s_0, 0) & (0, \infty) & (0, \infty) & (0, \infty) \\ (0, \infty) & (s_1, 0) & (0, \infty) & (0, \infty) \\ (0, \infty) & (0, \infty) & (s_2, 0) & (0, \infty) \\ (0, \infty) & (0, \infty) & (0, \infty) & (s_3, 0) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$F = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (s_0, 0) & (s_1, 2) & (s_2, 1) & (s_3, 4) \\ (s_0, 2) & (s_1, 0) & (s_2, 3) & (s_3, 4) \\ (s_0, 1) & (s_1, 3) & (s_2, 0) & (s_3, 3) \\ (s_0, 4) & (s_1, 4) & (s_2, 3) & (s_3, 0) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Рассмотрим случай, если связь между 0 и 2 нарушена. Поэтому в соответствии с алгоритмом увеличим порядковый номер в матрице M . Новая матрица смежности представляет собой:

$$B = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} \infty & 2 & \infty & \infty \\ 2 & \infty & 5 & 4 \\ \infty & 5 & \infty & 3 \\ \infty & 4 & 3 & \infty \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$M' = \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (s'_0, 0) & (0, \infty) & (0, \infty) & (0, \infty) \\ (0, \infty) & (s'_1, 0) & (0, \infty) & (0, \infty) \\ (0, \infty) & (0, \infty) & (s'_2, 0) & (0, \infty) \\ (0, \infty) & (0, \infty) & (0, \infty) & (s'_3, 0) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

где $s'_i = s_i + 1$

$$F_0 = F \boxplus M'$$

$$= \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (s'_0, 0) & (s_1, 2) & (s_2, 1) & (s_3, 4) \\ (s_0, 2) & (s'_1, 0) & (s_2, 3) & (s_3, 4) \\ (s_0, 1) & (s_1, 3) & (s'_2, 0) & (s_3, 3) \\ (s_0, 4) & (s_1, 4) & (s_2, 3) & (s'_3, 0) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$F_1 = (B \triangleright F_0) \boxplus M'$$

$$= \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (s'_0, 0) & (s'_1, 2) & (s_2, 5) & (s_3, 6) \\ (s'_0, 2) & (s'_1, 0) & (s'_2, 5) & (s'_3, 4) \\ (s_0, 7) & (s'_1, 5) & (s'_2, 0) & (s'_3, 3) \\ (s_0, 4) & (s'_1, 4) & (s'_2, 3) & (s'_3, 0) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$F_2 = (B \triangleright F_1) \boxplus M'$$

$$= \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (s'_0, 0) & (s'_1, 2) & (s'_2, 7) & (s'_3, 6) \\ (s'_0, 2) & (s'_1, 0) & (s'_2, 5) & (s'_3, 4) \\ (s'_0, 7) & (s'_1, 5) & (s'_2, 0) & (s'_3, 3) \\ (s'_0, 6) & (s'_1, 4) & (s'_2, 3) & (s'_3, 0) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$F_2 = B^* \triangleright M'$

Переходные циклы могут образовываться, когда узлы используют маршруты со старыми порядковыми номерами. Чтобы решить данную проблему, необходимо добавить проверку условия «выполнимости», введём дополнительный бит запроса. Пусть $\mathbb{B} = \{true, false\}$, и определим операцию $\sqcup$ над полугруппой $\mathbb{B} \times \mathbb{N}$ следующим образом

$$(b_1, s_1) \sqcup (b_2, s_2) = (b_1 \vee b_2, \max(s_1, s_2))$$

Ясно, что $\sqcup$ ассоциативно, коммутативно и $(false, 0)$ является нейтральным элементом. Далее операция $\boxplus$ определяется следующим образом

$$(b_1, s_1, d_1) \boxplus (b_2, s_2, d_2) = \begin{cases} (b_1, s_1, d_1) & s_1 > s_2 \\ (b_2, s_2, d_2) & s_1 < s_2 \\ (b_1 \vee b_2, s, \min(d_1, d_2)) & s = s_1 = s_2 \end{cases}$$

$d_1 \triangleright (b, s, d_2) \stackrel{\text{def}}{=} (b, s, d_1 \otimes d_2)$ and $\bar{0}_s \triangleright (b, s, d) \stackrel{\text{def}}{=} (false, 0, \bar{0}_s)$

$$(L \triangleright M)(i, j) = \sum_{q \in V} L(i, q) \triangleright M(q, j)$$

Теперь необходимо вычислить $F_{k+1} = (A_{k+1} \triangleright F_k) \boxplus M_k$. Введём матрицу D , которая содержит расстояние выполнимости и вычисляется с использованием уравнения $D_{k+1} = F_{k+1} \boxplus D_k$. Используем условие 3 для проверки выполнимости. Узел s является возможным маршрутизатором для узла i при маршрутизации в направлении j , если $F_k(s, j) <_{\boxplus} D_k(i, j)$, где $F_k(s, j)$ – указанное расстояние узла s до его непосредственно подключенного соседа i , а j – узел назначения. Если нет возможного маршрутизатора, запрос на увеличение порядкового номера устанавливается в $F_{k+1}(i, j)$. Если запрос на увеличение порядкового номера будет установлен для элемента в диагонали $F_{k+1} = (A_{k+1} \triangleright F_k) \boxplus M_k$, порядковый номер элемента в матрице M_k вместо этого увеличивается, поэтому порядковый номер также будет увеличен в F_{k+1} , а бит останется неустановленным для диагонального элемента. Проиллюстрируем на примере рис. 4.

$$D_0 = F_0$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0, 0)$	$(f, s_1, 2)$	$(f, s_2, 1)$	$(f, s_3, 4)$
1	$(f, s_0, 2)$	$(f, s_1, 0)$	$(f, s_2, 3)$	$(f, s_3, 4)$
2	$(f, s_0, 1)$	$(f, s_1, 3)$	$(f, s_2, 0)$	$(f, s_3, 3)$
3	$(f, s_0, 4)$	$(f, s_1, 4)$	$(f, s_2, 3)$	$(f, s_3, 0)$

$$B =$$

	0	1	2	3
0	∞	2	∞	∞
1	2	∞	5	4
2	∞	5	∞	3
3	∞	4	3	∞

$$M_0$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0, 0)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$
1	$(f, 0, \infty)$	$(f, s_1, 0)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$
2	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, s_2, 0)$	$(f, 0, \infty)$
3	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, s_3, 0)$

$$F_1 = (B \triangleright F_0) \boxplus M_0$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0, 0)$	$(f, s_1, 2)$	(t, s_2, ∞)	(t, s_3, ∞)
1	$(f, s_0, 2)$	$(f, s_1, 0)$	$(f, s_2, 3)$	$(f, s_3, 4)$
2	(t, s_0, ∞)	$(f, s_1, 5)$	$(f, s_2, 0)$	$(f, s_3, 3)$
3	$(f, s_0, 4)$	$(f, s_1, 4)$	$(f, s_2, 3)$	$(f, s_3, 0)$

$$M_1 = M_0, D_1 = F_1 \boxplus D_0$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0, 0)$	$(f, s_1, 2)$	$(t, s_2, 1)$	$(t, s_3, 4)$
1	$(f, s_0, 2)$	$(f, s_1, 0)$	$(f, s_2, 3)$	$(f, s_3, 4)$
2	$(t, s_0, 1)$	$(f, s_1, 3)$	$(f, s_2, 0)$	$(f, s_3, 3)$
3	$(f, s_0, 4)$	$(f, s_1, 4)$	$(f, s_2, 3)$	$(f, s_3, 0)$

$$F_2 = (B \triangleright F_1) \boxplus M_1$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0, 0)$	$(f, s_1, 2)$	(t, s_2, ∞)	(t, s_3, ∞)
1	$(t, s_0, 2)$	$(f, s_1, 0)$	$(t, s_2, 5)$	$(t, s_3, 4)$
2	(t, s_0, ∞)	$(f, s_1, 5)$	$(f, s_2, 0)$	$(f, s_3, 3)$
3	$(t, s_0, 6)$	$(f, s_1, 4)$	$(f, s_2, 3)$	$(f, s_3, 0)$

$$D_2 = F_2 \boxplus D_1$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0, 0)$	$(f, s_1, 2)$	$(t, s_2, 1)$	$(t, s_3, 4)$
1	$(t, s_0, 2)$	$(f, s_1, 0)$	$(t, s_2, 3)$	$(t, s_3, 4)$
2	$(t, s_0, 1)$	$(f, s_1, 3)$	$(f, s_2, 0)$	$(f, s_3, 3)$
3	$(t, s_0, 4)$	$(f, s_1, 4)$	$(f, s_2, 3)$	$(f, s_3, 0)$

$$M_2$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0', 0)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$
1	$(f, 0, \infty)$	$(f, s_1, 0)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$
2	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, s_2', 0)$	$(f, 0, \infty)$
3	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, 0, \infty)$	$(f, s_3', 0)$

$$F_3 = (B \triangleright F_2) \boxplus M_2$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0', 0)$	$(f, s_1, 2)$	(t, s_2, ∞)	(t, s_3, ∞)
1	$(t, s_0, 2)$	$(f, s_1, 0)$	$(t, s_2, 5)$	$(t, s_3, 4)$
2	(t, s_0, ∞)	$(f, s_1, 5)$	$(f, s_2', 0)$	$(t, s_3, 3)$
3	$(t, s_0, 6)$	$(f, s_1, 4)$	$(t, s_2, 3)$	$(f, s_3', 0)$

$$M_3 = M_2, D_3 = F_3 \boxplus D_2$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0', 0)$	$(f, s_1, 2)$	$(t, s_2, 1)$	$(t, s_3, 4)$
1	$(t, s_0, 2)$	$(f, s_1, 0)$	$(t, s_2, 3)$	$(t, s_3, 4)$
2	$(t, s_0, 1)$	$(f, s_1, 3)$	$(f, s_2', 0)$	$(t, s_3, 3)$
3	$(t, s_0, 4)$	$(f, s_1, 4)$	$(t, s_2, 3)$	$(f, s_3', 0)$

$$F_4 = (B \triangleright F_3) \boxplus M_3$$

	0	1	2	3
0	$(f, s_0', 0)$	$(f, s_1, 2)$	(t, s_2, ∞)	(t, s_3, ∞)
1	$(f, s_0', 2)$	$(f, s_1, 0)$	$(f, s_2', 5)$	$(f, s_3', 4)$
2	(t, s_0, ∞)	$(f, s_1, 5)$	$(f, s_2', 0)$	$(f, s_3', 3)$
3	$(t, s_0, 6)$	$(f, s_1, 4)$	$(f, s_2', 3)$	$(f, s_3', 0)$

$$M_4 = M_3, D_4 = F_4 \boxplus D_3$$

$$= \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (f, s_0', 0) & (f, s_1, 2) & (t, s_2, 1) & (t, s_3, 4) \\ (f, s_0', 2) & (f, s_1, 0) & (f, s_2', 3) & (f, s_3', 4) \\ (t, s_0, 1) & (f, s_1, 3) & (f, s_2', 0) & (f, s_3', 3) \\ (t, s_0, 4) & (f, s_1, 4) & (f, s_2', 3) & (f, s_3', 0) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$F_5 = (B \triangleright F_4) \boxplus M_4$$

$$= \begin{matrix} & \begin{matrix} 0 & 1 & 2 & 3 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 0 \\ 1 \\ 2 \\ 3 \end{matrix} & \begin{bmatrix} (f, s_0', 0) & (f, s_1, 2) & (f, s_2', 7) & (f, s_3', 6) \\ (f, s_0', 2) & (f, s_1, 0) & (f, s_2', 5) & (f, s_3', 4) \\ (f, s_0', 7) & (f, s_1, 5) & (f, s_2', 0) & (f, s_3', 3) \\ (f, s_0', 6) & (f, s_1, 4) & (f, s_2', 3) & (f, s_3', 0) \end{bmatrix} \end{matrix}$$

$$F_5 = B^* \triangleright M_4$$

Вышеуказанные вычисления выполняются распределено с помощью дистанционно-векторного алгоритма. Затем решение проблемы маршрутизации (B^*) извлекается (путем удаления порядкового номера и бита запроса) из приведенного выше расчета и используется для решения проблемы пересылки в уравнении (10) или (11).

Заключение

Была использована матричная модель с полукольцами для исследования бесцикловой маршрутизации. Показано, что при соблюдении строгого инфляционного свойства, алгоритм Беллман-Форд вычисляет маршрутные пути без петель в статической топологии. Однако в динамической топологии могут возникать петли маршрутизации.

Условия бесцикловой маршрутизации были представлены алгебраически и доказаны. Также показана взаимосвязь между этими условиями. В разделе 4 было введено понятие монотонной маршрутизации. Показано, что если матрица маршрутизации уменьшается (или увеличивается) на одной итерации вектора расстояний, то она будет продолжать уменьшаться (или увеличиваться) на следующих итерациях до тех пор, пока топология является фиксированной. Таким образом, для бесцикловой маршрутизации необходимо управлять матрицей маршрутизации, чтобы уменьшить маршрутизацию так, чтобы условие 1 выполнялось.

Кроме того, обсуждался эффект потери монотонности. Показано, что DBF больше не будет бесцикловым даже в статической топологии и больше не ограничивается $n-1$ итерациями для достижения оптимальности (в данном случае локальной оптимальности). Также про-

демонстрировано, что при использовании DUAL даже в статической топологии могут происходить диффузионные вычисления, однако алгоритм будет сходиться к локальному оптимуму.

Наконец, представлена модель протокола DSN с использованием полумодулей. Модель помогает объяснить и проверить работу используемых алгоритмов гибридного состояния каналов и дистанционно-векторного.

Литература

1. Garcia-Lunes-Aceves J.J. Loop-free routing using diffusing computations // IEEE/ACM Trans. Netw. 1993. 1(1), Pp. 130–141.
2. RFC 7868: Cisco's Enhanced Interior Gateway Routing Protocol (EIGRP) / D. Savage et al. 2016.
3. Albrightson R., Garcia-Luna-Aceves J.J., Boyle J. EIGRP - a fast routing protocol based on distance vectors // Proc. Network/Interop. 1994. 94.
4. Garcia-Luna-Aceves J.J. A unified approach to loop-free routing using distance vectors or link states // ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev. 1989. 19(4). Pp. 212–223.
5. Khayou H., Sarakbi B. A validation model for non-lexical routing protocols // Netw. Comput. Appl. 2017. 98. Pp. 58–64.
6. Khayou H., Orlova M.A., and Abrosimov L.I. A Hybrid Distance Vector Link State Algorithm: Distributed Sequence Number // International Journal of Computer Networks and Applications. 2021. 8.3. Pp. 203–213.
7. Billings J.N., and Timothy G. Griffin. A model of internet routing using semi-modules // International Conference on Relational Methods in Computer Science. Berlin. Heidelberg: Springer, 2009.
8. Alim M.A., Griffin T.G. On the interaction of multiple routing algorithms // Proceedings of the Seventh Conference on Emerging Networking EXperiments and Technologies. 2011.
9. Sobrinho J.L. Network routing with path vector protocols: theory and applications // Proceedings of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. 2003.
10. Sobrinho J.L. An algebraic theory of dynamic network routing // IEEE/ACM Trans. Netw. 2005. 13(5). 1160–1173.
11. Sobrinho, J.L.: Algebra and algorithms for QoS path computation and hop-by-hop routing in the Internet. IEEE/ACM Trans. Netw. 10(4), 541–550 (2002)
12. Gurney A.J.T. Construction and verification of routing algebras. Diss. University of Cambridge. 2010.
13. Sobrinho J.L., Griffin T.G. Routing in equilibrium // Math. Theory Netw. Syst. 2010
14. Griffin T.G., Sobrinho J.L. Metarouting // Proceedings of the 2005 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications. 2005.
15. Gondran M., Minoux M. Graphs, Dioids and Semirings: New Models and Algorithms. 2008. Vol. 41. Springer, New York. <https://doi.org/10.1007/978-0-387-75450-5>
16. Baras J.S., Theodorakopoulos G. Path problems in networks. Synth. Lect. Commun. Netw. 2010. 3(1). 1–77.

17. Griffin T.G., Gurney A.J.T. Increasing bisemigroups and algebraic routing // *RelMiCS. LNCS*. 2008. Vol. 4988. Pp. 123–137. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78913-0_11
18. Dijkstra E.W., Scholten C.S. Termination detection for diusing computations // *Inf. Process. Lett.* 1980. 11(1). 1–4.
19. Jae J., Moss F. A responsive distributed routing algorithm for computer networks // *IEEE Trans. Commun.* 1982. 30(7). Pp. 1758–1762.
20. Gouda M.G., Schneider M. Maximizable routing metrics // *IEEE/ACM Trans. Netw.* 2003. 11(4). Pp. 663–675. <https://doi.org/10.1109/TNET.2003.815294>
21. Dynierowicz S., Griffin T.G. On the forwarding paths produced by internet routing algorithms // 21st IEEE International Conference on Network Protocols (ICNP). 2013
22. Sobrinho J.L. Correctness of routing vector protocols as a property of network cycles // *IEEE/ACM Trans. Netw.* 2017. 25(1). Pp. 150–163. <https://doi.org/10.1109/TNET.2016.2567600>
23. Saad M. Non-isotonic routing metrics solvable to optimality via shortest path. // *Comput. Netw.* 2018. 145. Pp. 89–95.
24. Griffin T. An Algebraic approach to internet routing. University of Cambridge. Lecture Notes. 2010.
25. Mohri M. Semiring frameworks and algorithms for shortest-distance problems // *J. Autom. Lang. Comb.* 2002. 7(3). Pp. 321–350.
26. Malkin G. RFC 2453: RIP Version 2. 1998.
27. Rekhter Y., Li T., Hares S. RFC 4271: A Border Gateway Protocol 4 (BGP-4). 2006.

Поступила 10.01.2022; принята к публикации 16.02.2022

Информация об авторах

Хаю Хуссейн – аспирант кафедры вычислительных машин систем и сетей, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: hussein.khayou@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9790-5871>

Орлова Маргарита Андреевна – ассистент кафедры вычислительных машин систем и сетей, сетевой инженер Информационно-вычислительного центра, администратор академии Cisco, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: RudenkovaMA@mpei.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8214-4117>

Абросимов Леонид Иванович – д-р техн. наук, профессор кафедры вычислительных машин систем и сетей, академик Международной академии информатизации, Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, 14), e-mail: AbrosimovLI@mpei.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6171-8559>

ALGEBRAIC METHODOLOGY FOR MODELING LOOP-FREE ROUTING

H. Khayou, M.A. Orlova, L.I. Abrosimov

National Research University "Moscow Power Engineering Institute", Moscow, Russia

Abstract: the routing problem can be formulated as follows: given a network G , it is necessary to find the best path between nodes i and j from the network G . However, the concept of “best” is obscure, and it depends on which parameters in the composite metric network operators are trying to optimize. For separation of concerns, routing algebras were introduced to model what the routing protocol is trying to solve while maintaining a generic routing algorithm. However, all routing protocols must address the problem of loop-freedom. The purpose of this article is to present a theory of loop-free routing with an arbitrary metric. It is shown that the choice of the basic algebra can affect the performance of the algorithm itself, as in the presented example for the routing protocol (EIGRP). In addition, the modification of the routing algebra can help in the introduction of new routing algorithms. An example is the DSN protocol (Distributed Sequence Number), which uses a hybrid link-state and distance vector algorithm. New components are added to the DSN metric, which are the sequence number and a flag bit denoting a request to increase the sequence number. This helped, as shown in this article, to solve the problem of loop-free routing with minor changes in the original distance vector algorithm. In this paper, the following tasks have been solved. The conditions for loop-free routing and the relations between them were presented algebraically and proved. The concept of monotonous routing is introduced. Loop-free routing was investigated in the presence and absence of monotony. Based on the formulated theorems, an algebraic model and validation of a loop-free algorithm used in the DSN protocol have been developed

Key words: semicircles, routing algebra, loop-free routing, Bellman-Ford algorithm, diffusion computation

References

1. Garcia-Lunes-Aceves J.J. “Loop-free routing using diffusing computations”, *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 1993, no. 1(1), pp. 130–141.
2. Savage D. et al. “RFC 7868: Cisco’s enhanced interior gateway routing protocol (EIGRP)”, 2016.
3. Albrightson R., Garcia-Luna-Aceves J.J., Boyle J. “EIGRP - a fast routing protocol based on distance vectors”, *Proc. Networld/Interop.*, 1994, no. 94.
4. Garcia-Luna-Aceves J.J. “A unified approach to loop-free routing using distance vectors or link states”, *ACM SIGCOMM Comput. Commun. Rev.*, 1989, no. 19(4), pp. 212–223.

5. Khayou H., Sarakbi B. "A validation model for non-lexical routing protocols", *Netw. Comput. Appl.*, 2017, no. 98, pp. 58–64.
6. Khayou H., Orlova M.A., Abrosimov L.I. "A hybrid distance vector link state algorithm: distributed sequence number", *International Journal of Computer Networks and Applications*, 2021, no. 8.3, pp. 203–213.
7. Billings J.N., Griffin T.G. "A model of internet routing using semi-modules", *Int. Conf. on Relational Methods in Computer Science*, Berlin, Heidelberg: Springer, 2009.
8. Alim M.A., Griffin T.G. "On the interaction of multiple routing algorithms", *Proc. of the Seventh Conf. on Emerging Networking Experiments and Technologies*, 2011.
9. Sobrinho J.L. "Network routing with path vector protocols: theory and applications", *Proc. of the 2003 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, 2003.
10. Sobrinho J.L. "An algebraic theory of dynamic network routing", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 2005, no. 13(5), pp. 1160–1173.
11. Sobrinho, J.L. "Algebra and algorithms for QoS path computation and hop-by-hop routing on the Internet", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 2002, no. 10(4), pp. 541–550
12. Gurney A.J.T. "Construction and verification of routing algebras", diss., University of Cambridge, 2010.
13. Sobrinho J.L., Griffin T.G. "Routing in equilibrium", *Math. Theory Netw. Syst.*, 2010
14. Griffin T.G., Sobrinho J.L. Metarouting, *Proc. of the 2005 Conference on Applications, Technologies, Architectures, and Protocols for Computer Communications*, 2005.
15. Gondran M., Minoux M. "Graphs, dioids and semirings: new models and algorithms", Springer, New York, 2008, vol. 41, <https://doi.org/10.1007/978-0-387-75450-5>
16. Baras J.S., Theodorakopoulos G. "Path problems in networks", *Synth. Lect. Commun. Netw.*, 2010, no. 3(1), pp. 1–77.
17. Griffin T.G., Gurney A.J.T. "Increasing bisemigroups and algebraic routing", *RelMiCS. LNCS*, 2008, vol. 4988, pp. 123–137. https://doi.org/10.1007/978-3-540-78913-0_11
18. Dijkstra E.W., Scholten C.S. "Termination detection for diusing computations", *Inf. Process. Lett.*, 1980, no. 11(1), pp. 1–4.
19. Jae J., Moss F. "A responsive distributed routing algorithm for computer networks", *IEEE Trans. Commun.*, 1982, no. 30(7), pp. 1758–1762.
20. Gouda M.G., Schneider M. "Maximizable routing metrics", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 2003, no. 11(4), pp. 663–675. <https://doi.org/10.1109/TNET.2003.815294>
21. Dyerowicz S., Griffin T.G. "On the forwarding paths produced by internet routing algorithms", *21st IEEE Int. Conf. on Network Protocols (ICNP)*, 2013
22. Sobrinho J.L. "Correctness of routing vector protocols as a property of network cycles", *IEEE/ACM Trans. Netw.*, 2017, no. 25(1), pp. 150–163. <https://doi.org/10.1109/TNET.2016.2567600>
23. Saad M. "Non-isotonic routing metrics solvable to optimality via shortest path", *Comput. Netw.*, 2018, no. 145, pp. 89–95.
24. Griffin T. "An Algebraic approach to internet routing", *Lecture Notes*, University of Cambridge, 2010.
25. Mohri M. "Semiring frameworks and algorithms for shortest-distance problems", *J. Autom. Lang. Comb.*, 2002, no. 7(3), pp. 321–350.
26. Malkin G. "RFC 2453: RIP Version 2", 1998.
27. Rekhter Y., Li T., Hares S. "RFC 4271: A border gateway protocol 4 (BGP-4)", 2006.

Submitted 10.01.2022; revised 16.02.2022

Information about the authors

Khayou Hussein, graduate student, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: hussein.khayou@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9790-5871>

Margarita A. Orlova, Assistant, Engineer, Administrator at Cisco Academy MPEI Training Centre, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: RudenkovaMA@mpei.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8214-4117>

Leonid I. Abrosimov, The corresponding member of the International Information Academy, Dr. Sc. (Technical), Professor, National Research University "Moscow Power Engineering Institute" (14 Krasnokazarmennaya str., Moscow 111250, Russia), e-mail: AbrosimovLI@mpei.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-6171-8559>

МЕТОД ПОВТОРНОГО ПРИМЕНЕНИЯ И ОБМЕНА ОПЫТОМ ПРИ КОЛЛЕКТИВНОМ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫХ АГЕНТОВ

Ю.В. Дубенко

Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар, Россия

Аннотация: определены проблемы обмена и воспроизведения опыта, сгенерированного различными агентами, в задаче многоагентного обучения с подкреплением. Кратко рассмотрены другие работы автора статьи в области многоагентного обучения с подкреплением многоагентных систем, а также выводы из этих работ. Определено, что к числу проблем многоагентного обучения с подкреплением относятся проблемы обмена и воспроизведения опыта, сгенерированного различными агентами. Рассмотрена централизованная многоагентная система, основанная на принципах обучения с подкреплением. Описаны виды агентов, которые включает данная система: агент-менеджер, обладающий мощным аппаратным обеспечением, осуществляющий управление группой агентов в рамках реализации обучения с подкреплением для централизованных многоагентных систем, и агент-подчинённый, предназначенный для непосредственного решения практических задач. Приведён стандартный алгоритм обмена опытом между агентами. Предложены решения проблемы приоритета применения опыта, полученного при решении задач различных типов, и проблемы адаптации и применения опыта, формализованного в виде макродействий. Показано, что применение макродействий может обеспечить меньшее время достижения состояния поставленной задачи - выхода агентами из лабиринта, по сравнению со стандартными алгоритмами. Разработана компьютерная модель в среде Unity для проверки эффективности предложенного метода повторного применения имеющегося опыта решения задач, формализованного в виде макродействий, приведены результаты применения этой модели. Представлен подход к «классификации опыта» для интеллектуальных агентов, согласно которому опыт интеллектуального агента может быть разделен на две группы – «элементарный опыт» и «ситуативный опыт»

Ключевые слова: иерархическое обучение с подкреплением, интеллектуальный агент, многоагентные системы, элементарный опыт, ситуативный опыт

Введение

Существует широкий спектр задач, для решения которых применяются многоагентные системы. Для большинства из них цели применения заключаются либо в добыче данных о внешней среде, либо в поддержании ее состояния в заданных пределах. Однако основные принципы и проблемы управления многоагентными системами во всех случаях остаются одинаковыми и заключаются в реализации поведенческих стратегий агентов. Среди решений, применяемых для реализации задач, могут быть отмечены методы, основанные на искусственных нейронных сетях, нечеткой логике, на деревьях решений, на графах. Однако их реализация существенно усложняется в условиях нестационарной, нечетко определенной внешней среды. Для большинства из перечисленных методов характерно применение обучения с учителем. Из этого следует необходимость в фиксации условий возникновения всех ситуаций, которые могут возникнуть в процессе функционирования интеллектуального агента, что практически невозможно, учи-

тывая обозначенные характеристики внешней среды. При этом можно составить перечень из ситуаций, возникновение которых наиболее вероятно. Однако такой подход сделает агента беспомощным в случае наступления событий, не вошедших в данный перечень, что может повлечь повреждение или даже гибель агента. При этом применение методов обучения без учителя также требует наличия некоторой выборки данных, которая будет использована для обучения. В качестве решения данной проблемы могли бы быть использованы методы, для которых в качестве учителя выступает непосредственно внешняя среда. Подобный подход получил название обучение с подкреплением. Подробно проблемы обучения с подкреплением рассматриваются в [1] и [2].

Подробный анализ данной предметной области был проведен ранее в следующих наших работах:

- в статье [3] выполнен анализ проблем многоагентного обучения с подкреплением, предложены пути их решения;

- в статье [4] рассмотрены основные проблемы иерархического обучения с подкреплением (основано на применении макродействий);

- в статье [5] 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 [3-5], определено, что к числу проблем многоагентного обучения с подкреплением относятся проблемы обмена и воспроизведения опыта, сгенерированного различными агентами, а именно:

- проблема приоритета применения опыта, полученного при решении задач различных типов;
- проблема адаптации и применения опыта, формализованного в виде макродействий.

Материалы и методы

В статье рассматривается централизованная многоагентная система, описанная в [6], основанная на принципах обучения с подкреплением, включающая агентов следующих типов: агент-менеджер, агент-подчиненный:

1) Агент-менеджер – агент, обладающий, как правило, мощным аппаратным обеспечением (вычислительная и коммуникационная система, память), осуществляющий управление группой агентов в рамках реализации обучения с подкреплением для централизованных многоагентных систем. Выполняет следующие функции:

- декомпозиция задачи, полученной от ЛПР или агента-менеджера более высокого уровня иерархии, на отдельные подзадачи, включая формирование карт состояний и подкреплений, выбор стратегии взаимодействия между агентами (кооперация, конкуренция);
- распределение подзадач между агентами-подчиненными (т.е. агент-менеджер учится правильно распределять подзадачи между агентами-подчиненными);
- адаптация опыта других агентов-менеджеров и анализ собственного, используя методы обмена опытом между агентами и его повторного применения, а также метод сегментации макродействий;
- аккумуляция и анализ опыта, полученного агентами-подчиненными, включая сегментацию макродействий путем применения разработанного метода;
- распределение опыта между остальными агентами группы, при этом порядок рассылки устанавливается в зависимости от степени заинтересованности в нем конкретных агентов-

подчиненных (например, агенты, решающие в данный момент времени схожую задачу, получают опыт в первую очередь);

- аккумуляция и обработка визуальной информации, полученной от агентов (трехмерная реконструкция окружающей среды, интеллектуальный анализ трехмерных сцен);

- анализ результатов выполнения поставленных подзадач агентами-подчиненными, назначение им подкреплений.

2) Агент-подчиненный – агент, предназначенный для непосредственного решения практических задач (в т.ч. требующих специфического оборудования), выполняющий функции:

- в зависимости от степени централизации многоагентной системы: выполнение подзадачи, назначенной агентом-менеджером;
- сбор визуальных данных об окружающей среде и передача их агенту-менеджеру;
- выполнение трехмерной реконструкции окружающей среды, интеллектуального анализа трехмерных сцен, если это позволяют аппаратные характеристики агента;
- адаптация опыта, полученного другими агентами, транслированного агентом-менеджером;
- передача собственного опыта агенту-менеджеру для анализа и трансляции другим агентам.

При этом *стандартный алгоритм* обмена опытом между агентами α и β предполагает наличие следующих этапов [6]:

1. Формирование агентом α кортежа опыта в следующем формате:

$$\langle \Phi, \varepsilon, T, C, \tau \rangle_{\alpha}, \quad (1)$$

где $\Phi = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{\varphi_N}\}$ – множество типов выполняемых действий, для которых применим этот опыт, $\varphi_N \in \mathbb{N}$; $\varepsilon = \{\varepsilon_s, \varepsilon_r\}$ – тип опыта (ε_s – ситуативный, ε_r – рефлексивный); T – описание задачи (подзадачи), во время решения которой был получен указанный опыт;

$C = \{C_m, C_s\}$ – тип (или класс) агента, C_m – агент-менеджер, C_s – агент-подчиненный; τ – траектория, которая привела к достижению агентом α некоторого целевого состояния S_{target} , при этом агент, находясь в момент времени t ($t = \overline{1, \tau_N}$, $\tau_N \in \mathbb{N}$) в состоянии S_t , выполнил действие A_t и перешел в состояние S_{t+1} , за что получил подкрепление r_t :

$$\tau = \{\langle S_1, A_1, r_1 \rangle, \langle S_2, A_2, r_2 \rangle, \dots, \langle S_{\tau_N}, A_{\tau_N}, r_{\tau_N} \rangle\}. \quad (2)$$

При этом под типом выполняемых действий φ понимается набор некоторых опера-

ций o_i , выполнение которых допускается при наличии у агента тех или иных аппаратных составляющих e_j , например, если тип выполняемых действий – «перемещение по лестнице» – то робот должен обладать шагающей транспортной платформой, таким образом, $\forall \varphi \exists \{o_i\} \wedge \{e_j\}$, где $o_i = \overline{1, o_N}$, $e_j = \overline{1, e_N}$, $o_N \in \mathbb{N}$, $e_N \in \mathbb{N}$.

2. Пересылка кортежа опыта (1) агенту β .

3. Получение агентом β кортежа опыта (1) и оценка его применимости (допустимо ли применение данного опыта для агента β с точки зрения его аппаратных характеристик и типа, а также принесет ли его применение выигрыш агенту β).

4. Запись кортежа (1) в буфер опыта агента β :

$$B_\beta = \{E_t^\alpha\},$$

где E_t^α – кортежи опыта (1), α – агент, от которого получен кортеж опыта, t – момент времени, в который был получен кортеж опыта, $t = \overline{1, \tau_N}$, $\tau_N \in \mathbb{N}$.

5. Адаптация и применение агентом β полученного опыта (за исключением макродействий).

Классификация опыта. Приоритет применения ситуативного и рефлекторного опыта

Для решения проблемы приоритета применения опыта, полученного при решении задач различных типов, предлагается использовать методику, рассматриваемую в данном подразделе.

По характеру применения опыт, получаемый агентами, может быть классифицирован следующим образом:

- «Элементарный (рефлекторный) опыт», связанный с обучением действиям, связанным с обеспечением безопасности агента (с целью недопущения его повреждения или выхода из строя).

- «Ситуативный опыт», получаемый во время решения задач, поставленных «агентом-менеджером» или централизованной системой управления.

Пусть α_i – некоторый агент, $\alpha_i \in G$, где $G = \{\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_{G_N}\}$ – некоторая группа агентов, $i = \overline{1, G_N}$, $G_N \in \mathbb{N}$, $A_N \in \mathbb{N}$;

$\alpha_i \in c: c \in \Phi_c = \{\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_{\Phi_N}\}$, где c – класс, к которому принадлежит агент α_i , Φ_c – множество типов действий, доступных для

выполнения агенту, принадлежащему к классу c , $\Phi_N \in \mathbb{N}$;

$O = \{O_1, O_2, \dots, O_{O_N}\}$ – множество действий, доступных для выполнения агентом

$$\alpha_i, O_{j_1} \in A \vee O_{j_1} \in M, j_1 = \overline{1, O_N}, O_N \in \mathbb{N}, \quad (3)$$

где A – множество примитивных действий, доступных для агента α_i ,

$$A = \{A_1, A_2, \dots, A_{A_N} | \forall A_{j_2} \in \varphi_{j_2} \wedge \varphi_{j_2} \in \Phi_c\}, \quad (4)$$

где $j_2 = \overline{1, A_N}$, $A_N \in \mathbb{N}$,

M – множество макродействий, доступных для агента α_i ,

$$M = \{M_1, M_2, \dots, M_{M_N} | \forall M_{j_3} = \{A_{j_4} | \forall A_{j_4} \in A\}\}, \quad (5)$$

где $j_3 = \overline{1, M_N}$, $M_N \in \mathbb{N}$, $j_4 = \overline{1, A_L}$, $A_L \in \mathbb{N}$, $A_L \leq A_N$;

$S = \{S_1, S_2, \dots, S_{S_N}\}$ – множество состояний агента α_i , $S_N \in \mathbb{N}$;

R – множество функций подкреплений (вознаграждений),

$$R = \{R^{rx}, R_{T_1}^{st}, \dots, R_{T_{T_N}}^{st}\}, \quad (6)$$

где R^{rx} – функция расчета подкреплений в рамках решения ситуаций, связанных с обеспечением работоспособности агента α_i , $R_{T_{i_1}}^{st}$ – функции расчета подкреплений при решении агентом α_i некоторых задач T_{i_1} , $i_1 = \overline{1, T_N}$, $T_N \in \mathbb{N}$;

Q – множество Q-таблиц, содержащих опыт агента α_i ,

$$Q = \{Q^{rx}, Q_{T_1}^{st}, \dots, Q_{T_{T_N}}^{st}\}, \quad (7)$$

где Q^{rx} – Q-таблица, содержащая «рефлекторный опыт», $Q_{T_{i_1}}^{st}$ – Q-таблицы, содержащие «ситуативный опыт», набранный в процессе решения некоторых задач T_{i_1} .

Возможны ситуации, когда при достижении агентом α_i некоторого состояния $S'_{i_2} \in S$ в результате выполнения действия O_{j_1} возникает противоречие, когда

$$R^{rx}(S'_{i_2}, O_{j_1}, S_{i_2}) \ll R_{T_{i_1}}^{st}(S'_{i_2}, O_{j_1}, S_{i_2}), \quad (8)$$

где $S_{i_2} \in S$ – состояние, в которое агент α_i осуществил переход из состояния S'_{i_2} путем выполнения действия O_{j_1} , $i_2 = \overline{1, S_N}$. На рис. 1 приводится пример подобной ситуации, при этом $R^{rx} = f(D_l)$, $R_{T_{i_1}}^{st} = f(D_t)$, где D_l – состояние от агента α_i до препятствия, D_t – состояние от агента α_i до целевого состояния $S_{T_{i_1}}^{target}$.

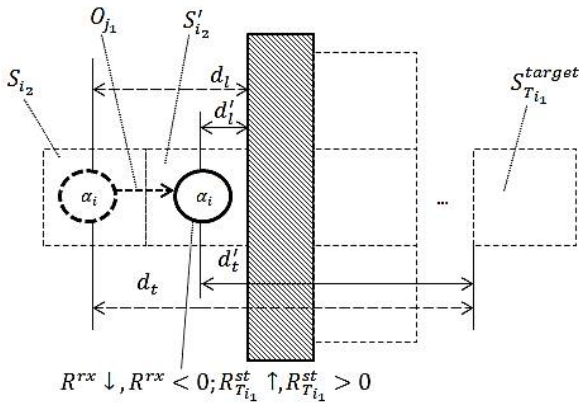


Рис. 1. Пример ситуации, описываемой условием (8)

На рис. 1 параметры D_l и D_t принимают следующие значения:

- $D_l = d_l$, $D_t = d_t$ в случае нахождения агента α_i в состоянии S_{i2} ;
- $D_l = d'_l$, $D_t = d'_t$ в случае нахождения агента α_i в состоянии S'_{i2} .

Таким образом, агент α_i при переходе из состояния S_{i2} в состояние S'_{i2} путем выполнения действия O_{j1} получит следующее подкрепление: $R^{rx} < 0$ (т.к. агент приблизился к препятствию на максимально близкое расстояние), $R^{st}_{T_{i1}} > 0$ (т.к. агент сократил расстояние до целевого состояния $S^{target}_{T_{i1}}$).

Таким образом, возникает необходимость в ранжировании функций, составляющих множество R , в зависимости от некоторой функции приоритета P . Очевидно, что $P(Q^{rx}) \rightarrow \max$, т.к. рефлексивный опыт необходим для обеспечения возможности распознавания таких состояний, переход в которые не несет выигрыша при решении основной задачи (например, если агент уперся в препятствие) либо риск повреждения или потери агента. То есть, в случае возникновения ситуации (8) необходимо учитывать только подкрепление R^{rx} . При этом, если достижение поставленной цели допускается «любой ценой», в т.ч. путем потери или повреждения агентов, тогда приоритетом обладает ситуативный опыт. Однако следует учитывать, что для подобного подхода характерны как дополнительные накладные расходы, так и существенный риск недостижения поставленной цели, поэтому его применение нежелательно и возможно лишь в исключительных случаях.

При определении приоритета P для ситуативного опыта $Q^{st}_{T_{i1}}$ необходимо учитывать, получен ли опыт агентом самостоятельно или

в процессе коллективного взаимодействия с другими агентами.

Рассмотрим пример: пусть $\alpha_{s_1}: \alpha_{s_1} \in G$ и $\alpha_{s_2}: \alpha_{s_2} \in G$ – агенты-подчиненные, принадлежащие к некоторой группе G , $\alpha_m: \alpha_m \in G$ – агент-менеджер группы G . Рассмотрим несколько случаев:

1. Агент α_{s_1} самостоятельно выполняет поставленную задачу T (например, обследование помещения) и на основании функции подкреплений R^{st}_T получает ситуативный опыт, формализованный в Q-таблице $Q^{st}_{T, \alpha_{s_1}}$.

2. Задача T назначена для выполнения децентрализованной группе G . Используя опыт $Q^{st}_{T, \alpha_{s_1}}$, полученный ранее при выполнении задачи T самостоятельно, агент достигает поставленной цели (некоторое состояние S^{target}_T), сформировав при этом траекторию $\tau^{ \alpha_{s_1}}_{dcr_T}$. При этом агент α_{s_2} в рамках решения задачи T достигает состояния S^{target}_T , сформировав траекторию $\tau^{ \alpha_{s_2}}_{dcr_T}$. Для каждой траектории выставлены оценки $p(\tau^{ \alpha_{s_1}}_{dcr_T})$ и $p(\tau^{ \alpha_{s_2}}_{dcr_T})$, вычисленные на основании критериев (время выполнения поставленной задачи, затраченная энергия, оценка финансовых затрат, вероятность достижения поставленной цели), при этом

$$p(\tau^{ \alpha_{s_1}}_{dcr_T}) < p(\tau^{ \alpha_{s_2}}_{dcr_T}) \quad (9)$$

Полученная групповая оценка эффективности принимает значение $p_{dcr}(G)$.

Ситуация (9) возможна в случае, если начальное состояние $S_0^{ \alpha_{s_2}}$ агента α_{s_2} является более выгодным, чем начальное состояние агента α_{s_1} - $S_0^{ \alpha_{s_1}}$.

3. Задача T назначена для выполнения централизованной группе G . Агент-менеджер α_m осуществляет разбиение задачи T на отдельные подзадачи sT_1 и sT_2 , для которых определены функции подкреплений $R^{st}_{sT_1}$ и $R^{st}_{sT_2}$, которые транслирует агентам α_{s_1} и α_{s_2} . При выполнении подзадач sT_1 и sT_2 полученный опыт формализуется в виде Q-таблиц $Q^{st}_{sT_1}$ и $Q^{st}_{sT_2}$. При этом для сформированных траекторий имеют место следующие условия:

$$\tau^{ \alpha_{s_1}}_{cr_T}: \tau^{ \alpha_{s_1}}_{dcr_T} \neq \tau^{ \alpha_{s_1}}_{cr_T} \wedge p(\tau^{ \alpha_{s_1}}_{dcr_T}) < p(\tau^{ \alpha_{s_1}}_{cr_T}), \quad (10)$$

$$\tau^{ \alpha_{s_2}}_{cr_T}: \tau^{ \alpha_{s_2}}_{dcr_T} \neq \tau^{ \alpha_{s_2}}_{cr_T} \wedge p(\tau^{ \alpha_{s_2}}_{dcr_T}) < p(\tau^{ \alpha_{s_2}}_{cr_T}). \quad (11)$$

Полученная групповая оценка эффективности принимает значение

$$p_{cr}(G): p_{cr}(G) > p_{dcr}(G). \quad (12)$$

Таким образом, опыт $Q_{T,\alpha_{s_1}}^{st}$, полученный агентом α_{s_1} во время самостоятельного выполнения задачи T , при групповых действиях может оказаться применимым лишь в том случае, если возможна его адаптация для выполнения подзадачи sT_1 . Следовательно,

$$P(Q^{rx}) > P(Q_{sT_1}^{st}) > P(Q_{T,\alpha_{s_1}}^{st}). \quad (13)$$

Метод повторного применения имеющегося опыта решения задач, формализованного в виде макродействий

Для решения проблемы адаптации и применения опыта, формализованного в виде макродействий, предлагается использовать метод, рассматриваемый далее.

Под примитивным действием понимается действие, удовлетворяющее условию

$$u \neq \bigcup_{\gamma \in G} U_\gamma, \quad (14)$$

где G – некоторое множество индексов, U_γ – возможные блоки или части u . При этом для макродействий условие (14) не выполняется, следовательно $m = \bigcup_{\gamma \in G} U_\gamma$, $U_\gamma: U_\gamma = \{a\} \vee U_\gamma = \{u_1, u_2\} \vee \dots \vee U_\gamma = \{u_1, u_2, \dots, u_W\}$.

Таким образом, макродействие представляет собой некоторую последовательность связанных между собой примитивных действий, выполнение которой ведет к решению конкретной задачи. При этом для сегментации (выделения) макродействий может быть использован метод, описанный в [3].

Пусть $M_{ACS} = \{\mu_1, \dots, \mu_N\}$ – множество макродействий, хранящихся в буфере памяти B_{ACS} централизованной АСУ, сформированных множеством интеллектуальных агентов в результате как одиночного функционирования, так и группового взаимодействия. Для каждого макродействия $\mu_i \in M_{ACS}$ определены следующие множества: $S_{Init}^{\mu_i}$ – множество инициализации макродействия μ_i ; Q^{μ_i} – Q-таблица макродействия μ_i , содержащая кортежи

$$\langle S, A, S', Q | S \in S_{Init}^{\mu_i} \wedge (S' \in S_{Init}^{\mu_i} \vee S' \in S_{Target}^{\mu_i}) \rangle, \quad (15)$$

где Q – значение Q-функции, полученное за выполнение перехода $S \rightarrow S'$ с помощью действия A ; $S_{Target}^{\mu_i}$ – множество терминальных (целевых) состояний макродействия μ_i .

Пусть агенту $\alpha_i \in G$ (G – некоторая группа агентов) поставлена задача

$$T = \langle Td, Ta, Rq \rangle, \quad (16)$$

где

$$\forall S_i \in S^T: Td \subset S_i, \quad (17)$$

где S^T – некоторое множество состояний, удовлетворяющих условию (17), являющихся целевыми для задачи T . При этом агент α_i в текущий момент времени t находится в состоянии $S_{\alpha_i}^t$. Соответственно, выполнение задачи T предполагает прохождение траектории

$$S_{\alpha_i}^t \rightarrow S_{\alpha_i}^{t+1} \rightarrow \dots \rightarrow S_{\alpha_i}^{\tau-1} \rightarrow S_{\alpha_i}^{\tau} \in S^T \quad (18)$$

на временном интервале $[t, \tau]$, где $S_{\alpha_i}^t$ – начальное состояние агента α_i , $S_{\alpha_i}^{t+1}, \dots, S_{\alpha_i}^{\tau-1}$ – множество промежуточных состояний, $S_{\alpha_i}^{\tau}$ – целевое состояние. Возможны следующие подходы к формированию траектории (18):

1. Выполнение переходов $S \rightarrow S'$ путем выполнения примитивных действий A с учетом значения Q-функции для множества $\langle S, A, S' \rangle$. В случае, если задача T ранее не решалась, достижение состояний $S_{\alpha_i}^{\tau} \in S^T$ возможно путем построения таблицы опыта $Q_{\alpha_i}^T$ с нуля, т.к. имеющийся ситуативный опыт, полученный для решения иных задач, в данном случае неприменим.

2. Адаптация опыта Q^{T_k} , полученного при решении иных задач T_k , $k = 1, \dots, N$. Далее данный подход рассматривается более подробно.

Как уже ранее отмечалось, M_{ACS} – это множество макродействий, сформированных агентами α_i при выполнении задач T_k . Для некоторого множества макродействий $M = \{\mu_a, \mu_b, \mu_c\}$ может быть построен граф переходов в случае выполнения следующего условия:

$$\begin{aligned} & (S_{Target}^{\mu_a} \subset S_{Init}^{\mu_b} \vee S_{Target}^{\mu_a} \subset S_{Init}^{\mu_c}) \wedge \\ & (S_{Target}^{\mu_b} \subset S_{Init}^{\mu_a} \vee S_{Target}^{\mu_b} \subset S_{Init}^{\mu_c}) \wedge \\ & (S_{Target}^{\mu_c} \subset S_{Init}^{\mu_a} \vee S_{Target}^{\mu_c} \subset S_{Init}^{\mu_b}). \end{aligned} \quad (19)$$

Пример графа переходов для множества M приводится на рис. 2.

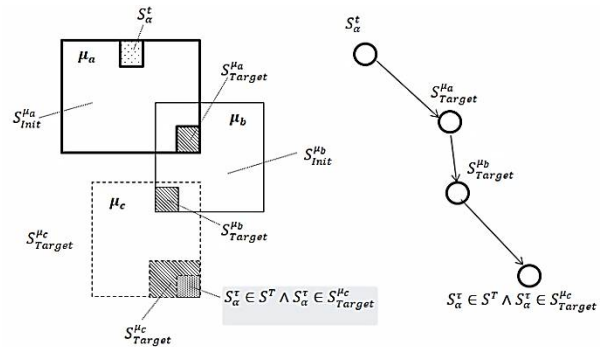


Рис. 2. Граф переходов для множества макродействий $M = \{\mu_a, \mu_b, \mu_c\}$

На рис. 2 представлены следующие условные обозначения:

- S_α^t – текущее состояние агента α ;
- $S_{Init}^{\mu_a}, S_{Init}^{\mu_b}, S_{Init}^{\mu_c}$ – множества инициализации макродействий μ_a, μ_b, μ_c ;
- $S_{Target}^{\mu_a}, S_{Target}^{\mu_b}, S_{Target}^{\mu_c}$ – множества терминальных состояний макродействий μ_a, μ_b, μ_c ;
- S_α^t – целевое состояние задачи T , $S_\alpha^t \in S^T$, где S^T – множество целевых состояний задачи T .

Таким образом, достижение состояний $S_{\alpha_i}^t \in S^T$ возможно путем последовательного выполнения макродействий $\mu_j \in M_{ACS}$, для которых выполняется условие:

$$\forall \langle \mu_j, \mu_k | \mu_j \neq \mu_k \rangle: S_{Target}^{\mu_j} \in S_{Init}^{\mu_k}. \quad (20)$$

Описанная ситуация применима для случая, когда $S_{\alpha_i}^t \in S_{Target}^{\mu_j} \wedge S_{\alpha_i}^t \in S^T$. В случаях, когда

$$S_{\alpha_i}^t \notin S_{Target}^{\mu_j}, \quad (21)$$

то возможно формирование цепочки макродействий

$$\mu_t \rightarrow \dots \rightarrow \mu_{\tau-\varepsilon} | d(S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}} \in S_{Target}^{\mu_{\tau-\varepsilon}}, S_k^T \in S^T) \leq \gamma, \quad (22)$$

где $d(S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}} \in S_{Target}^{\mu_{\tau-\varepsilon}}, S_k^T \in S^T)$ – расстояние между состояниями

$$\langle S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}}, S_k^T \rangle: d(S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}}, S_k^T) \rightarrow \min \forall S_i^{\mu_{\tau-\varepsilon}} \in S_{Target}^{\mu_{\tau-\varepsilon}} \wedge \forall S_j^T \in S^T, \quad (23)$$

которое в дальнейшем будет обозначаться как d_* ; $\gamma \in \mathbb{R}$. Соответственно, оставшийся путь $S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}} \rightarrow S_{\tau-\beta} \rightarrow \dots \rightarrow S_{\tau-\alpha} \rightarrow S_\tau^T = S_k^T$, где $\tau - \alpha > \tau - \beta$, формируется путем реализации примитивных действий A_i , в результате выполнения которых осуществляются переходы $\langle S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}}, A_{\tau-\varepsilon}, S_{\tau-\beta} \rangle, \dots, \langle S_{\tau-\alpha}, A_{\tau-\alpha}, S_\tau^T \rangle$. Рассматриваемая ситуация иллюстрируется на рис. 3.

На рис. 3 представлены следующие условные обозначения:

- S_t – текущее состояние агента α (в момент получения задачи T);
- $\mu_t, \mu_{t+\omega}, \mu_{\tau-\varepsilon}$ – макродействия, вызванные на временных интервалах $t, t + \omega, \tau - \varepsilon$;
- $S^{\mu_t} \in S_{Target}^{\mu_t}, S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}} \in S_{Target}^{\mu_{\tau-\varepsilon}}$ – терминальные состояния макродействий $\mu_t, \mu_{\tau-\varepsilon}$;
- $A_{\tau-\theta}, A_{\tau-\alpha}$ – примитивные действия, выполняемые для достижения целевого состояния $S_\tau^T \in S^T$;

- $S_{\tau-\theta}$ – состояние, в которое осуществляется переход из состояния $S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}}$ путем выполнения примитивного действия $A_{\tau-\theta}$;
- $S_{\tau-\beta}$ – одно из промежуточных состояний на траектории $S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}} \rightarrow S_{\tau-\theta} \rightarrow \dots \rightarrow S_{\tau-\beta} \rightarrow S_\tau^T$;
- $S_\tau^T \in S^T$ – целевое состояние задачи T ;
- d_* – расстояние между состояниями $S_j^{\mu_{\tau-\varepsilon}}, S_\tau^T$.

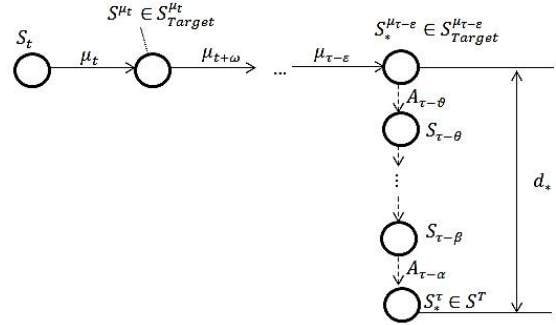


Рис. 3. Построение пути от терминального состояния макродействия до целевого состояния задачи T

Ситуация, представленная на рис. 3, возможна и для промежуточных состояний траектории (18), возможный алгоритм действий в данной ситуации выглядит следующим образом:

1. Идентификация текущего состояния. Пусть $S_i^{\mu_{t+\omega}}$ – состояние, в котором оказался агент α в момент времени $t + \omega$, $S_i^{\mu_{t+\omega}} \in S_{Target}^{\mu_{t+\omega}}$, где t – момент времени, в который агент α начал выполнение задачи T , предполагающей достижение состояния $S_j^T \in S^T$, $S_{Target}^{\mu_{t+\omega}}$ – множество терминальных состояний макродействия $\mu_{t+\omega}$ (активировано в момент времени $t + \omega$), S^T – множество целевых состояний задачи T . При этом $S_i^{\mu_{t+\omega}} \notin S_{Init}^{\mu} \forall \mu$, т.е. из состояния $S_i^{\mu_{t+\omega}}$ не может быть запущено ни одно макродействие.

2. Формирование множества макродействий, доступных для активации в текущем состоянии. Определяется окрестность $O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}}$ с радиусом $r_{O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}}}$ с центром в состоянии $S_i^{\mu_{t+\omega}}$.

Формируется множество

$$M_{S_i^{\mu_{t+\omega}}} = \{ \mu_k | \mu_k: S_j \in O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}} \wedge S_j \in S_{Init}^{\mu_k} \}, \quad (24)$$

если для окрестности $O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}}$ множество

$$M_{S_i^{\mu_{t+\omega}}} = \emptyset, \quad (25)$$

то

$$r_{O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}}} = r_{O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}}} + \delta, \quad (26)$$

т.е. радиус окрестности увеличивается на величину $\delta \in \mathbb{R}$, при этом в случае выполнения условия (25) операция (26) будет осуществляться до тех пор, пока $r_{O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}}} < \varepsilon$, где $\varepsilon \in \mathbb{R}$.

Если множество $M_{S_i^{\mu_{t+\omega}}} = \emptyset$ и в случае, когда $r_{O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}}} = \varepsilon$, то достижение целевого состояния задачи T осуществляется путем выполнения множества примитивных действий

$$A = \{A_1, \dots, A_N | A_1 \in \langle S_i^{\mu_{t+\omega}}, A_1, S^{t+\varphi} \rangle, \dots, A_N \in \langle S^{t-1}, A_N, S^t \in S^T \rangle, t + \omega < t + \varphi\}. \quad (27)$$

3. Поиск «ближайшего» макродействия. В случае если $M_{S_i^{\mu_{t+\omega}}} \neq \emptyset$, то для активации выбирается макродействие

$$\mu: d_* \rightarrow \min \wedge d(S_i^{\mu_{t+\omega}}, S_j \in S_{init}^\mu) \rightarrow \min, \quad (28)$$

где d_* - расстояние между состояниями $S_*^{\mu_{t-\varepsilon}}, S_*^t$, $d(S_i^{\mu_{t+\omega}}, S_j \in S_{init}^\mu)$ - расстояние между текущим состоянием $S_i^{\mu_{t+\omega}}$ и множеством состояний S_{init}^μ , в которых может быть выполнена инициализация макродействия μ .

4. Формирование цепочки примитивных действий для достижения состояния $S_j \in S_{init}^\mu$, в котором может быть осуществлена активация макродействия μ . Агент осуществляет переход от состояния $S_i^{\mu_{t+\omega}}$ к состоянию

$$S_k: S_k \in S_{init}^\mu \wedge d(S_i^{\mu_{t+\omega}}, S_k) \rightarrow \min, \quad (29)$$

путем выполнения множества примитивных действий

$$A = \{A_1, \dots, A_N | A_1 \in \langle S_i^{\mu_{t+\omega}}, A_1, S^{t+\varphi} \rangle, \dots, A_N \in \langle S^{t+\rho}, A_N, S_k \rangle, t + \omega < t + \varphi < t + \rho\}. \quad (30)$$

Итоговый алгоритм построения множества макродействий, выполнение которых позволяет достичь целевого состояния $S_k^T \in S^T$, представлен на рис. 4 и 5. На рис. 4 состояние $S_i^{\mu_{t+\omega}}$ обозначено как S_α , окрестность $O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}}$ и радиус $r_{O_{S_i^{\mu_{t+\omega}}}}$ обозначены как O и r соответственно.

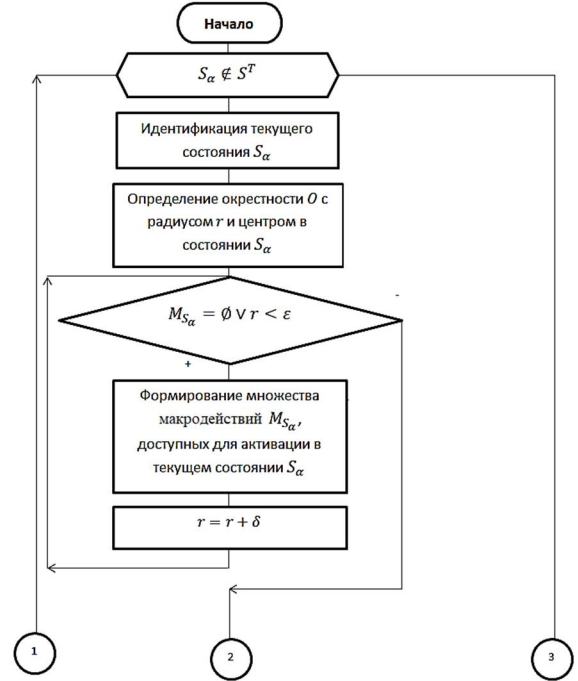


Рис. 4. Начало алгоритма применения уже имеющегося опыта решения иных задач, формализованного в виде макродействий, для решения текущей задачи T

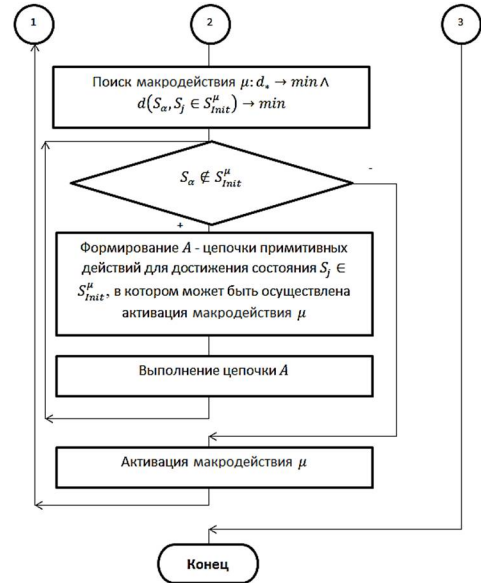


Рис. 5. Окончание алгоритма применения уже имеющегося опыта решения иных задач, формализованного в виде макродействий, для решения текущей задачи T

После достижения целевого состояния $S_k^T \in S^T$ сформированная траектория

$$\tau_T = \{S_t, D_t, S_{t+1}, \dots, S_{t-1}, D_{t-1}, S_k^T \in S^T\}, \quad (31)$$

транслируется в буфер памяти агента-менеджера, где $D \in \{A, \mu\}$, A - примитивное действие, μ - макродействие.

Применение макродействий может обеспечить меньшее время достижения целевого состояния поставленной задачи в сравнении с решением ее «с нуля». В то же время нет гарантии, что сформированная траектория будет достаточно близка к оптимальной. В этой связи возможна реализация макродействий, основанных на применении состояний, включающих морфологическое описание пространства. На практике применение данного принципа заключается в следующем:

- пусть S_0 – некоторое начальное состояние, $S_0 \in I$, S_{target} – некоторое целевое состояние,

$$S_{target} : \beta(S_{target}) \sim 1, \quad (32)$$

где I – множество инициализации, β – условие завершения некоторого макродействия m ;

- $S_0 \in S$, $S_{target} \in S$, где $S = \{S_i\}$ – некоторое множество состояний

$$S_i : \forall S_i \exists subS_i^j = \langle obj, rel \rangle,$$

где $subS_i^j$ – некоторое подсостояние состояния S_i , $subS_i^j \subset S_i$, obj – некоторый элемент окружающей среды, rel – связь элемента obj и агента α , $i = \overline{1, S_N}$, $S_N \in \mathbb{N}$, $j = \overline{1, subS_i^N}$, $subS_i^N \in \mathbb{N}$;

- целевое состояние некоторой подзадачи $subT$:

$$S_{target} \in Vis(\alpha) \wedge subS_{target} = subS_{subT}^{Target}, \quad (33)$$

где $Vis(\alpha)$ – область видимости агента α , $subS_{subT}^{Target} \in S_{subT}^{Target}$.

В случае выполнения указанных выше условий макродействие m может быть преобразовано в макродействие m' с помощью некоторой функции $f: m \rightarrow m'$. На практике функция f , например, может выполнять растяжение области I пропорционально расстоянию между S_0 и S_{target} .

Результаты

Проверка эффективности предложенного метода повторного применения имеющегося опыта решения задач, формализованного в виде макродействий, проводилась на примере решения задачи поиска интеллектуальными агентами выхода из лабиринта. Для сравнения был взят алгоритм обучения с подкреплением для централизованных многоагентных систем [6]. 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). Пример применяемой карты размерности 15x15 представлен на рис. 6.



Рис. 6. Применяемая карта размерности 15 × 15

В разработанном Unity-приложении также есть возможность получить вид от лица агента (рис. 7).

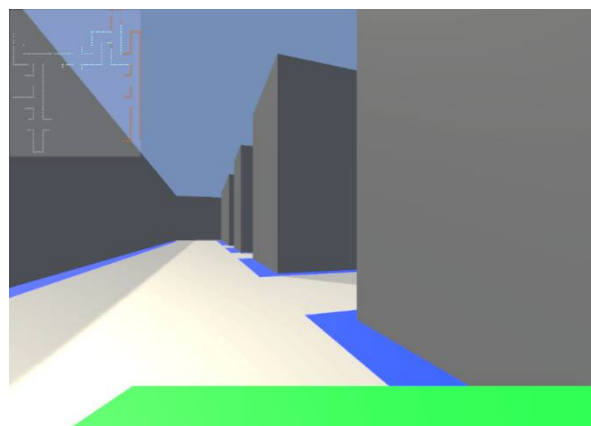


Рис. 7. Вид от лица агента

На рис. 7 также выделены границы препятствий, уже попадавших в область видимости агента.

Результаты, полученные в ходе выполнения эксперимента, иллюстрирует рис. 8, на котором представлена зависимость времени выхода трех агентов из лабиринта от номера итерации (попытки) для карты 75x75.

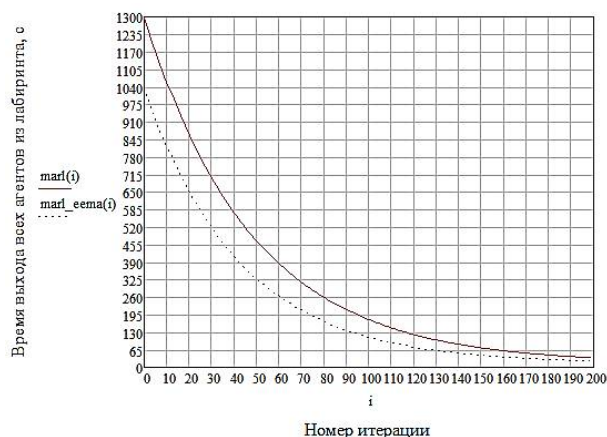


Рис. 8. Результаты эксперимента, проводимого для карты 75x75 и трех агентов

На рис. 8 приняты следующие условные обозначения: marl - алгоритм обучения с подкреплением для централизованных много-агентных систем [6], marl-eema – алгоритм обучения с подкреплением для централизованных многоагентных систем, в котором применялся предложенный метод повторного применения имеющегося опыта решения задач, формализованного в виде макродействий.

Как видно на рис. 8, уже к 50-й итерации многоагентная система, действующая согласно marl-eema, достигает результата в 325 с., при этом стандартный алгоритм marl достиг данного показателя по критерию времени лишь к 70- итерации. Преимущество marl-eema также сохраняется и к 100-й итерации (110 с. против 170 с., достигнутых marl). Показатели рассматриваемых алгоритмов сравнивались по критерию времени лишь 200-й итерации.

Полученные экспериментальные результаты свидетельствует о целесообразности применения разработанного метода обмена опытом в рамках алгоритмов многоагентного обучения с подкреплением [6].

Обсуждение

Таким образом, под классификацией опыта интеллектуального агента обозначим подход, согласно которому опыт интеллектуального агента может быть разделен на две основные группы – элементарный и ситуативный. При этом элементарный опыт является

базовым для агентов вне зависимости от конкретных практических задач, решаемых ими, т.к. предназначен для обеспечения их взаимодействия с окружающей средой с целью сохранения их целостности и работоспособности (например, опыт обхода препятствий относится к элементарному). Элементарный опыт обладает приоритетом по отношению к ситуативному опыту (опыт решения конкретных практических задач, например, поиск выхода из лабиринта) и занимает верхний уровень иерархии при такой классификации.

Как отмечалось выше, элементарный опыт является базовым для агента и предназначен для обработки ситуаций, в которых существует риск его повреждения или выхода из строя. Следовательно, опыт данного типа должен быть «врожденным» для агента, т.е. загружаться в его память на этапе сборки. Однако в процессе функционирования агента все же возможны ситуации (при этом вероятность их возникновения должна быть сведена к минимуму), которые не были ранее предусмотрены, т.е. агент не обладает опытом для их обработки. В этом случае агент может получить ущерб, возможно существенный, в результате которого он может выйти из строя, но при этом он может транслировать описание этой непредвиденной ситуации другим агентом, что позволит им избежать подобного сценария. Однако для того, чтобы другие агенты могли сделать правильные выводы из подобной ситуации, выполнить ее анализ, необходим набор специальных методов и алгоритмов, позволяющих одному агенту верно «расшифровать» опыт другого. Применение подобных методов также актуально и в случае с ситуативным опытом.

В известных примерах применения обучения с подкреплением для управления интеллектуальными агентами, как правило, используется множество примитивных действий, таких как «вперед», «назад» и т.д., а также применяется марковская модель (т.е. при выборе действия учитывается только текущее состояние). Пример использования марковской модели приведен в [7]. Подобный подход обладает следующими недостатками:

- низкая переносимость опыта, которая заключается в сложности применения накопленного опыта на разных объектах;
- большое время сходимости;
- сложность обработки ситуаций, когда выбор действия зависит также и от предыдущих состояний агента (не только от текущего).

Применение иерархического обучения с подкреплением (основано на применении макродействий) [8-10] могло бы устранить указанные недостатки, однако отсутствие механизма обмена опытом и адаптации макродействий для повторного применения снижало положительный эффект, который мог бы быть достигнут. Применение предложенного метода повторного применения имеющегося опыта решения задач, формализованного в виде макродействий в рамках алгоритма обучения с подкреплением для многоагентных систем, позволит получить выигрыш от внедрения иерархического обучения с подкреплением в полной мере.

Выводы

В работе представлен подход к «классификации опыта» для интеллектуальных агентов, согласно которому опыт интеллектуального агента может быть разделен на две группы – «элементарный опыт» и «ситуативный опыт». При этом «элементарный опыт» является базовым для агентов вне зависимости от конкретных практических задач, решаемых ими, т.к. предназначен для обеспечения их взаимодействия с окружающей средой с целью сохранения целостности и работоспособности агентов. «Элементарный опыт» обладает приоритетом по отношению к «ситуативному опыту». Также предложен метод повторного применения имеющегося опыта, отличающийся от аналогов возможностью формализации опыта в виде макродействий.

Литература

1. Саттон Р.С., Барто Э.Дж. Обучение с подкреплением: Введение. М.: ДМК Пресс, 2020. 552 с.
2. Рассел С., Норвиг П. Искусственный интеллект. Современный подход: пер. с англ. 2-е изд. М.: Вильямс, 2006. 1408 с.
3. Дубенко Ю.В. Аналитический обзор проблем многоагентного обучения с подкреплением // Вестник компьютерных и информационных технологий. 2020. Т. 17. № 6 (192). С. 48-56.
4. 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.
5. 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.
6. Foerster J.N. Deep multi-agent reinforcement learning [PhD thesis]. University of Oxford. 2018. URL: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:a55621b3-53c0-4e1b-ad1c-92438b57ffa4>
7. Hierarchical Reinforcement Learning for Robot Navigation using the Intelligent Space Concept /L.A. Jeni et al. // 11th Intern. Conf. on Intelligent Engineering Systems. Budapest, Hungary, 2007. P. 149 – 153. DOI: 10.1109/INES.2007.4283689
8. Еремеев А.П., Подохов И.Ю. Обобщенный метод иерархического подкрепленного обучения для интеллектуальных систем поддержки принятия решений // Программные продукты и системы. 2008. № 2. С. 35-39.
9. Ahilan S., Dayan P. Feudal Multi-Agent Hierarchies for Cooperative Reinforcement Learning // Proc. of the Workshop on Structure & Priors in Reinforcement Learning (SPiRL 2019) at ICLR 2019. New Orleans, LA, USA, 2019. May 06. P. 1 – 11.
10. Hierarchical Deep Multiagent Reinforcement Learning with Temporal Abstraction / H. Tang et al. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1809.09332>

Поступила 10.12.2021; принята к публикации 21.02.2022

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: scorpion-cool1@yandex.ru, тел. +7-918-675-4251, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3205-994X>

METHOD OF REUSE AND EXCHANGE OF EXPERIENCE IN THE COLLECTIVE INTERACTION OF INTELLIGENT AGENTS

Yu.V. Dubenko

Kuban State Technological University, Krasnodar, Russia

Abstract: I determined the problems of exchange and reproduction of experience generated by different agents in the problem of multi-agent reinforcement learning. I briefly considered my other works in the field of multi-agent reinforcement learning and multi-agent systems, as well as conclusions from these works. I determined that among the problems of multi-agent reinforcement learning are the problems of exchange and reproduction of experience generated by different agents. Here I considered a centralized multi-agent system based on the principles of reinforcement learning and described the types of agents that this system includes: an agent-manager with powerful hardware that manages a group of agents as part of the im-

plementation of reinforcement learning for centralized multi-agent systems, and a subordinate agent designed to directly solve practical problems. I give a standard algorithm for the exchange of experience between agents and propose solutions to the problem of the priority of applying experience gained in solving problems of various types and the problem of adapting and applying experience formalized in the form of macro-actions. I show that the use of macro-actions can provide a shorter time to reach the state of the task of exiting the labyrinth by agents compared to standard algorithms. I developed a computer model in the Unity environment to test the effectiveness of the proposed method of re-applying the existing experience in solving problems, formalized in the form of macro-actions, and presented the results of applying this model and an approach to the "classification of experience" for intelligent agents, according to which the experience of an intelligent agent can be divided into two groups - "elementary experience" and "situational experience"

Key words: hierarchical reinforcement learning, intelligent agent, multi-agent systems, elementary experience, situational experience

References

1. Sutton R.S., Barto E.J. "Reinforcement learning: an introduction", Moscow: DMK Press, 2020, 552 p.
2. Russel S., Norvig P. "Artificial Intelligence. Modern approach", Moscow: Vil'yams, 2006, 1408 p.
3. 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.
4. 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.
5. 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.
6. Foerster J.N. "Deep multi-agent reinforcement learning", PhD thesis, University of Oxford, 2018, available at: <https://ora.ox.ac.uk/objects/uuid:a55621b3-53c0-4e1b-ad1c-92438b57ffa4>
7. Jeni L.A. et al. "Hierarchical reinforcement learning for robot navigation using the intelligent space concept", *11th Intern. Conf. on Intelligent Engineering Systems*, Budapest, Hungary, 2007, pp. 149-153, DOI: 10.1109/INES.2007.4283689
8. Ereemeev A. P., Podogov I. Yu. "A generalized method of hierarchical reinforced learning for intelligent decision support systems", *Software Products and Systems (Programmnye produkty i sistemy)*, 2008, no. 2, pp. 35-39
9. Ahilan S., Dayan P. "Feudal multi-agent hierarchies for cooperative reinforcement learning", *Proc. of the Workshop on Structure & Priors in Reinforcement Learning (SPiRL 2019) at ICLR 2019*, 2019, New Orleans, LA, USA, pp. 1-11.
10. Tang H. et al. "Hierarchical deep multiagent reinforcement learning with temporal abstraction", 2018, available at: <https://arxiv.org/abs/1809.09332>.

Submitted 10.12.2021; revised 21.02.2022

Information about the author

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

ИНТЕГРАЦИЯ ОСНОВНЫХ СТАТИЧЕСКИХ СТРУКТУР НА ЭТАПЕ ИНФОЛОГИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

О.В. Новоселова, А.С. Сидоров

Московский государственный технологический университет «СТАНКИН», г. Москва, Россия

Аннотация: затронуты проблемы, связанные с разработкой сложных автоматизированных систем. Целью является разработка метода интеграции описаний инфологических структур в виде диаграмм на этапе инфологического моделирования при проектировании автоматизированных систем. Инфологическое модельное представление является проектом автоматизированной системы, которая разрабатывается для решения проектных расчетных задач в вычислительной среде. Этап инфологического моделирования является этапом проектирования автоматизированных систем по методологии автоматизации интеллектуального труда. Инфологическое модельное представление не зависит от платформы реализации автоматизированной системы. Описание инфологического модельного представления включает формы (спецификации) и диаграммы для каждой составляющей: статической, динамической, функциональной и модели в целом. Для выполнения поставленной цели были использованы материалы, описывающие методологию автоматизации интеллектуального труда, а также метод проектирования автоматизированных систем – метод инфологического моделирования. При разработке метода интеграции были исследованы особенности построения диаграмм и формирования спецификаций при создании инфологической структуры, на основе которых определены метод и методика интеграции описаний статических составляющих для моделей-проектов автоматизированных систем, выполняющих расчетные задачи при проектировании объектов машиностроения. Интеграция графических описаний инфологических структур (диаграмм) позволяет сформировать полное представление статической составляющей для сложной автоматизируемой системы на этапе ее проектирования, что способствует устранению дублирования элементов при развитии системы. Необходимо отметить, что правильность формируемого инфологического представления определяет в дальнейшем рациональность организации информации и ее обработки в вычислительной среде

Ключевые слова: автоматизация интеллектуального труда, проектная задача, инфологическая структура, интеграция диаграмм

Введение

Методология автоматизации интеллектуального труда (МАИТ) [1, 2] разработана в России, на кафедре информационных технологий и вычислительных систем в МГТУ «СТАНКИН». МАИТ определяет промышленный способ создания автоматизированных систем и позволяет описывать многоуровневую информационную структуру и сложные формализованные алгоритмы. К такому типу задач относятся расчетные задачи, выполняемые при проектировании технических объектов [3, 4, 5, 6].

Создание автоматизированной системы по МАИТ включает следующие этапы моделирования: начальный, концептуальный, инфологический и даталогический.

Начальное модельное представление описывает действия предметного специалиста, выполняющего решение задачи.

Концептуальное модельное представление определяет структуру понятий предметной области и систему ограничений для автоматизируемой задачи. Инфологическое модельное

представление описывает проект автоматизированной системы (АС), не зависящий от платформы реализации.

Далее в статье будем рассматривать представление предметных задач на этапе инфологического моделирования [1, 7].

Инфологическое модельное представление включает следующий набор составляющих:

- инфологическая структура (статическая составляющая) - отражает состав и структуру статических элементов модели;

- система предметных доступов (динамическая составляющая) – определяет порядок работы с инфологической структурой, связанный с действиями по считыванию и записи атрибутов, необходимых для реализации алгоритма;

- система предметных манипуляций (функциональная составляющая) – показывает алгоритм работы проектируемой системы и наборы атрибутов для каждого действия алгоритма;

- модель в целом определяет взаимосвязь инфологической структуры, систем предметных доступов и манипуляций.

В процессе моделирования описание инфологического модельного представления вы-

полняется в виде диаграмм и спецификаций – для статической составляющей в виде диаграммы инфологической структуры, а также спецификаций Р1 и Р2.

При работе со сложными проектными задачами, в том числе расчетными, сначала декомпозируют комплекс задач на подзадачи. Комплекс и подзадачи фактически являются проектами автоматизированной системы и подсистем, выполняющих работу за специалиста в вычислительной среде. В дальнейшем формируют инфологические модельные представления, отражающие проекты автоматизированной системы и каждой подсистемы. Чтобы получить полное описание автоматизированной системы, выполняют интеграцию описаний подсистем в описание системы [7].

Метод интеграции графических описаний инфологических структур

Общие правила интеграции описаний основных статических структур модельных представлений заключаются в следующем: интеграцию необходимо выполнять для табличного и графического описаний отдельно; интеграция проводится по уровням инфологической структуры; после получения результирующего опи-

сания необходимо выполнить перекодировку элементов.

На этапе проектирования АС интеграция инфологических модельных представлений объектного уровня n -предметной задачи определяется следующим образом [7, 8, 9] (рис. 1):

$$ILP(n) = \bigcup_{i=1}^m ILP_i(n) \quad (1)$$

и включает в себя «совокупность интеграций множеств структурных единиц (2), множеств статических отношений (3), множеств функциональных отношений (4), множеств динамических отношений (5) и отношений, описывающих взаимосвязи статической, функциональной и динамической составляющих (6)» [7].

$$L(n) = \bigcup_{i=1}^m L_i(n). \quad (2)$$

$$DE(n) = \bigcup_{i=1}^m DE_i(n). \quad (3)$$

$$ZJ(n) = \bigcup_{i=1}^m ZJ_i(n). \quad (4)$$

$$QI(n) = \bigcup_{i=1}^m QI_i(n). \quad (5)$$

$$R^{ILP}(n) = \bigcup_{i=1}^m R_i^{ILP}(n). \quad (6)$$

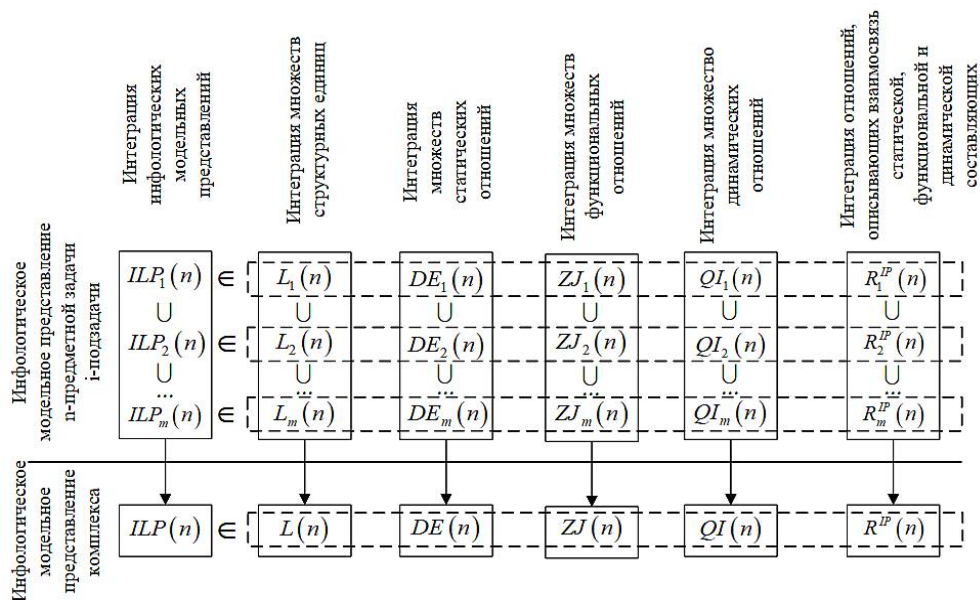


Рис. 1. Структура процедур интеграции инфологических модельных представлений по составляющим

В работе был исследован процесс интеграции инфологических структур, описанных в графическом виде - в виде диаграмм.

Описания и сложной автоматизированной системы, и каждой подсистемы включают инфологическую структуру – проектное пред-

ставление организации информации в вычислительной среде, которая состоит из множества структурных единиц и множества статических отношений. Инфологическая структура организована как многоуровневая конструкция, в со-

ставе которой определены следующие структурные единицы (рис. 2):

- типа «информационный модуль» (ИСЕ типа «ИМ»);
- типа «информационная сущность» (ИСЕ типа «ИС»);
- типа «информационный атрибут» (ИСЕ типа «ИА»).

Каждый уровень (рис. 2) раскрывается набором именованных информационных модулей (модуль является аналогом базы данных), состоящих из совокупности именованных информационных сущностей (сущность является аналогом отношения). Каждая из именованных информационных сущностей включает набор именованных информационных атрибутов [1, 8].

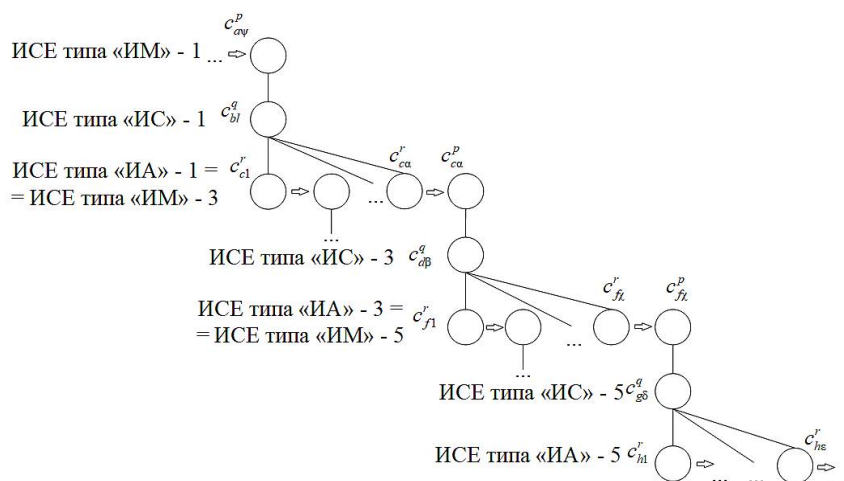


Рис. 2. Инфологическая структура на объектном уровне

Для формирования инфологических структур определяют следующие типы связей: бинарные и тернарные. Связи бинарного типа подразделяются на виды: «состав», «упорядочивание», «компоновка». Каждая тернарная связь представлена тройкой структурных единиц соответствующего уровня или так называемой элементарной схемой структурных единиц. Множество элементарных схем, которые имеют общую пару структурных единиц «ИМ-ИС», образует схему. Между схемами можно определить бинарные связи вида «упорядочивание», «состав», «компоновка». Это является производной инфологической структурой [1, 8].

Интеграция описаний инфологических структур в виде диаграмм осуществляется по уровням, определяемым структурными единицами типа «ИМ», «ИС», «ИА» на 1, 3 и 5 уровнях. Выполнение процесса интеграции инфологических структур начинается с верхнего уровня «ИСЕ – «ИМ-1» и осуществляется по уровням.

Произведем интеграцию диаграмм инфологических (статических) структур $(L2(n), De2(n))$, $(L2(m), De2(m))$. При этом $(L2(m), De2(m))$ – статическая структура под-

системы, интегрируемой в автоматизированную систему с инфологической структурой $(L2(n), De2(n))$ [9]. В результате слияния структур получается новая инфологическая структура $(L2(n)^*, De2(n)^*)$, с единой кодировкой, включающая в себя $(L2(n), De2(n))$, $(L2(m), De2(m))$ (7).

$$\begin{aligned} & \left(L2(n)^*, De2(n)^* \right) = \\ & = \left(L2(n), De2(n) \right) \cup \left(L2(m), De2(m) \right). \end{aligned} \quad (7)$$

Так как выполняем интеграцию (слияние) разных диаграмм инфологических структур, то необходимо ввести индексы, которые будут определять элементы соответствующей инфологической структуры - n , m . Для упрощения описания инфологических структур введём соответствующие обозначения именованных структурных единиц: cn_p^σ – именованная структурная единица n -подзадачи, cm_p^σ cm_p^σ – именованная структурная единица m – подзадачи, где σ – тип структурной единицы (p – информационный модуль, q – информационная сущ-

ность, r – информационный атрибут) и ρ – уровень сложности структурной единицы.

На первом шаге определяется исходная инфологическая структура – диаграмма n -й системы, описывающей комплекс задач, и интегрируемая в нее инфологическая структура – диаграмма m -й подсистемы.

Далее процесс интеграции выполняется на каждом уровне. Алгоритм интеграции на каждом уровне идентичен.

Графическая интерпретация интеграции инфологических структур для уровня структурных единиц типа «Информационный атрибут-1» приведена на рис. 3.

Формальное описание интеграции инфологических структур для уровня структурных единиц типа «Информационный атрибут-1»:

$$\begin{aligned} \text{Если } cn_c^r &= \{cn_{c1}^r, \dots, cn_{ca}^r\}, \\ cm_c^r &= \{cm_{c1}^r, \dots, cm_{c\varphi}^r\}, \text{ то} \\ cn_c^{r*} &= cn_c^r \cup cm_c^r, \end{aligned} \quad (8)$$

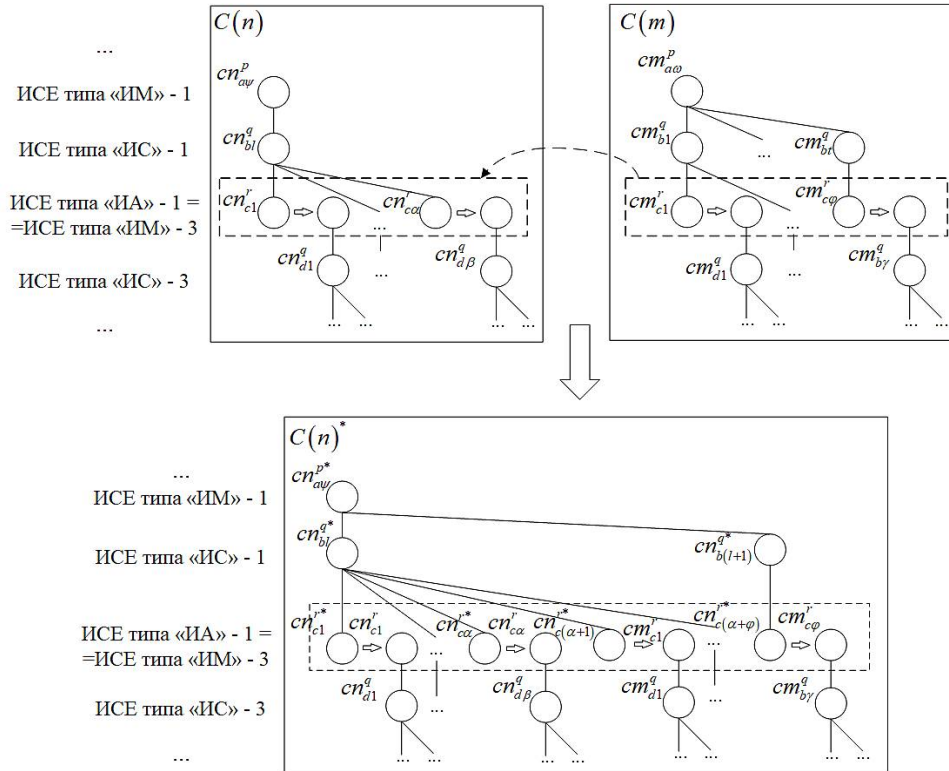


Рис. 3. Графическая интерпретация интеграции структурных единиц инфологических структур на уровне типа «Информационный атрибут-1»

В результате выполнения процесса интеграции на каждом уровне выполняются следующие действия: формируется полный набор структурных единиц для автоматизированной системы, объединяющий структурные единицы исходной и интегрируемой инфологических

то есть $cn_{c1}^r \equiv cn_{c1}^{r*}, \dots, cn_{ca}^r \equiv cn_{ca}^{r*}, cm_{c1}^r \equiv cn_{c(\alpha+1)}^{r*}, \dots, cm_{c\varphi}^r \equiv cn_{c(\alpha+\varphi)}^{r*}$.

При слиянии на данном уровне если ИСЕ типа «Информационный атрибут - 1» семантически одинаковы $cn_{ci}^r \equiv cm_{cj}^r$ и

$$\exists cn_{bl}^{q*} : LC_b^q(n)^* C_c^r(n) = \{(cn_{bl}^{q*}, cn_{ci}^r) | cn_{bl}^{q*} \in C_b^q(n)^*,$$

$$cn_{ci}^r \in C_c^r(n)\}, LC_b^q(n)^* C_c^r(m) = \{(cn_{bl}^{q*}, cm_{cj}^r) |$$

$cn_{bl}^{q*} \in C_b^q(n)^*, cm_{cj}^r \in C_c^r(m)\}$, то в итоговую диаграмму попадет атрибут, принадлежащий исходной диаграмме, - $cn_{ci}^r \rightarrow cn_{ci}^{r*}$, в противном случае в итоговую диаграмму попадают оба атрибута: $cn_{ci}^{r*}, cm_{cj}^{r*}$.

После интеграции диаграмм на уровне типа «Информационный атрибут - 1» осуществляется перекодировка и восстановление связей с уровнем выше - cn_b^{q*} .

Заключение

1. Методология автоматизации интеллектуального труда основывается на когнитивном подходе, семиотическом и его развитии. Она предлагает промышленный способ создания автоматизированных систем. Это позволяет поэтапно формировать модельные представления предметной задачи (начальное, концептуальное) и будущей автоматизированной системы (инфологическое, даталогическое) в виде диаграмм и спецификаций.

2. Инфологическое модельное представление определяет проект автоматизированной системы, независимый от программно-технической среды и средств ее реализации. Следует отметить, что правильность формируемого инфологического представления определяет в дальнейшем рациональность организации информации и ее обработки в вычислительной среде.

3. Интеграция описаний инфологических структур позволяет сформировать единое представление статической составляющей для сложной автоматизированной системы на этапе ее проектирования, что способствует устранению избыточности и дублирования элементов при развитии (расширении) системы.

Литература

1. Волкова Г.Д. Методология автоматизации интеллектуального труда. М.: Янус-К, 2013. 104 с.

2. Волкова Г.Д. Теория и практика автоматизации интеллектуального труда. М.: Янус-К, 2020. 104 с.

3. Medvedev V., Volkov A., Biryukov S. Automation of technological preproduction of straight bevel gears// Mechanisms and Machine Science. 2020. Vol. 81. pp. 133-155.

4. Egorov O.D., Bujnov M.A. Analysis of mechanisms based on their structural and constructive redundancy// Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti. 2018. Vol. January. Issue 2. pp. 177-181.

5. Reliability in gear shaping/ V.A. Grechishnikov, R.M. Khusainov, S.Y. Yurasov, R.R. Khaziev //Russian Engineering Research. 2016. Vol. 36. Issue 9. pp. 791-795.

6. Brovkina Y.I., Sobolev A.N., Nekrasov A.Y. Research of characteristics and parameters of cycloidal gear. Lecture Notes in Mechanical Engineering (9783319956299), 2019. p. 1169-1179.

7. Сидоров А.С. Интеграция описаний динамических составляющих концептуальных модельных представлений // Информационные технологии в моделировании и управлении: подходы, методы, решения: сб. науч. ст. II Всерос. науч. конф. с междунар. участием. В 2 ч. Тольятти: Издатель Качалин Александр Васильевич, 2019. Ч. 1. С. 570-576.

8. Волкова Г.Д., Новоселова О.В., Семячкова Е.Г. Проектирование прикладных автоматизированных систем в машиностроении: учеб. пособие. М.: МГТУ «Станкин», 2002. 162с.

9. Новоселова О.В., Сидоров А.С. Интеграция модельных представлений, формируемых при разработке автоматизированной системы // Перспективы развития технологий обработки и оборудования в машиностроении: сб. науч. ст. 5-й Всерос. науч.-техн. конф. с междунар. / отв. ред. Горохов А.А. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2020. С. 193 – 195.

10. Новоселова О.В., Сидоров А.С. Интеграция описаний инфологических модельных представлений // Наука сегодня: вызовы и перспективы: материалы междунар. науч.-практ. конф. Вологда: ООО «Маркер», 2020. С. 74-77.

Поступила 11.01.2022; принята к публикации 21.02.2022

Информация об авторах

Новоселова Ольга Вячеславовна – канд. техн. наук, доцент кафедры информационных технологий и вычислительных систем, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (127055, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 3а), тел. +7(985)773-63-33, e-mail: ol.novoselova@stankin.ru

Сидоров Антон Сергеевич – аспирант кафедры информационных технологий и вычислительных систем, Московский государственный технологический университет «СТАНКИН» (127055, Россия, г. Москва, Вадковский пер., д. 3а), тел. +7(916)683-91-77, e-mail: a.sidorov@stankin.ru

INTEGRATION OF BASIC STATIC STRUCTURES AT THE STAGE OF INFOLOGICAL MODELING

O.V. Novoselova, A.S. Sidorov

Moscow State University of Technology «STANKIN», Moscow, Russia

Abstract: the article discusses the process of integrating descriptions of static structures in the form of diagrams and specifications at the stage of infological modeling in the design of automated systems. The infological model representation is a project of an automated system that is being developed to solve design computational problems in a computing environment. The stage of infological modeling is the stage of designing automated systems according to the methodology of automation of intellectual work. Infological model representation does not depend on the implementation platform of the automated system.

The description of the infological model view includes forms (specifications) and diagrams for each component: static, dynamic, functional and the model as a whole. The article provides the integration of descriptions in the form of diagrams for the static components of infological model views. For this, the features the formation of diagrams and specifications when creating an infological structure were investigated, on the basis of which the method and methodology for integrating descriptions of static components for model-projects of automated systems that perform computational tasks in the design of mechanical engineering objects were determined

Key words: the automation of intellectual labor, design task, infological structure, integration of diagrams

References

1. Volkova G.D. "Methodology for automating intellectual labor" ("Metodologiya avtomatizatsii intellektual'nogo truda"), Moscow: Yanus-K, 2013, 104 p.
2. Volkova G.D. Theory and practice of automation of intellectual labor ("Teoriya i praktika avtomatizatsii intellektual'nogo truda"), Moscow: Yanus-K, 2020, 104 p.
3. Medvedev V., Volkov A., Biryukov S. "Automation of technological preproduction of straight bevel gears", *Mechanisms and Machine Science*, 2020, vol. 81, pp. 133-155.
4. Egorov O.D., Bujnov M.A. "Analysis of mechanisms based on their structural and constructive redundancy", *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii, Seriya Tekhnologiya Tekstil'noi Promyshlennosti*, 2018, vol. 2018-January, issue 2, pp. 177-181.
5. Grechishnikov V.A., Khusainov R.M., Yurasov S.Y., Khaziev R.R. "Reliability in gear shaping", *Russian Engineering Research*, 2016, vol. 36, issue 9, pp. 791-795.
6. Brovkina Y.I., Sobolev A.N., Nekrasov A.Y. "Research of characteristics and parameters of cycloidal gear", *Lecture Notes in Mechanical Engineering*, 2019, 9783319956299, pp. 1169-1179.
7. Sidorov A.S. "Integration of descriptions dynamic components of the conceptual model representations", *Proc. of the II All-Russian Sci. Conf. with the Int. Participation: Information Technologies in Modeling and Management: Approaches, Methods, Decisions (Informatsionnye tekhnologii v modelirovanii i upravlenii: podkhody, metody, resheniya: sb. nauch. st. II Vseros. nauch. konf. s mezhdunar. uchastiem)*, part 1, 2019, pp. 570-576.
8. Volkova G.D., Novoselova O.V., Semyachkova E.G. "Design of applied automated systems in mechanical engineering" ("Proektirovanie prikladnykh avtomatizirovannykh sistem v mashinostroyenii"), MSUT STANKIN 2002, 162 p.
9. Novoselova O.V., Sidorov A.S. "Integration of model representations generated during the development of an automated system", *Prospects for the Development of Processing and Equipment in Machine-Building: proc. of the 5th All-Russian Sci. and Technical Conf. with Int. Participation (Perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii: sb. nauch. st. 5-y Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar. uch.)*, South-West State University, 2020, pp. 193-195.
10. Novoselova O.V., Sidorov A.S. "Integration of descriptions of infological model representations", *Science Today: Challenges and Prospects: Proc. the Int. Sci. and Practical Conf. (Perspektivy razvitiya tekhnologiy obrabotki i oborudovaniya v mashinostroyenii: sb. nauch. st. 5-y Vseros. nauch.-tekhn. konf. s mezhdunar.)*, Vologda: Marker, 2020, pp. 74-77.

Submitted 11.01.2022; revised 21.02.2022

Information about the authors

Ol'ga V. Novoselova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Moscow State University of Technology «STANKIN» (3a Vadkovsky per., Moscow 127055, Russia), tel.: +7 (985)773-63-33, e-mail: ol.novoselova@stankin.ru
Anton S. Sidorov, graduate student, Moscow State University of Technology «STANKIN» (3a Vadkovsky per., Moscow 127055, Russia), tel.: +7 (916)683-91-77, e-mail: a.sidorov@stankin.ru

Радиотехника и связь

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.1.009

УДК 621.396.67

УЛУЧШЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НАПРАВЛЕННОСТИ АНТЕННЫ ДИФРАКЦИОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ МЕТОДОМ ВАРИАЦИИ ПРОФИЛЯ ИЗЛУЧАЮЩЕГО РАСКРЫВА

Д.Ю. Крюков¹, А.В. Останков¹, А.Ю. Чернышев^{1,2}, С.Ю. Дашян³

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

³Университет Лилля, Вильнёв-д'Аск, Франция

Аннотация: обеспечение эффективной работы большинства современных радиотехнических систем в диапазонах СВЧ и КВЧ невозможно без использования антенн, обладающих высоким коэффициентом полезного действия (КПД), способных формировать в пространстве остронаправленные лучи диаграммы направленности (ДН). Задача обеспечения требуемой ширины главного лепестка ДН при малом уровне бокового излучения может быть решена за счет реализации оптимального амплитудного распределения поля в раскрыве. Рассматривается антенна вытекающей волны дифракционного типа, представляющая собой открытую излучающую линию передачи и содержащая планарный диэлектрический волновод, экранированный металлической резонансной решеткой гребенчатого типа. Для антенн такого типа характерен высокий КПД, а необходимое амплитудное распределение в раскрыве может быть сформировано за счет продольной вариации прицельного расстояния – зазора между диэлектрическим волноводом и гребенчатой решеткой. Для установления наилучшей закономерности изменения прицельного расстояния использован адаптированный к условиям рассматриваемой задачи оригинальный вариант энергетического метода расчета. Согласно предложенной методике, определение степени и направления вариации прицельного расстояния сведено к задаче расчета доли мощности, отбираемой каждой канавкой гребенчатой решетки по заданному амплитудному распределению в раскрыве. Приведены основные соотношения, положенные в основу методики. Установлено, что неравномерный профиль распределительно-излучающей системы позволяет улучшить исходные показатели направленности антенны за счет повышения степени концентрации излучения в пределах главного лепестка ДН и снижения уровня боковых лепестков (УБЛ), а также увеличить коэффициент усиления (КУ) антенны. Установлено, что при изменении прицельного расстояния в соответствии с теоретически найденной закономерностью удастся снизить УБЛ и одновременно увеличить КУ по сравнению со случаем фиксированного прицельного расстояния

Ключевые слова: антенна, прицельное расстояние, периодическая решетка, дифракционное излучение, моделирование

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

Введение

Инновационный путь развития радиотехнических систем тесно связан с освоением коротковолновой части сантиметрового диапазона, миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн. Наиболее перспективным в настоящее время является использование указанных диапазонов для создания сверхвысокоскоростных беспроводных транспортных сетей мобильного трафика. Такие сети уже сейчас способны обеспечить скорость передачи данных до 10 Гбит/с на основе простых методов модуляции без применения дополнительных алгоритмов кодирования [1-2]. Вместе с тем, особенности распространения радиоволн сан-

тиметрового и миллиметрового диапазонов позволяют реализовать целый ряд широко востребованных радиотехнических и инфокоммуникационных систем для приложений связи, навигации и управления. К ним можно отнести СВЧ–радиометрические рассеивающие комплексы для исследований экологической обстановки, системы наблюдения за объектами в условиях ограниченной видимости, активные радиолокационные станции обзора [3-5].

Для эффективной работы радиотехнических систем в диапазонах СВЧ и КВЧ требуется их оснащение антеннами, обладающими высоким коэффициентом полезного действия (КПД) и способными формировать в пространстве остронаправленные ДН. В качестве таких антенн могут быть использованы антенны вытекающей волны дифракционного типа (АВВДТ), представляющие собой отражательную решет-

ку, например, гребенчатого типа, покрытую слоем диэлектрика. Основными преимуществами, выгодно отличающими дифракционные антенны от иных видов антенн, являются простота и надежность конструкции, высокая технологичность изготовления с возможностью поточного принципа производства за счет повторяемости размеров, малые массогабаритные характеристики и низкие стоимостные показатели.

Принцип работы АВВДТ основан на пространственной трансформации резонансной дифракционной решеткой (ДР) принимаемой свободной волны в поверхностную волну открытой замедляющей линии [6-7]. Для такого рода преобразования характерен высокий КПД, достигающий для отдельных оптимизированных образцов антенн более 95 % [4]. Задача обеспечения малого уровня бокового излучения и повышения эффективности использования поверхности раскрыва может быть решена за счет реализации оптимального амплитудного распределения поля в раскрыве посредством изменения в продольном направлении глубины канавок и вариации прицельного расстояния – зазора между плоским диэлектрическим волноводом (ПДВ) и гребенчатой решеткой. Возможности оптимизации характеристик АВВДТ за счет глубинного профилирования одномерной квазипериодической гребенчатой решетки при фиксированном прицельном расстоянии достаточно подробно рассмотрены в [8-9].

Цель настоящей работы заключается в разработке и апробации методики повышения показателей направленности АВВДТ за счет обеспечения продольной вариации ключевого геометрического параметра распределительно-излучающей системы – прицельного расстояния.

Постановка задачи

На рис. 1 показана в поперечном сечении модельная геометрия распределительно-излучающей системы АВВДТ, включающей эквидистантную (с периодом d) гребенчатую ДР с конечным числом идентичных канавок (шириной a и глубиной h) и неограниченный в пространстве диэлектрический слой (фиксированной толщины τ). АВВДТ рассматривается в режиме излучения при возбуждении раскрыва медленной волной диэлектрического волновода низшего E -типа.

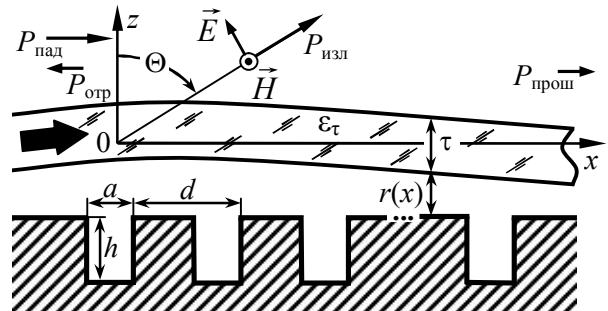


Рис. 1

Для установления закономерности изменения прицельного расстояния $r(x)$ (рис. 1) предлагается использовать адаптированный к условиям рассматриваемой задачи вариант распространённого энергетического метода расчета – метода распределённых параметров [10-11].

Согласно этому методу дискретные излучатели (в рассматриваемой задаче – канавки ДР) порождают дискретное амплитудное распределение, а продольная интенсивность отбора мощности определяется затуханием волны в открытой линии передачи, обусловленным излучением. При этом один излучатель вносит затухание, соответствующее периоду распределительно-излучающей системы.

Таким образом, отыскание предпочтительной закономерности изменения прицельного расстояния $r(x)$ в АВВДТ может быть сведено к задаче определения доли мощности, отбираемой каждым излучателем (канавкой ДР) в соответствии с заданным амплитудным распределением в раскрыве. Следует заметить, что на практике распространение получило оптимальное в отношении коэффициента использования поверхности (КИП) и максимального уровня боковых лепестков (УБЛ) амплитудное распределение типа «косинус на пьедестале» [10]. Тогда задаваемое амплитудно-фазовое распределение в раскрыве может иметь вид:

$$\dot{v}(k) = \left[(1-\Omega) \cdot \cos\left(\pi \cdot \frac{x_k - 0.5L_A}{L_A}\right) + \Omega \right] \cdot \exp(j\beta x_k),$$

где Ω – относительная амплитуда поля на краях раскрыва, L_A – длина раскрыва, β – волновое число свободного пространства, x_k – координата центра k -й канавки ДР.

Методика расчета наилучшей закономерности продольной вариации прицельного расстояния по заданному амплитудному распределению

Пусть для обеспечения заданного амплитудного распределения $v(k)$ для каждой k -й канавки ДР выполняется условие [10]:

$$v^2(k) = F \cdot p_k \cdot P_{\text{пад}}^{(k)} = F \cdot P_{\text{изл}}^{(k)}, \quad (1)$$

где F – нормирующий множитель, p_k – коэффициент отбора мощности для k -й канавки, $P_{\text{пад}}^{(k)}$ – мощность первичной волны, поддерживаемой ПДВ и возбуждающей k -ю канавку ДР.

В (1) квадрат амплитудного распределения в раскрыве АВВДТ представлен в виде функциональной зависимости от коэффициентов отбора мощности p_k . Следовательно, если мощность первичной волны возбуждения, падающей на k -ю канавку, составляет $P_{\text{пад}}^{(k)}$, то в соответствии с приближенной моделью [12], мощность возбуждающей последующую канавку равна:

$$\begin{aligned} P_{\text{пад}}^{(k+1)} &= P_{\text{пад}}^{(k)} - (P_{\text{изл}}^{(k)} + P_{\text{отр}}^{(k)} + P_{\downarrow}^{(k)}) = \\ &= P_{\text{пад}}^{(k)} \cdot (1 - p_k - R_k - \Delta_{\delta}) = P_{\text{прош}}^{(k)} - P_{\text{отр}}^{(k)}, \end{aligned} \quad (2)$$

где $P_{\text{отр}}^{(k)}$ – мощность волны, отраженной от k -й канавки (R_k – коэффициент отражения), $P_{\downarrow}^{(k)}$ – мощность потерь, возникающих при взаимодействии волны возбуждения с k -й канавкой. Заметим, что величина $\Delta_{\delta} = P_{\downarrow}^{(k)} / P_{\text{пад}}^{(k)}$, ее определяющая, принимается для всех канавок одинаковой и равной относительной мощности погонных потерь в ПДВ. Для расчета погонного затухания, разумно воспользоваться следующим приближением [13]:

$$\Delta_{\delta} \approx 27.3 \cdot \sqrt{\epsilon_{\tau}} \cdot \text{tg} \delta / \lambda, \quad (3)$$

где λ – длина волны, ϵ_{τ} и $\text{tg} \delta$ – относительная диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь материала ПДВ.

В тоже время некоторые известные реализации энергетического метода расчета антенн вытекающей волны на заданное амплитудное распределение поля в раскрыве, описанные, например, в [10, 14], принимают в расчет только затухание на излучение и не учитывают потери мощности в линии передачи. В подобных случаях часто полагают, что затухание волны в ПДВ можно не учитывать ($\Delta_{\delta} = 0$) в силу малости влияния потерь на показатели АВВДТ. Вме-

сте с тем, подобное допущение может приводить к недопустимым ошибкам при расчетах, в том числе закономерности вариации прицельного расстояния $r(x)$ в антеннах, работающих в коротковолновой части СВЧ или КВЧ.

Далее сделаем допущение о том, что рассматриваемая АВВДТ с гребенчатой ДР может быть предварительно оптимизирована по критерию минимума коэффициента отражения за счет реализации оптимальной ширины и (или) глубины канавок [8, 15]. Последнее позволяет пренебречь в уравнении (2) мощностью волны, отраженной от k -й канавки (коэффициентом отражения R_k). Тогда, коэффициент прохождения по мощности для k -й канавки ДР можно принять равным

$$t_k = \frac{P_{\text{пад}}^{(k+1)}}{P_{\text{пад}}^{(k)}} = 1 - p_k - \Delta_{\delta}.$$

Вследствие этого для k -й канавки получим следующее уравнение баланса мощности:

$$\begin{aligned} P_{\text{пад}}^{(k)} &= P_{\text{пад}}^{(k-1)} - p_{k-1} P_{\text{пад}}^{(k-1)} - P_{\downarrow}^{(k-1)} = \\ &= P_{\text{пад}}^{(k-1)} \cdot (1 - p_{k-1} - \Delta_{\delta}) = \\ &= P_{\text{пад}}^{(1)} \cdot \prod_{m=1}^{k-1} (1 - p_m - \Delta_{\delta}) = P_{\text{пад}}^{(1)} \cdot \prod_{m=1}^{k-1} t_m, \end{aligned} \quad (4)$$

для решетки, состоящей из N канавок,

$$P_{\text{пад}}^{(N+1)} = P_{\text{пад}}^{(1)} \cdot \prod_{k=1}^N t_k = P_{\text{пад}}^{(1)} \cdot T_{\rightarrow}, \quad (5)$$

где $T_{\rightarrow}$ – коэффициент прохождения по мощности первичной волны возбуждения к периферии распределительно-излучающей системы АВВДТ.

Найдем коэффициенты отбора мощности p_k при заданном амплитудном распределении $v(k)$. Для этого из уравнений (1) и (4) получим:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^N v^2(k) &= F \cdot \sum_{k=1}^N p_k \cdot P_{\text{пад}}^{(k)} = F \cdot \sum_{k=1}^N (P_{\text{пад}}^{(k)} - P_{\text{пад}}^{(k+1)}) = \\ &= F \cdot (P_{\text{пад}}^{(1)} - P_{\text{пад}}^{(N+1)}) = \\ &= F \cdot (P_{\text{пад}}^{(1)} - T_{\rightarrow} P_{\text{пад}}^{(1)}) = F \cdot P_{\text{пад}}^{(1)} \cdot (1 - T_{\rightarrow}). \end{aligned}$$

Следовательно, нормирующий множитель F может быть определен как

$$F = \frac{1}{P_{\text{пад}}^{(1)} \cdot (1 - T_{\rightarrow})} \cdot \sum_{k=1}^N v^2(k). \quad (6)$$

Подставим в (1) уравнения (4), (6) и исключим $P_{\text{пад}}^{(1)}$; после чего получим:

$$p_k = \frac{1 - T_{\rightarrow}}{\prod_{m=1}^{k-1} (1 - p_m - \Delta_{\delta})} \cdot \frac{v^2(k)}{\sum_{k=1}^N v^2(k)}. \quad (7)$$

Коэффициенты отбора мощности p_k полностью определяются заданным нормированным амплитудным распределением поля в раскрыве $v(k)$, коэффициентом прохождения по мощности $T_{\rightarrow}$ и погонным затуханием Δ_{δ} в ПДВ. Заметим, что максимально достижимое значение коэффициента отбора для k -й канавки не должно превышать единицы.

В качестве исходных данных для реализации представленной методики помимо заданного амплитудного распределения в раскрыве используется зависимость отбора мощности в АВВДТ $P_{\text{пад}}/P_{\text{прош}} = P_{\text{пад}}^{(1)}/P_{\text{пад}}^{(N+1)} = 1/T_{\rightarrow}$ от величины прицельного расстояния r . Заметим, что данная зависимость может быть получена как экспериментальным путем [16,17], так и при помощи достоверной математической модели, например, описанной в [18,19]. Таким образом, на начальном этапе синтеза АВВДТ с использованием электродинамической модели дифракции заданной поверхностной волны ПДВ на конечной гребенчатой решетке [18,19] следует получить зависимость величины отбора мощности от прицельного расстояния с учетом выполнения баланса: $P_{\text{изл}} + P_{\text{отр}} + P_{\text{прош}} = P_{\text{пад}}$.

Далее, в предположении, что на вход антенны поступает единичная мощность ($P_{\text{пад}}^{(1)} = 1$) выполняется расчет величины отбора мощности $P_{\text{пад}}^{(k)}/P_{\text{пад}}^{(k+1)}$ для каждой k -й канавки ДР с использованием уравнений (4), (6) и (7).

Затем, по известной зависимости отбора мощности определяется необходимая интенсивность отбора для каждой k -й канавки ДР, а по ней, в свою очередь, восстанавливается прицельное расстояние для k -го периода гребенки.

Таким образом, по заданному амплитудному распределению, коэффициенту прохождения, относительной мощности потерь в ПДВ, рассчитанным коэффициентам отбора мощности и установленной зависимости отбора мощности от прицельного расстояния возможно однозначно определить закономерность наилучшего продольного изменения профиля $r(x)$.

Синтез антенны с продольной вариацией прицельного расстояния

С использованием представленной методики ниже выполнен структурно-параметрический синтез АВВДТ, предназначенной для работы в полосе частот 9 - 10 ГГц.

В качестве синтезируемой распределительной-излучающей системы взята накрытая ПДВ эквидистантная гребенчатая ДР с 22-мя канавками одинаковой ширины и глубины, оптимизированная на первом этапе синтеза по критерию максимума КПД (более 90 %) на центральной частоте. Расстояние между соседними канавками d (шаг гребенки) взято соизмеримым с длиной волны и составляет 0.76λ , что при $\lambda = 31.6$ мм соответствует средней частоте рабочего диапазона – 9.5 ГГц. Толщина ПДВ выбрана с учетом выполнения условия одномодовости волновода:

$$\tau < \lambda / (2\sqrt{\epsilon_r - 1}). \quad (8)$$

Относительная диэлектрическая проницаемость ϵ_r материала ПДВ взята равной 2.55, что соответствует полимеру Preperm 255.

При синтезе предполагалось, что величина воздушного зазора r между ПДВ и ДР составляет не менее $(0.3-0.75)\lambda$ [17, 20, 21]. Поскольку оптимизируемый раскрыв антенны возбуждается E -волной ПДВ низшего типа, так что излучаемая волна вертикально поляризована, для реализации максимальной излучаемой способности канавок гребенчатой ДР их ширина взята равной половине периода – $0.5d$. Глубина канавок выбрана несколько меньше резонансной глубины: $0.634 \cdot \lambda/4$ [21].

Для указанных параметров излучающего раскрыва расчетный КПД на частоте 9.5 ГГц составил 97 %, направление максимального излучения – 106° .

По результатам первого этапа структурно-параметрического синтеза конструктивные параметры АВВДТ определены следующими: период (d), длина (L_A) и ширина ДР (W) – 24, 540 и 53 мм соответственно; глубина (h) и ширина канавок (a) – 5 и 12 мм; толщина (τ) и исходное прицельное расстояние ПДВ (r) – 6 и 10 мм.

Виртуальный прототип антенны представлен на рис. 2 в изометрической проекции.

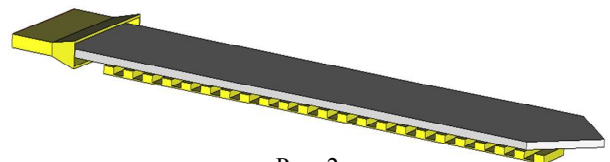


Рис. 2

Для реализации имитационного моделирования показанной на рис. 2 электродинамической структуры и ее последующих модификаций использовался вычислитель во временной области (Time domain solver) симулятора CST Studio Suite (с академической лицензией), осно-

ванный на методе конечного интегрирования Вейланда [22].

На рис. 3, а, б изображены ДН исследуемой антенны на частоте 9.5 ГГц, из которых, в частности следует, что максимальный УБЛ составляет «минус» 7.9 дБ, КУ – 20.7 дБ. Ширина ДН в вертикальной плоскости равна 4.1°, направление максимального излучения – 103°. Заметим, что максимальный УБЛ оказался недостаточно малым. Последнее может быть объяснено убывающим амплитудным распределением поля (рис. 3, в), которое не является оптимальным как с позиции обеспечения малого УБЛ, так и высокого КИП, а, следовательно,

дальнейшую оптимизацию распределительно-излучающей системы целесообразно проводить с позиции реализации в раскрыве более подходящего амплитудного распределения, например типа «косинус на пьедестале». Помимо имитационного моделирования амплитудное распределение в раскрыве было дополнительно рассчитано еще двумя методами (рис. 3, в): с использованием представления поля формулой Кирхгофа в фиксированных точках над раскрывом (согласно [23]) и интегрированием спектральной плотности амплитуд поля в направлении вытекания поверхностной волны по пространственной частоте (на основе модели [18]).

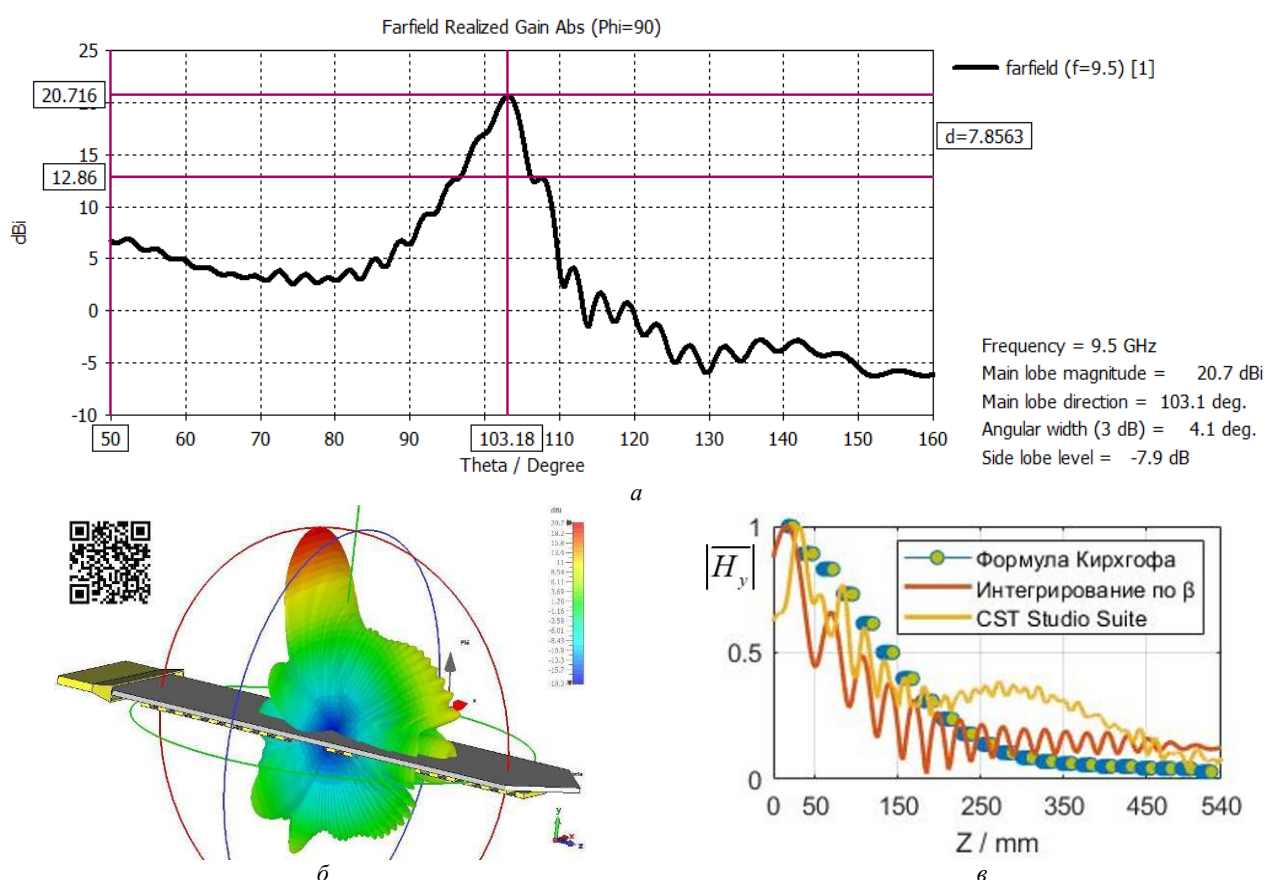


Рис. 3

Важно также отметить, что существуют некоторые ограничения на форму амплитудного распределения [17,20]. Так, кривая амплитудного распределения должна быть непрерывной, гладкой функцией и не может принимать нулевые значения, включая периферийные точки излучающего раскрыва. Последнее ограничение связано с тем, что при нулевом значении амплитуды в раскрыве соответствующая величина отбора мощности составляет 0 дБ, что достигается лишь при бесконечно большом прицель-

ном расстоянии. Поэтому такие известные амплитудные распределения как «косинусное» или «косинус-квадратное» могут быть реализованы только с пьедесталом конечной величины, характерным для раскрывов, используемых на практике [17].

Второй этап синтеза заключается, собственно, в отыскании наилучшей закономерности продольной вариации прицельного расстояния $r(x)$. Перед этим целесообразно обеспечить спадание поля на периферии раскрыва до вели-

чины порядка «минус» 30 дБ, для чего относительный пьедестал Ω заданного амплитудного «косинусного» распределения следует взять равным 0.03. Далее, с использованием электродинамической модели дифракции заданной поверхностной волны ПДВ на конечной гребенчатой решетке [18,19] необходимо получить кривую зависимости отбора мощности, обеспечивающего излучающим раскрывом, от величины прицельного расстояния r (рис. 4).

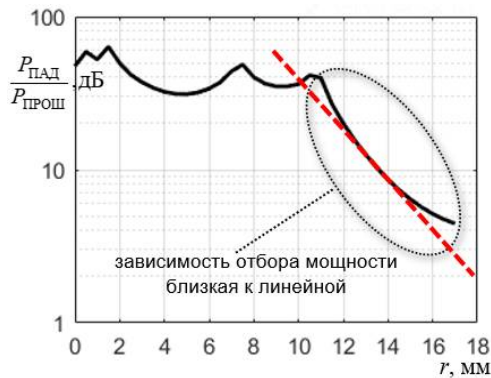


Рис. 4

Из рис. 4, в частности видно, что на начальном участке кривой отбора мощности (при изменении прицельного расстояния от 0 до 10.5 мм) имеют место ярко выраженные провалы. Их наличие, как правило, обусловлено значительной величиной коэффициента отражения первичной волны возбуждения. При этом согласно [24] излучаемая антенной объемная волна складывается с поверхностной волной ПДВ, что приводит к возрастанию или напротив снижению напряженности поля, возбуждающего канавки гребенки. Следовательно, для обеспечения оптимальной закономерности изменения прицельного расстояния следует выбрать участок кривой, наиболее близкий к линейному. В пределах такого участка кривой отбора мощности предположительно гарантируется однозначная и монотонная зависимость величины отбора мощности от прицельного расстояния r , характерная для прозрачного ПДВ с толщиной, определяемой (8).

Выбор компаунда Preperm 255 в качестве материала для ПДВ обусловлен тем, что он обладает высокой диэлектрической стабильностью на частотах вплоть до 120 ГГц и относительно малыми потерями ($\text{tg}\delta = 0.0005$) [25]. Кроме того, диэлектрик Preperm 255 пригоден для реализации технологии 3D-печати [26], что значительно упрощает процесс исполнения диэлектрических волноводов со сложной структурой

профиля. Удельное затухание на частоте 9.5 ГГц для диэлектрического волновода из указанного полимера, рассчитанное по (2), составляет 0.69 дБ/м. Влияние, оказываемое потерями на затухание в ПДВ, иллюстрируется кривыми продольного отбора мощности (рис. 5, при возбуждении раскрыва единичной мощностью). Так, из рис. 5 следует, что учет погонного затухания в диэлектрическом волноводе ($\Delta_\delta = 0.69$ дБ/м) приводит к последовательному уменьшению доли падающей мощности (до трети на периферийной канавке) по сравнению со случаем отсутствия потерь в ПДВ ($\Delta_\delta = 0$).

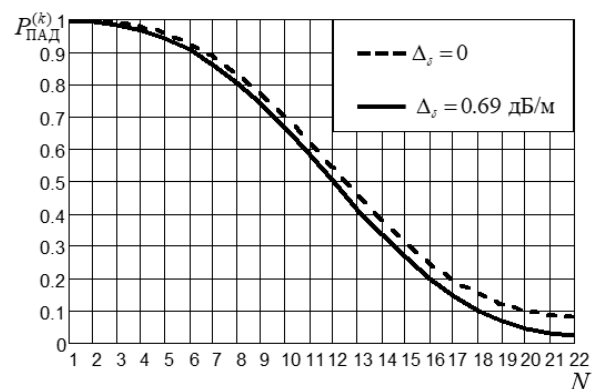


Рис. 5

На рис. 6 показана расчётная зависимость продольного изменения прицельного расстояния $r(x)$, полученная на основе изложенной выше методики. Прицельное расстояние при этом варьируется в пределах от 10.5 до 17 мм.

Несмотря на то, что закон изменения $r(x)$ достаточно сложный, на кривой рис. 6 можно выделить три области:

- 1) от 0 до 140 мм — область раскрыва, в пределах которой обеспечивается наименьший отбор мощности на излучение; прицельное расстояние r на этом участке уменьшается от своего максимального значения 17 мм до 16.5 мм;
- 2) от 141 до 450 мм — область, в пределах которой отбор мощности на излучение увеличивается по линейному закону; прицельное расстояние r уменьшается от 16 до 10.5 мм;
- 3) от 451 до 540 мм — область, в пределах которой отбор мощности уменьшается, однако прицельное расстояние r увеличивается от 11 до 11.8 мм.

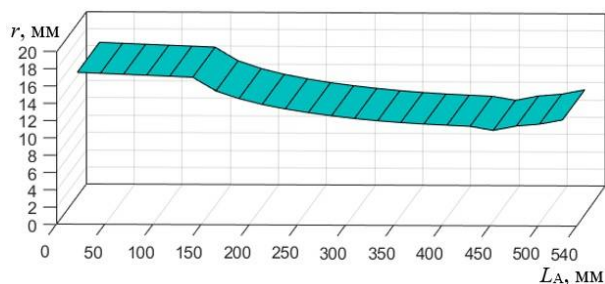


Рис. 6

Полученная закономерность изменения прицельного расстояния может быть за счет неравномерности профиля ПДВ. Виртуальный прототип антенны представлен на рис. 7 в изометрической проекции.

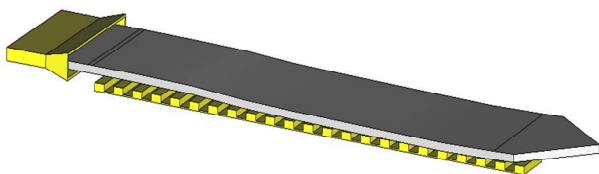


Рис. 7

На рис. 8, *а*, *б* показаны ДН антенны с продольной вариацией прицельного расстояния, полученные для частоты 9.5 ГГц. Максимальный УБЛ теперь составляет «минус» 13.1 дБ, КУ – 22.1 дБ. Ширина ДН в вертикальной плоскости равна 3.4°, направление максимального излучения – 103.3°. Амплитудное распределение (рис. 8, *в*) имеет форму, более схожую с «косинусом на пьедестале». Из рис. 8 следует, что при изменении прицельного расстояния в соответствии с полученной закономерностью $r(x)$ (рис. 6) удастся снизить УБЛ на 66 % (на 5.2 дБ) и одновременно увеличить КУ на 7% (на 1.4 дБ) по сравнению со случаем равномерного прицельного расстояния (рис. 2). Неравномерный профиль ПДВ способствовал также к улучшению фокусировки излучения в пределах главного лепестка ДН без изменения направления максимального излучения.

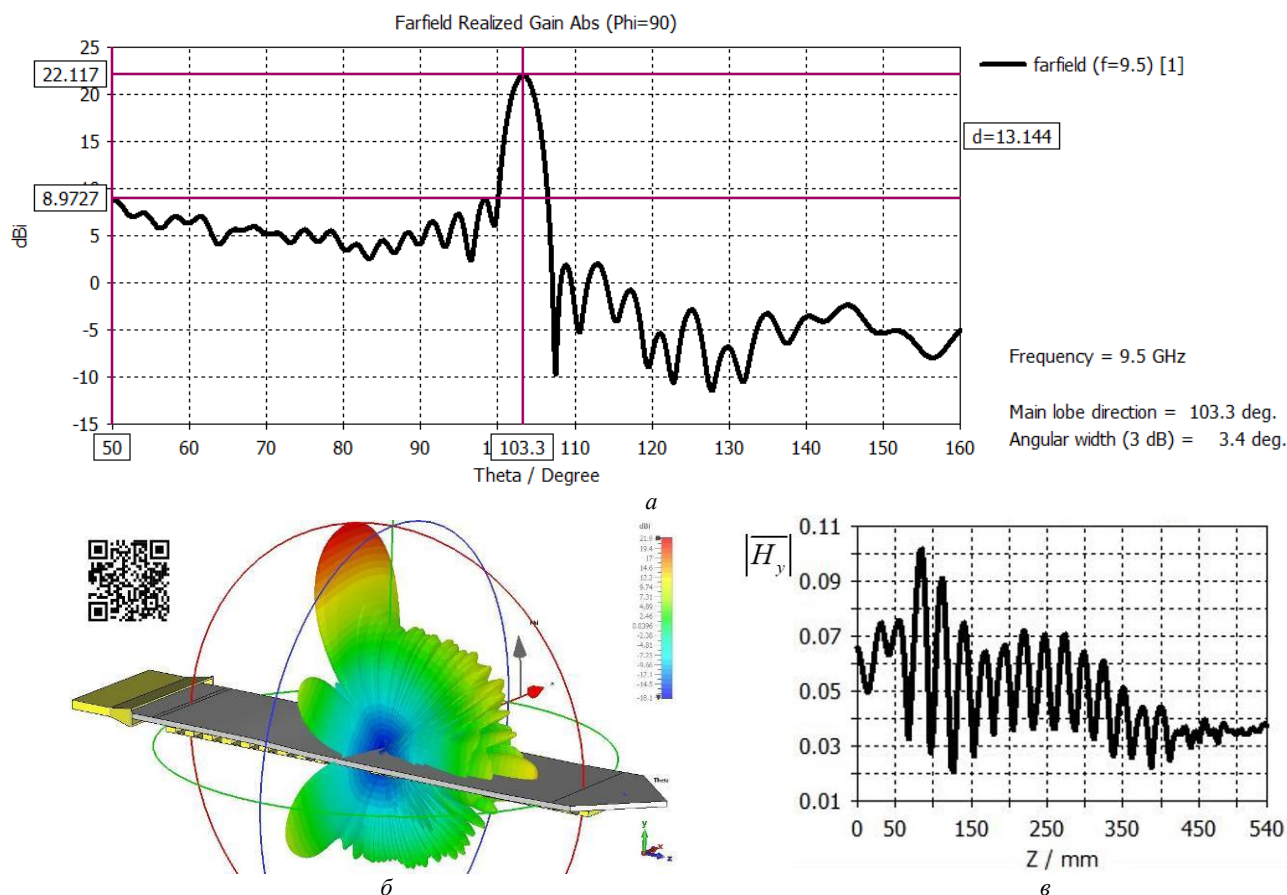


Рис. 8

Клиновидный зазор между диэлектрическим волноводом и гребенчатой решеткой

Как известно, реализация клиновидного зазора между ПДВ и ДР также позволяет оптимизировать амплитудное распределение в раскрыве антенны для достижения более высокого КИП и, соответственно, полной эффективности антенны [8, 9].

На рис. 9 представлены наилучшие показатели исследуемой антенны, которые удается достичь за счет экспериментального подбора клиновидного зазора. Полученное по результатам моделирования значение максимального УБЛ на частоте 9.5 ГГц составляет «минус» 11.7 дБ, КУ – 22 дБ, ширина главного лепестка ДН равна 3.1° , направление максимального излучения – 104.3° . Однако указанные показатели все же несколько хуже, чем у антенны с неравномерным профилем ПДВ (рис. 8). Различия проявляются также в формах реализуемых амплитудных распределений (рис. 8, в и 9, в). При этом экспоненциально убывающее среднее значение амплитудного распределения (рис. 9, в) также не способствует достижению минимального уровня бокового излучения.

По результатам моделирования установлено, что АВВДТ с клиновидным зазором позволя-

ет обеспечить приемлемые электрические характеристики (близкие к характеристикам антенны с неравномерным профилем ПДВ) только лишь в нижней части рабочего диапазона – на частотах от 9 до 9.5 ГГц. С увеличением рабочей частоты наблюдается рост максимального УБЛ, что приводит к появлению вторичного (побочного) максимума ДН. Так, на частоте 9.9 ГГц для антенны с клиновидным зазором максимальный УБЛ составляет «минус» 8.4 дБ, а КУ – 22 дБ.

Для сравнения, максимальный УБЛ в антенне с неравномерным профилем ПДВ (рис. 7) на частоте 9.9 ГГц составляет «минус» 12.8 дБ, КУ при этом равен 22.5 дБ (рис. 10). Направление максимального излучения и ширина ДН по уровню «минус» 3 дБ у данных вариантов антенн различаются незначительно (в пределах 1°). Важно также заметить, что на указанной частоте у антенны с равномерным профилем (рис. 2), максимальный УБЛ составляет всего «минус» 6.2 дБ, КУ – 21.6 дБ. Это позволяет сделать вполне определенный вывод о том, что продольная вариация прицельного расстояния в соответствии с расчётной закономерностью, в ряде случаев, позволяет снизить максимальный УБЛ более чем 100 % (на 6.4 дБ) по сравнению с исходным значением.

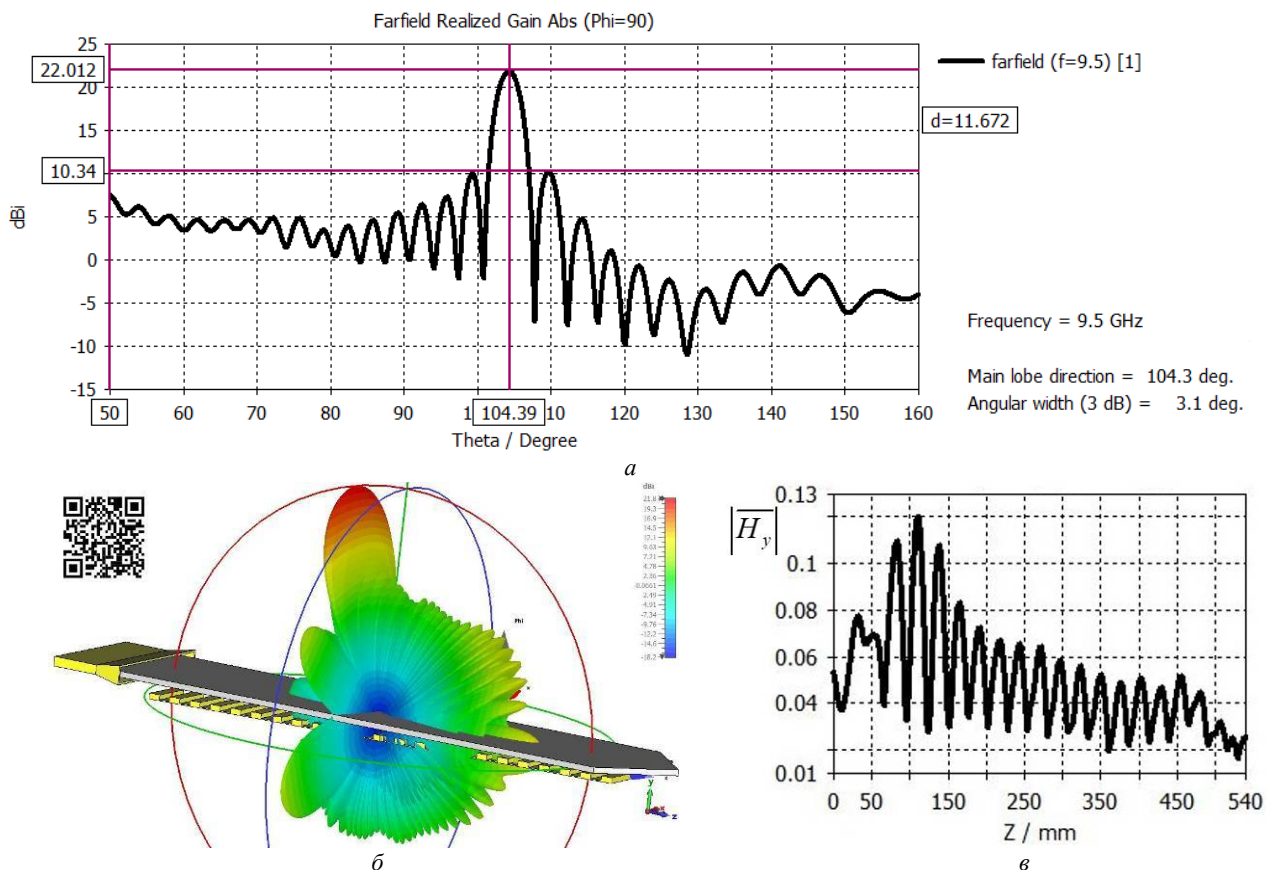


Рис. 9

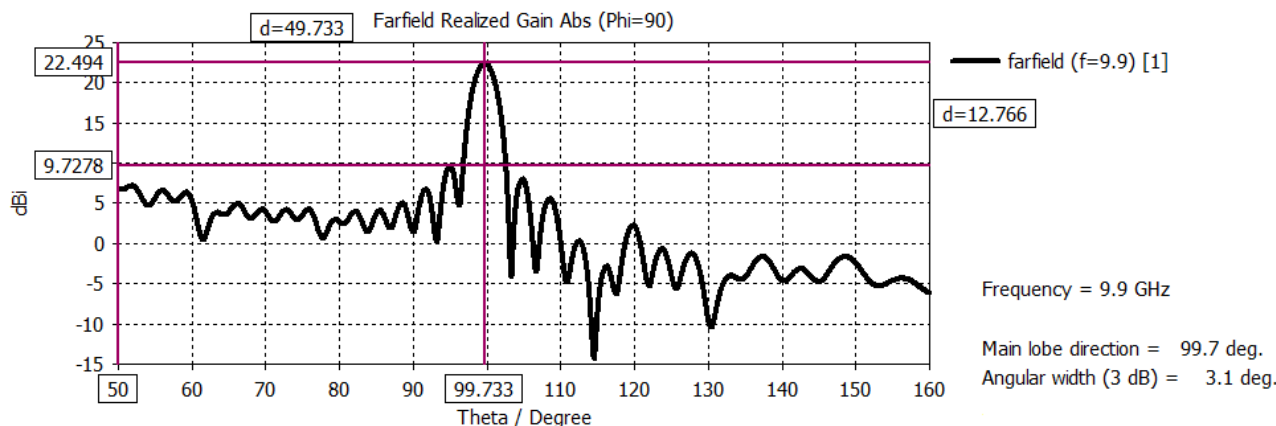


Рис. 10

Анализ полученных результатов показывает, что исходные направленные свойства исследуемой антенны могут быть улучшены путем структурно-параметрического синтеза с использованием предложенной методики. При этом полная эффективность антенны $\mathcal{E}_{\text{фф}}$ с продольной вариацией прицельного расстояния $r(x)$ в соответствии с рис. 6, составляет от 87 до 90 % (рис. 11). Наилучшие показатели полной эффективности для такой антенны достигаются на рабочих частотах от 9.5 до 10 ГГц.



Рис. 11

При реализации АВВДТ на основе распределительно-излучающей системы с неравномерным профилем возможна высокая технологичность изготовления. Она гарантирована широко распространенными современными САД-системами с технологией 3D-печати. Однако чрезмерная вариация профиля АВВДТ может приводить к ощутимым фазовым искажениям в раскрытии и деформации ДН.

Заключение

В работе предложена и апробирована эффективная методика улучшения показателей направленности АВВДТ на основе реализации продольного изменения профиля распределительно-излучающей системы за счет вариации прицельного расстояния по заданному амплитудному распределению. Установлено, что изменение прицельного расстояния вдоль раскрытия по теоретически рассчитанной закономерности позволяет улучшить исходные направленные свойства антенны: снизить максимальный уровень боковых лепестков, а также увеличить коэффициент усиления антенны.

Литература

1. Майская В. На пути к достижению субмиллиметрового диапазона длин волн // Электроника: Наука, технология, бизнес. 2013. № 6 (129). С. 44-58.
2. Якушенко С.А. Высокоскоростные транспортные сети радиосвязи диапазона миллиметровых волн // Радиотехнические, оптические и биотехнические системы. Устройства и методы обработки информации: сб. докл. II всерос. науч. конф. СПб: ГУАП, 2021. С. 185-192.
3. Евдокимов А.П. Антенны дифракционного излучения // Физические основы приборостроения. 2013. Т. 2. № 1. С. 108-124.
4. Крюков Д.Ю., Останков А.В. Рефлективный анализ возможностей и основных конструктивно-технических характеристик антенн дифракционного излучения на основе периодических замедляющих структур // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2017. Т. 13. № 1. С. 95-103.
5. Антенны дифракционного излучения на базе желобковой линии передачи / А.П. Евдокимов, В.З. Мазур, К.Ю. Сиренко, Ю.К. Сиренко // Физические основы приборостроения. 2018. Т. 7. № 1. С. 24-36.
6. Шестопалов В.П. Физические основы миллиметровой и субмиллиметровой техники. Т. 1: Открытые структуры. Киев: Наук. думка, 1985. 216 с.
7. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. Новое направление в технике антенных решеток // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. 1996. Т. 39. № 9-10. С. 54-61.
8. Крюков Д.Ю., Останков А.В. Оптимизация характеристик антенны дифракционного излучения за счет глубокого профилирования одномерной квазипериодической гребенчатой решетки // Радиолокация, навигация, связь: сб. докл. 23-й междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2017. Т. 3. С. 1054-1060.
9. Останков А.В. Дифракционная антенна вытекающей волны с нестандартной реализацией излучающего

раскрыва // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2010. Т. 6. № 8. С. 17-26.

10. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток / под ред. Д.И. Воскресенского. М.: Радиотехника, 2012. 744 с.

11. Активные фазированные антенные решетки / А.Н. Братчиков и др.; под ред. Д.И. Воскресенского, А.И. Канащенкова. М.: Радиотехника, 2004. 487 с.

12. Кюн Р. Микроволновые антенны (антенны сверхвысоких частот). Л.: Судостроение, 1967. 517 с.

13. Гошин Г.Г. Антенны и фидеры. Сборник задач с формулами и решениями. Томск: ТУСУР, 2012. 236 с.

14. Стещенко С.А. Синтез антенны вытекающих волн по заданному распределению поля на апертуре // Радиопизика и радиоастрономия. 2013. Т. 18. № 4. С. 373-380.

15. Останков А.В., Юдин В.И. Синтез гребенчатого полотна антенны вытекающей волны с заданным направлением излучения и максимальной эффективностью // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2011. Т. 7. № 5. С. 157-161.

16. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В., Сиренко Ю.К. Планарная антенна дифракционного излучения КВЧ диапазона // Электромагнитные волны и электронные системы. 2011. Т. 16. № 6. С. 53-61.

17. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. Плоские антенные решетки с косекансной формой диаграммы направленности 8-миллиметрового диапазона волн // Электромагнитные волны и электронные системы. 2003. Т. 8. № 10. С. 52-58.

18. 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.

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

20. Плоскостная антенна дифракционного излучения радиолокационного комплекса миллиметрового диапазона / П.Н. Мележик, Ю.Б. Сидоренко, С.А. Провалов и др. // Известия вузов. Радиоэлектроника. 2010. Т. 53. № 5. С. 12-21.

21. Евдокимов А.П., Крыжановский В.В. Дифракционные явления в антеннах вытекающих волн // Антенны. 2003. №3-4 (70-71). С. 50-56.

22. Weiland T.A. Discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields // Electronics and Communication. 1977. V. 31. No. 3. PP. 116-120.

23. Александров Н.Л., Виниченко Ю.П. О некоторых методах расчета конечных волноводных решеток // Радиотехника и электроника. 1991. Т. 36. № 10. С. 1939-1945.

24. Резонансные свойства системы планарный диэлектрический волновод - гребенка / В.В. Крыжановский, С.В. Крыжановский, С.А. Стещенко, О.В. Чистякова // Радиопизика и электроника. 2008. Т. 13. № 3. С. 481-488.

25. URL: <https://www.ulprospector.com/plastics/en/datasheet/246711/preperm-255> (дата обращения 11.12.2021).

26. URL: <https://www.preperm.com/products/stock-shapes/> (дата обращения 11.12.2021).

Поступила 08.01.2022; принята к публикации 21.02.2022

Информация об авторах

Крюков Дмитрий Юрьевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kryukovdy@bk.ru

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

Чернышев Антон Юрьевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), ассистент, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, 29Б), e-mail: chernyshev.antog@yandex.ru

Дашян Сергей Юрьевич — д-р физ.-мат. наук, профессор, профессор лаборатории им. Поля Пенлеве, Университет Лилля (Bâtiment M2, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve-d'Ascq, Франция), e-mail: sergeui.dachian@univ-lille1.fr

IMPROVEMENT OF DIRECTIVITY CHARACTERISTICS OF DIFFRACTION RADIATION ANTENNA BY VARYING PROFILE OF RADIATING OPENING

D.Yu. Kryukov¹, A.V. Ostankov¹, A.Yu. Chernyshev^{1,2}, S.Yu. Dachian³

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²International Institute of Computer Technology, Russia

³University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France

Abstract: ensuring the effective operation of most modern radio engineering systems in the microwave and EHF ranges is impossible without the use of antennas with a high efficiency, capable of forming highly directional beams of the directional pattern in space. The problem of providing the required width of the main lobe of the directional pattern at a low level of side radiation can be solved by realizing the optimal amplitude distribution of the field in the aperture. The article discusses a diffraction-type leaky wave antenna, which is an open radiating transmission line and contains a planar dielectric waveguide, shielded by a metal resonant comb-type grating. Antennas of this type are characterized by a high efficiency, and the required amplitude distribution in the aperture can be formed due to the longitudinal variation of the aiming distance - the gap between the dielectric waveguide and the comb grating. To establish the best regularity of changing the sighting distance, we used an original version of the energy calculation method, adapted to the conditions of the problem under consideration. According to the proposed method, the determination of the degree and direction of variation of the aiming distance is reduced to the problem of calculating the share of the power taken by each groove of the comb grating according to a given amplitude distribution in the aperture. The article presents the basic relationships that form the basis of the methodology. We found that the non-

uniform profile of the distribution-radiating system allows improving the initial directivity of the antenna by increasing the degree of radiation concentration within the main lobe of the antenna pattern and reducing the level of the side lobes, as well as increasing the antenna gain. We established that when the sighting distance is changed in accordance with the theoretically found regularity, it is possible to reduce the level of side lobes and simultaneously increase the gain in comparison with the case of a fixed sighting distance

Key words: antenna, air gap, periodic array, diffraction radiation, simulation

Acknowledgments: the study was funded by RFBR and CNRS, project number 20-51-15001

References

1. Maiskaya V. "On the way to achieving the submillimeter wavelength range", *Electronics: Science, Technology, Business (Elektronika: Nauka, tekhnologiya, biznes)*, 2013, no. 6, pp. 44-58.
2. Yakushenko S.A. "High-speed transport networks of radio communication in the millimeter wave range", *Proc. of the II National Sci. Conf. Radioengineering, Optical and Biotechnical Systems. Information Processing Devices and Methods (Radiotekhnicheskie, opticheskie i biotekhnicheskie sistemy. Ustroystva i metody obrabotki informatsii: sb. dokl. II vseros. nauch. konf.)*, Saint Petersburg, 2021, pp. 185-192.
3. Evdokimov A.P. "Diffraction radiation antennas", *Physical Bases of Instrumentation (Fizicheskiye osnovy priborostroyeniya)*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 108-124.
4. Kryukov D.Yu., Ostankov A.V. "Reflexive analysis of opportunities and main constructive and technical characteristics of antennas of diffraction radiation on the basis of the periodic slowing down structures", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2017, vol. 13, no. 1, pp. 95-103.
5. Evdokimov A.P., Mazur V.Z., Sirenko K.Yu., Sirenko Yu.K. "Diffraction radiation antennas based on trough transmission lines", *Physical Bases of Instrumentation (Fizicheskiye osnovy priborostroyeniya)*, 2018, vol. 7, no. 1, pp. 24-36.
6. Shestopalov V.P. "Physical foundations of the millimeter and submillimeter waves technique. Vol. 2. Open structures" ("Fizicheskie osnovy millimetrovoy i submillimetrovoy tekhniki. Vol. 1. Otkrytye struktury"). Kiev, Naukova Dumka, 1985, 216 p.
7. Evdokimov A.P., Kryzhanovsky V.V. "A new direction in the technique of antenna arrays", *News of Higher Universities. Radioelectronics (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika)*, 1996, vol. 39, no. 9-10, pp. 54-61.
8. Kryukov D.Yu., Ostankov A.V. "Optimization of characteristics antenna of the diffraction radiation by a method of depth profiling one-dimensional quasi-periodic grating comb", *Proc. of the XXIII Int. Sci. and Tech. Conf.: Radio Location, Navigation, Communications*, 2017, vol. 3, pp. 1054-1060.
9. Ostankov A.V. "The diffraction leaky wave antenna with non-standard implementation of the radiating aperture", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 8, pp. 17-26.
10. Voskresenskiy D.I. ed. "Microwave and antenna devices. Design of phased antenna arrays" ("Ustroystva SVCH i anteny. Proektirovaniye fazirovannykh antennoykh reshetok"), Moscow: Radiotekhnika, 2012, 744 p.
11. Voskresenskiy D.I., Kanashchenkov A.I. eds. "Active phased antenna arrays" ("Aktivnyye fazirovannyye antennoye reshетки"), Moscow: Radiotekhnika, 2004, 487 p.
12. Kyung R. "Microwave antennas (ultra-high frequency antennas)" ("Mikrovolnovyye anteny (anteny sverkhvysokikh chastot)"), Leningrad, Sudostroenie, 1967, 517 p.
13. Goshin G.G. "Antennas and feeders. Task Book with Formulas and Solutions" ("Anteny i fidery. Sbornik zadach s formulami i resheniyami"), Tomsk, TUSUR, 2012, 236 p.
14. 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.
15. Ostankov A.V., Yudin V.I. "Synthesis of comb antenna aperture of the leaky wave with a given direction of radiation and of maximum efficiency", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2011, vol. 7, no. 5, pp. 157-161.
16. Evdokimov A.P., Kryzhanovsky V.V., Sirenko Yu.K. "A planar extremely high frequency diffraction radiation antenna", *Electromagnetic Waves and Electronic Systems (Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy)*, 2011, vol. 16, no. 6, pp. 53-61.
17. Evdokimov A.P., Kryzhanovsky V.V. "Flat antenna arrays with a cosecan shape of the beam pattern of the 8-millimeter wave range", *Electromagnetic Waves and Electronic Systems (Elektromagnitnye volny i elektronnyye sistemy)*, 2003, vol. 8, no. 10, pp. 52-58.
18. 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.
19. Ostankov A.V. "The analysis and optimization of a diffraction antenna of surface wave", *Antennas (Anteny)*, 2010, no. 9 (160), pp. 44-53.
20. Melezhik P.N., Sidorenko Y.B., Provalov S.A., Andrenko S.D., Shilo S.A. "Planar antenna with diffraction radiation for radar complex of millimeter band", *News of Higher Universities. Radioelectronics (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Radioelektronika)*, 2010, vol. 53, no. 5, pp. 12-21.
21. Evdokimov A.P., Kryzhanovsky V.V. "Diffraction phenomena in leaky wave antennas", *Antennas (Anteny)*, 2003, no. 3-4 (70-71), pp. 50-56.
22. Weiland T.A. "Discretization method for the solution of Maxwell's equations for six-component fields", *Electronics and Communication*, 1977, vol. 31, no. 3, pp. 116-120.
23. Aleksandrov N.L., Vinichenko Yu.P. "On some methods for calculating finite waveguide arrays", *Radioengineering and Electronics (Radiotekhnika i elektronika)*, 1991, vol. 36, no. 10, pp. 1939-1945.

24. Kryzhanovskiy V.V., Kryzhanovskiy S.V., Steshenko S.A., Chistyakova O.V. "Resonant properties of planar dielectric waveguide – lamellar grating system", *Radiophysics and Electronics (Radiofizika i elektronika)*, 2008, vol. 13, no. 3, pp. 481-488.
25. <https://www.ulprospector.com/plastics/en/datasheet/246711/preperm-255> (date of access 11.12.2021).
26. <https://www.preperm.com/products/stock-shapes/> (date of access 11.12.2021)

Submitted 08.01.2022; revised 21.02.2022

Information about the authors

Dmitriy Yu. Kryukov, graduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kryukovdy@bk.ru

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

Anton Yu. Chernyshev, graduate Student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: chernyshev.antog@yandex.ru

Sergey Yu. Dachian, Dr. Sc. (Physics and Mathematics), Professor, Paul Painleve Laboratory, University of Lille (Bâtiment M2, Cité Scientifique, 59655 Villeneuve-d'Ascq, France), e-mail: sergei.dachian@univ-lille1.fr

ИССЛЕДОВАНИЕ МАЛОГАБАРИТНОЙ УКВ-АНТЕННЫ ВИБРАТОРНОГО ТИПА С ПЛЕЧАМИ СПИРАЛЬНОЙ ФОРМЫ

В.И. Николаев¹, Ю.Г. Пастернак², В.А. Пендюрин³, С.М. Фёдоров²

¹АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

³АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи»,
г. Воронеж, Россия

Аннотация: предложена конструкция антенны на основе двухзаходной плоской Архимедовской спирали с плечами переменной ширины, предназначенной для использования в подземных условиях. Конструкция антенны позволяет уменьшить потери в грунте из-за значительной емкости между плечами спирали, хорошей изоляции плеч спирали по постоянному току и соленоидному характеру создаваемого магнитного поля. Потери в грунте являются существенным ограничивающим фактором для применения радиоустройств под землей, а методы борьбы с этими потерями рассматриваются во множестве исследований. В ходе численного моделирования были получены основные характеристики разработанной антенны: номограмма Вольперта-Смита, коэффициент отражения от входа, коэффициент полезного действия, при различном расположении антенны. Теоретические результаты были верифицированы с помощью натурных измерений макета, размещаемого в корпусе и без него. В результате проведенных исследований были установлены следующие характеристики антенны: центральная рабочая частота – 38.1 МГц, относительная ширина полосы рабочих частот – около 0.26%, среднее значение входного сопротивления – 6 Ом, суммарные потери в антенне при условии идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности – около 0.9 дБ

Ключевые слова: электрически малая антенна, спиральные антенны, спираль Архимеда

Введение

В настоящее время при разработке и эксплуатации радиопередающих и радиоприемных устройств, например, для бортовых и наземных систем связи, актуальными являются требования, связанные с минимизацией размеров этих технических средств, что открывает большие возможности для их практического использования. Активное развитие данной тематики связано не только с сугубо научным интересом к созданию минимально достижимого размера антенн, но и с развитием материаловедения и новыми технологическими возможностями по производству антенн, прогрессу в области прикладной вычислительной электродинамики, а также с возросшими вычислительными мощностями.

Первые работы, посвященные проектированию электрически малых антенн, появились в середине 20 века [1, 2]. В это же время сформулированы исключительно важнейшие фундаментальные ограничения на основные параметры электрически малых антенн [3–6], не подвергавшиеся сомнению вплоть до публикации [7], появившейся в 1996 году, в которой по-

ставлены под сомнения установленные ограничения [8]. В подтверждение установленных ограничений можно привести доводы профессора D.M. Grimes из Пенсильванского университета [9,10]: размеры атома, по крайней мере, интуитивно составляют примерно 0,1 нм, а длина волны его излучения равна 500 нм. Таким образом, отношение размера атома к длине волны равно 1:5000. Иными словами, это в 500 раз меньше, чем соответствующий параметр для реально созданных на настоящий момент антенн [8].

В данной статье предлагается конструкция электрически малой антенны на основе двухзаходной плоской Архимедовской спирали с плечами переменной ширины.

Двухзаходная плоская спираль Архимеда

Основополагающей идеей использования двухзаходной плоской Архимедовской спирали с плечами переменной ширины в качестве электрически малой антенны УКВ диапазона является гипотеза о перспективности сочетания нижеперечисленных свойств антенного устройства для уменьшения влияния материальных параметров грунта на его характеристики (минимизации изменения величины входного со-

противления и значения коэффициента полезного действия, стабильности формы и параметров диаграммы направленности):

1) плечи спирали изолированы по постоянному току от стальной опорной стойки, что позволяет уменьшить величину токов, протекающих по опорной стойке, подстилающей поверхности и в грунте, а следовательно – уменьшить величину потерь мощности в грунте;

2) значительная величина емкости между плечами спирали способствует концентрации силовых линий электрического поля в непосредственной близости от спирали, благодаря чему существенная доля энергии электрического поля, главным образом – реактивного поля, сосредоточена в окрестности излучателя и является как-бы «отжатой» от подстилающей поверхности, что способствует уменьшению потерь в грунте;

3) спиральная форма плеч вибратора создает соленоидальное магнитное поле, при этом отношение энергии электрической компоненты поля, запасенной в непосредственной близости излучателя, к энергии магнитной компоненты поля уменьшается, что также благоприятствует снижению потерь в грунте, т.к. в подстилающей поверхности преобладают потери электрического характера.

На рис. 1 показана модель симметричного электрического вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда (медь, толщина – 0.2 мм), расположенного внутри полости сферической формы. Высота вибратора составляла 304 мм, период спирали – 23 мм, длина каждого из его плечей – 2610 мм.

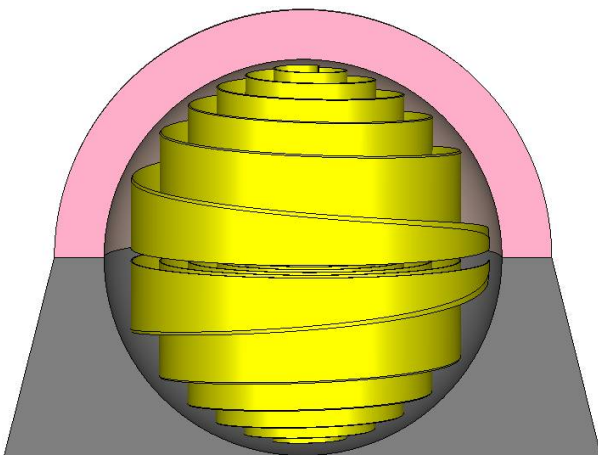


Рис. 1. Модель вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда

Проведенный численный анализ показал, что в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности центральная рабочая частота антенного устройства составляет 38.1 МГц, при этом относительная ширина полосы рабочих частот, ограниченная значением коэффициента отражения от входа антенны – 10 дБ, составляет около 0.26%. Среднее значение входного сопротивления – 6 Ом. Входные характеристики вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда приведены на рис. 2, 3. Расчетная величина суммарных потерь в антенне в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности составляет около 0.9 дБ, рис. 4.

При расположении конуса на стальном основании размерами 5×5 м² и параметрах грунта $\epsilon_{г.гр.} = 8$ и $\sigma_{г.гр.} = 0.005$ См/м значение КПД равно $\eta_{\Sigma} = -3.3$ дБ, рис. 5. В случае, если конус установлен непосредственно на грунте, КПД антенны уменьшается до $\eta_{\Sigma} = -9.1$ дБ, рис. 6.

Для сравнения отметим, что несимметричный вибратор с резонансной высотой 2 м, запитанный относительно стального основания с размерами 5×5 м², при засыпке его слоем грунта толщиной 0.8 м и параметрами $\epsilon_{г.гр.} = 8$ и $\sigma_{г.гр.} = 0.005$ См/м имеет значение КПД $\eta_{\Sigma} = -11.5$ дБ, т.е. вибратор с плечами в виде спирали Архимеда имеет значение КПД на 2.4 дБ выше, чем несимметричный вибратор резонансной высоты, в случае засыпки его грунтом, при одинаковом расстоянии от вершины конуса до грунта и от вершины несимметричного вибратора до грунта, равном высоте конуса 1.2 м.

Также отметим, что величина входного сопротивления вибратора с плечами в виде спирали Архимеда практически не изменяется в рассмотренных выше трех случаях (бесконечно проводящей подстилающей поверхности, стальном основании 5×5 м² и подстилающей поверхности с $\epsilon_{г.гр.} = 8$ и $\sigma_{г.гр.} = 0.005$ См/м), оставаясь равной 6 Ом, поэтому для питания антенны не требуется использование автоматического согласующего устройства (АСУ), в то время как активная часть входного сопротивления несимметричного вибратора изменяется приблизительно в 6 раз при засыпке его слоем грунта толщиной 0.8 м, что требует использования АСУ.

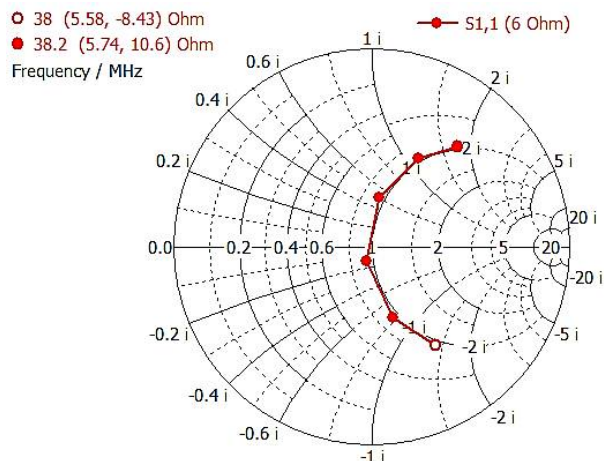


Рис. 2. Номограмма Вольперта-Смита вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности при волновом сопротивлении фидера 6 Ом

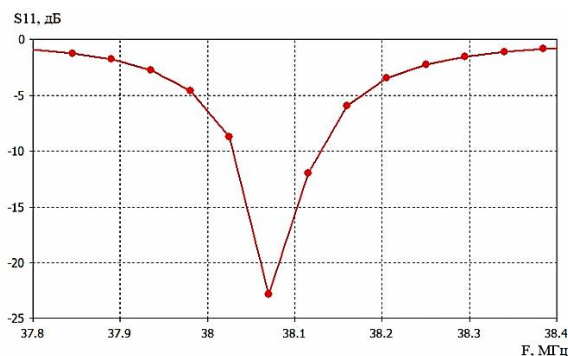


Рис. 3. Коэффициент отражения от входа вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности при волновом сопротивлении фидера 6 Ом

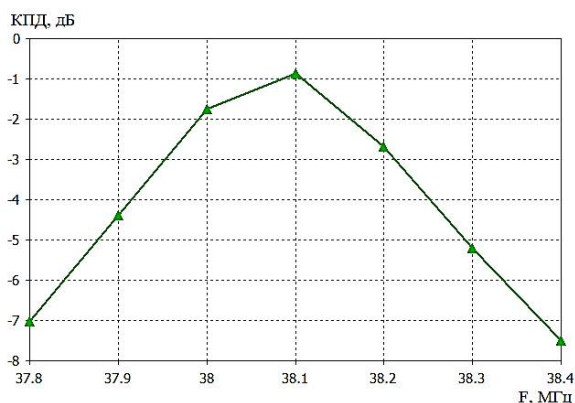


Рис. 4. Коэффициент полезного действия вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

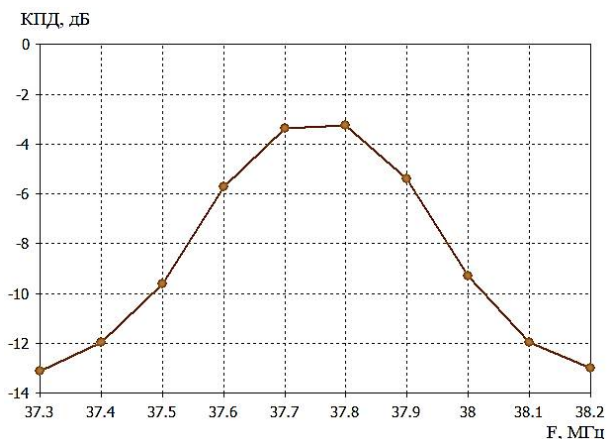


Рис. 5. Коэффициент полезного действия вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае расположении конуса на стальном основании с размерами $5 \times 5 \text{ м}^2$ и параметрами грунта $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$

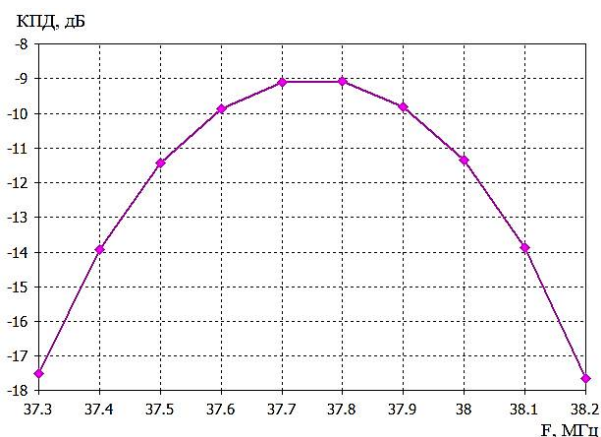


Рис. 6. Коэффициент полезного действия вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда в случае расположения конуса непосредственно на грунте с параметрами $\epsilon_{r \text{ гр.}} = 8$ и $\sigma_{\text{гр.}} = 0.005 \text{ См/м}$

Была разработана эскизная конструкторская документация для изготовления макета вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда, установленного в полости на вершине усеченного металлического конуса. На рис. 7 показан каркас жесткости для размещения в нем спирали, изготовленный методом фрезеровки из вспененного полистирола высокой плотности.

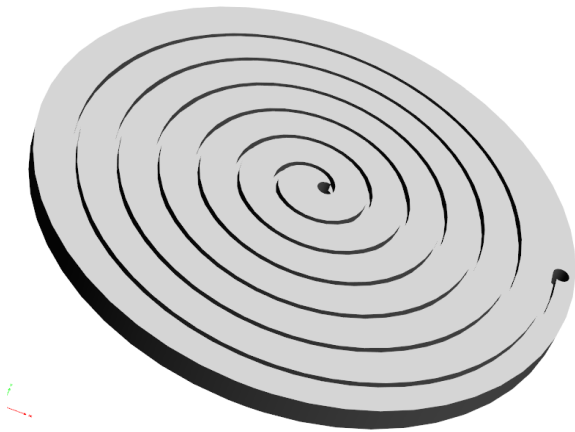


Рис. 7. Диэлектрический каркас для позиционирования плечей вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда

На рис. 8 показано фото вибратора, размещенного в диэлектрическом каркасе и установленного в полусферической полости со стенками из медного листа. Макет антенны, размещенной под полистироловым обтекателем на вершине усеченного металлического конуса, показан на рис. 9.

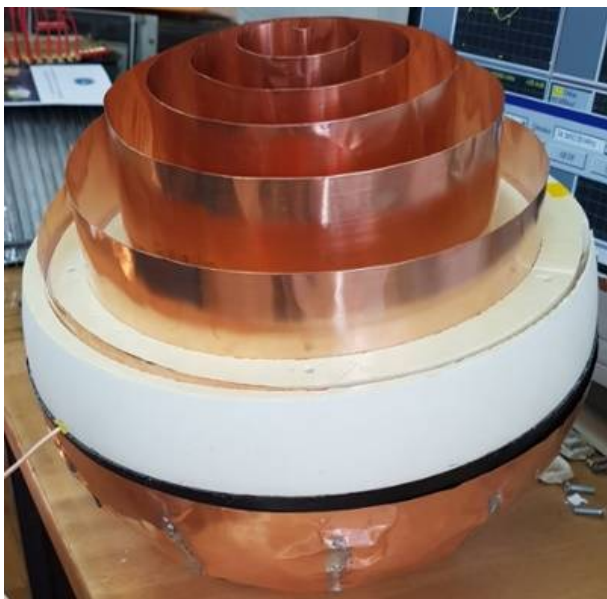


Рис. 8. Фотография макета вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда

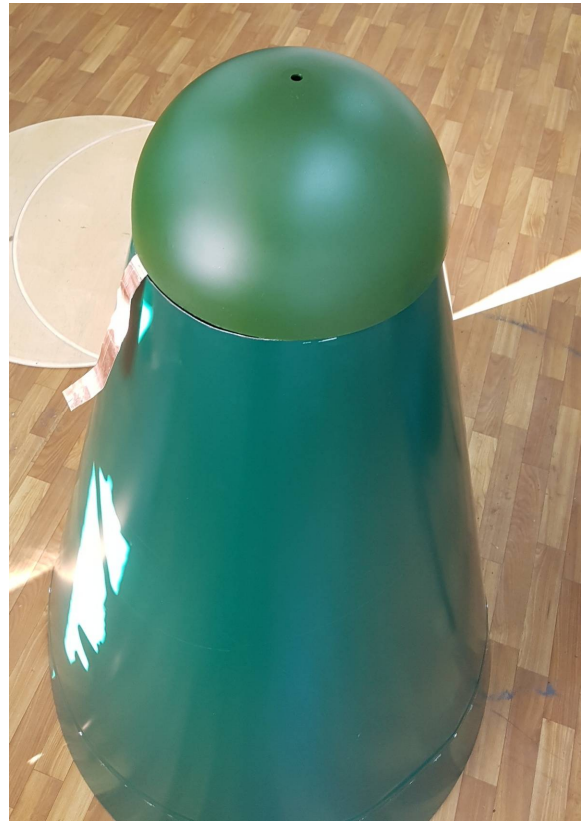


Рис. 9. Фотография макета вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда, размещенного под полистироловым обтекателем на вершине усеченного металлического конуса

Экспериментальные испытания макета антенны в полевых условиях показали, что частота резонанса вибратора составляет 32.6 МГц. При этом металлический конус был установлен на металлическую сетку с периодом 50 мм и размерами $5 \times 5 \text{ м}^2$.

При измерении коэффициента усиления антенны методом замещения в качестве эталонной антенны использовался четвертьволновый несимметричный вибратор с шунтовым питанием, в качестве подстилающей поверхности которого использовалась та же самая металлическая сетка. Было установлено, что коэффициенты усиления эталонной и анализируемой антенн приблизительно одинаковы, находясь в пределах погрешности измерения порядка нескольких десятых долей децибела.

Заключение

Таким образом, предложенная конструкция обладает центральной рабочей частотой антенного устройства равной 38.1 МГц, при этом относительная ширина полосы рабочих частот, ограниченная значением коэффициента отражения от входа антенны -10 дБ, составляет

около 0.26%. Среднее значение входного сопротивления – 6 Ом. Суммарные потери в антенне в случае идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности составляют около 0.9 дБ. Исследования показали, что величина входного сопротивления вибратора с плечами в виде спирали Архимеда практически не изменяется.

Литература

1. Wheeler H.A. Fundamental Limitations of Small Antennas // *Proc. IRE*. 1947. V. 35. P. 1479–1484.
2. Wheeler H.A. A Helical Antenna for Circular Polarization // *Ibid.* P. 1484–1488.
3. Chu L.J. Physical limitations of omni-directional antennas // *J. Appl. Phys.* 1948. Vol. 19. P. 1163–1175.
4. Harrington R.F. Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency // *J. Res. Nat. Bur. Stand.* 1960. Vol. 64D. № 1. P. 1–12.

5. Collin R.E., Rothschild S. Evaluation of antenna Q // *IEEE Trans. on Antennas and Propag.* 1964. Vol. 12. № 1. P. 23–27.
6. Fante R.L. Quality factor of general ideal antennas // *IEEE Trans. On Antennas and Propag.* 1969. Vol. 17. № 2. P. 151–155.
7. McLean J.S. A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas // *IEEE Trans. on Antennas and Propag.* 1996. Vol. 44. № 5. P. 672–675.
8. Беличенко В.П., Запасной А.С. Электрически малые антенны: проблемы, сомнения, новые результаты // Доклады ТУСУРа. 2011. № 2 (24). Ч. 1. С. 186–189.
9. Grimes D.M., Grimes C.A. Radiation Q of dipole-generated fields // *Radio Sci.* 1999. Vol. 34. № 2. P. 281–296.
10. Grimes D.M., Grimes C.A. Minimum Q of electrically small antennas. A critical review // *Microwave Opt. Tech. Lett.* 2001. Vol. 28. № 2. P. 172–177.

Поступила 01.12.2021; принята к публикации 21.02.2022

Информация об авторах

Николаев Валерий Иванович – д-р техн. наук, научный референт, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14), e-mail: nivis@mail.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Пендюрин Владимир Андреевич – генеральный директор, АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи» (394062, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, д. 108, офис 415), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

STUDY OF A SMALL-SIZED VHF ANTENNA OF VIBRATOR TYPE WITH SPIRAL ARMS

V.I. Nikolaev¹, Yu.G. Pasternak², V.A. Pendyurin³, S.M. Fyedorov²

¹JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³Research and Production Enterprise “Automated Communication Systems”, Voronezh, Russia

Abstract: we propose an antenna design based on a two-thread flat Archimedean spiral with arms of variable width, designed for use in underground conditions. The design of the antenna makes it possible to reduce losses in the ground due to the significant capacitance between the spiral arms, good DC isolation of the spiral arms and the solenoid nature of the generated magnetic field. Ground loss is a significant limiting factor for underground radio applications, and many studies have addressed these losses. In the course of numerical simulation, we obtained the main characteristics of the developed antenna: the Volpert-Smith nomogram, the reflection coefficient from the input, the efficiency with a different location of the antenna. We verified the theoretical results with the help of full-scale measurements of the layout, placed in the case and without it. As a result of the research, the following characteristics of the antenna were established: the central operating frequency is 38.1 MHz, the relative bandwidth of the operating frequencies is about 0.26%, the average value of the input impedance is 6 Ohm, the total losses in the antenna under the condition of a perfectly conductive and infinitely extended underlying surface – about 0.9 dB

Key words: electrically small antenna, spiral antennas, Archimedes spiral

References

1. Wheeler H.A. “Fundamental limitations of small antennas”, *Proc. IRE*, 1947, vol. 35, pp. 1479–1484.
2. Wheeler H.A. “A Helical antenna for circular polarization”, *Ibid.*, pp. 1484–1488.

3. Chu L.J. "Physical limitations of omni-directional antennas", *J. Appl. Phys.*, 1948, vol. 19, pp. 1163–1175.
4. Harrington R.F. "Effect of antenna size on gain, bandwidth, and efficiency", *J. Res. Nat. Bur. Stand.*, 1960, vol. 64D, no. 1, pp. 1–12.
5. Collin R.E., Rothschild S. "Evaluation of antenna Q", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, 1964, vol. 12, no. 1, pp. 23–27.
6. Fante R.L. "Quality factor of general ideal antennas", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, 1969, vol. 17, no. 2, pp. 151–155.
7. McLean J.S. "A re-examination of the fundamental limits on the radiation Q of electrically small antennas", *IEEE Trans. on Antennas and Propag.*, 1996, vol. 44, no. 5, pp. 672–675.
8. Belichenko V.P., Zapasnoy A.S. "Electrically small antennas: problems, doubts, new results", *Reports of TUSUR (Doklady TUSURa)*, 2011, part 1, no. 2 (24), pp. 186–189.
9. Grimes D.M., Grimes C.A. "Radiation Q of dipole-generated fields", *Radio Sci.*, 1999, vol. 34, no. 2, pp. 281–296.
10. Grimes D.M., Grimes C.A. "Minimum Q of electrically small antennas. A critical review", *Microwave Opt. Tech. Lett.*, 2001, vol. 28, no. 2, pp. 172–177.

Submitted 01.12.2021; revised 21.02.2022

Information about the authors

Valeriy I. Nikolaev, Dr. Sc. (Technical), Scientific Referent, «Concern «Sozvezdie» (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: nivis@mail.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Vladimir A. Pandyurin, General Director, JSC RPE "Automated Communication Systems" (of. 415, 108 Peshe-Streletskaia str., Voronezh 394062, Russia), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

ПРОБЛЕМЫ РЕАЛИЗАЦИИ МЕТОДА МИКРОВОЛНОВОГО РАДИОМЕТРИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ ВНУТРЕННЕЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ТЕЛА СПОРТСМЕНОВ

Е.В. Турецкая, Н.В. Астахов, Д.А. Дежин, А.С. Демихова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: дается обзор методов неинвазивного измерения внутренней температуры тела спортсменов (в режиме реального времени). Несмотря на то, что существует множество вариантов измерения температуры тела для неактивных людей (например, оральные/ушные/височные/ректальные термометры), есть несколько вариантов измерения температуры тела для активных людей. Био-беспроводная технология была предложена в качестве потенциального метода мониторинга температуры тела у активных людей. Рассматриваются новые методы моделирования, основанные на существующих работах, для разработки более всеобъемлющей аналитической радиометрической модели в закрытой форме, которая позволит точно определять абсолютную температуру внутренних органов тела человека. На данный момент не существует доступного, полностью универсального уравнения системы радиометра, которое адекватно учитывало бы все потенциальные температуры источника. Также ни в одном исследовании не рассматривалась ошибка, возникающая в результате использования упрощенных уравнений системы радиометра в отношении различных уровней изоляции системы. В связи с вышесказанным проблема анализа всех факторов, которые оказывают влияние на разработку такого уравнения, а также измерения внутренней температуры человека в реальном времени с точностью 0,1 градус – это важная и актуальная задача

Ключевые слова: методы неинвазивного измерения внутренней температуры тела человека, био-беспроводная технология измерения, радиометрия, проблемы построения универсального уравнения системы радиометра с требуемой точностью и шумоподавлением

Введение

Центр по контролю и профилактике заболеваний (CDC) опубликовал данные о тепловых заболеваниях, в которых подчеркивается, что ~29 госпитализаций в связи с тепловым ударом [1] и ~3 смерти, связанные с жарой [2], происходили каждый день в летние месяцы в США с 2000 по 2014 год. Глобальное потепление привело к тому, что все южные регионы России, Урал, многие сибирские регионы в последние годы столкнулись с такой же проблемой. Каждые несколько лет опасная жара приходит и в Москву, унося несколько жизней. Тепловой удар - наиболее тяжелая форма тепловой болезни, которая часто приводит к смерти, - считается полностью предотвратимым, если своевременно принять меры [1].

Показатели смертности, связанные с высокой температурой, приведены в таблице. В России такой подробной статистики нет, поэтому мы будем опираться на статистику США.

Последствия тепловых заболеваний и другие нежелательные последствия для здоровья привели к тому, что многие международ-

ные ассоциации врачей выступили с призывом к действию, определив четыре основные задачи в области технологий здравоохранения, призванные ускорить перевод научных исследований в пользу медицинских приложений [2].

Различные последствия тепловых заболеваний в Соединенных Штатах Америки (США)

Организация, от которой получены данные	Период наблюдения	Контрольные группы	Последствия для здоровья, связанные с жарой
Центр по контролю и профилактике заболеваний (CDC)	2000-2014	Граждане США	29 госпитализаций из-за теплового удара и связанных с ним смертей в день
	2006-2010		1,83 смерти в день
Национальный надзор за травмами, связанными со спортом в средней школе	2005-2019	Школьники США	Одна из главных причин смерти и инвалидности при занятии спортом на открытом воздухе
Ежегодный обзор футбольных травм	1995-2010	Игроки в Американский футбол	42 смерти, связанные с жарой

Четырьмя главными задачами в области медицинских технологий являются: (1) ис-

пользование информации в режиме реального времени для поддержки самостоятельного управления здоровьем и благополучием и содействия своевременным медицинским вмешательствам, (2) оптимизация лечения для отдельных лиц посредством ранней диагностики, прогнозирования для конкретного пациента и основанного на фактических данных вмешательства, (3) повышение точности и минимизация инвазивности хирургии, лучевой терапии и других физических вмешательств и (4) поддержка разработки новых методов лечения для повышения эффективности, минимизации затрат и снижения риска для пациентов. В этой работе будут рассмотрены основные проблемы (1) и (2) с использованием микроволновой радиометрической термометрии для беспроводного неинвазивного мониторинга температуры под кожей, который может позволить использовать методы вмешательства, помогающие предотвратить смерть, связанную с тепловыми заболеваниями.

Постановка задачи и методы измерения внутренней температуры тела

Хотя имеется множество вариантов измерения температуры тела для неактивных людей (например, оральные/ушные/височные/ректальные термометры [4]), существует несколько вариантов измерения температуры тела для активных людей. Био-беспроводная технология была предложена в качестве потенциального метода мониторинга температуры тела у активных людей [1]. Современные коммерчески доступные био-беспроводные решения включают в себя внутреннюю термометрию тела (например, желудочно-кишечные радиозонды) или беспроводную термометрию (например, инфракрасные (ИК) датчики [4]). Хотя технология применения беспроводного ИК-термометра отличается повышенной портативностью, эта технология ограничена тем, что она предоставляет информацию о температуре только с поверхности кожи.

Радиозонд (GI) обеспечивает снятие температуры желудочно-кишечного тракта, которую можно принять как хорошее представление о внутренней температуре тела [1, 4]. Хотя радиозонд GI точно передает изменения температуры тела, его применение ограничено как стоимостью ~2500 рублей за однократное использование, так и инвазивностью человека,

которому приходится глотать и выводить радиозонд через пищеварительную систему [4].

В этой статье рассматривается микроволновая радиометрическая термометрия для выполнения беспроводного неинвазивного мониторинга температуры тела. Микроволновая радиометрическая термометрия является перспективным методом измерения внутренней температуры тела, поскольку она сочетает в себе преимущества как беспроводной термометрии, так и методов внутренней термометрии тела и обеспечивает средства для беспроводной неинвазивной внутренней термометрии тела. Микроволновый радиометрический термометр не только дает более полную информацию о глубине температуры внутреннего тела (в отличие от ИК-датчиков, определяющих температуру кожи), но и является менее инвазивным по своей природе (по сравнению с применяемыми в настоящее время радиоприемниками GI).

Проблемы в определении внутренней температуры тела с помощью микроволнового радиометра

Микроволновый радиометр - это чувствительный приемник, предназначенный для пассивного измерения изменений излучения (порядка 10-16 Вт), исходящего от исследуемого материала. Пассивное измерение температуры сталкивается с тремя основными проблемами: (1) трудность, связанная с разрешением незначительных изменений температуры объекта, (2) точность измерения связана с тем, насколько хорошо известна измерительная система, и (3) насколько хорошо радиометрическая модель правильно характеризует испытуемый материал.

Чтобы лучше проиллюстрировать проблемы, связанные с измерением небольших изменений в тепловых излучениях, исходящих от человеческого тела, рассмотрим этот пример с типичной радиометрической системой с полосой пропускания 100 МГц и общим коэффициентом усиления 100 дБ. На рис. 1 показаны небольшие изменения излучения, исходящего от тела, и соответствующая выходная мощность радиометра для этих изменений. Излучение, получаемое от человеческого тела при температуре 37,05 °C, равно $4,282 \times 10^{-13}$ Вт. После того, как эта излучаемая человеческим телом энергия принимается антенной и проходит через систему радиометра, мощность радиометра составляет $4,282 \times 10^{-3}$ Вт. Если

требуется обнаружить изменение температуры на $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ΔT), то радиометр должен будет обнаружить изменение мощности $1,380 \times 10^{-16}$ Вт от человеческого тела, что соответствует изменению мощности радиометра $1,380 \times 10^{-6}$ Вт. Этот пример подчеркивает тот факт, что выходная мощность, возникающая в результате изменений излучения, исходящего от тела, все еще относительно невелика даже после усиления на 100 дБ входной мощности (в 10 миллиардов раз больше входной мощности). Сложность пассивного определения внутрен-

ней температуры тела с помощью микроволнового радиометра еще более возрастает из-за неопределенности электрических свойств испытуемого материала, характеристик устройства, свойств антенны и надлежащего моделирования распространения электромагнитных волн в стратифицированных средах. Наличие этих неопределенностей может сделать практически невозможным способностью радиометра определить изменения внутренней температуры тела на $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

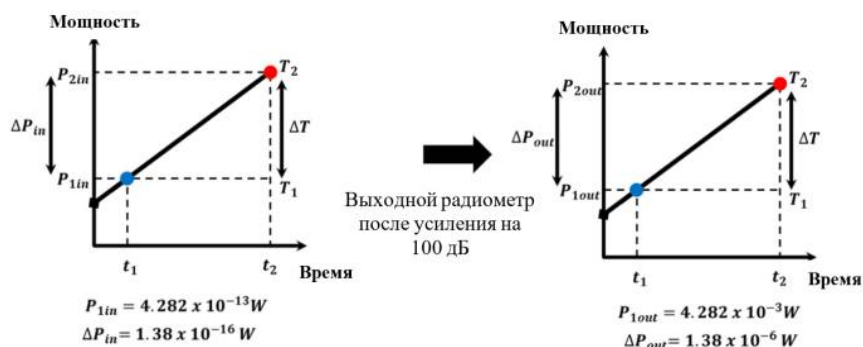


Рис. 1. Пример изменений излучения (изменения мощности) от человеческого тела и результирующего выходного сигнала после прохождения излучения через микроволновый радиометр с коэффициентом усиления 100 дБ. Пример предполагает начальную температуру T_1 $37\text{ }^{\circ}\text{C}$ (соответствующую входной мощности $P_{in} = 4,282 \times 10^{-13}$ и выходной мощности $P_{out} = 4,282 \times 10^{-3}$) с изменением температуры ΔT на $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$. Изменение температуры на $0,18\text{ }^{\circ}\text{C}$ соответствует изменению мощности $\Delta P_{in} = 1,38 \times 10^{-16}$ Вт на входе радиометра и $\Delta P_{out} = 1,38 \times 10^{-6}$ Вт на выходе радиометра

Если бы радиометр был идеальной системой, то выходная мощность была бы в точности равна коэффициенту усиления мощности, умноженному на входную мощность ($P_{out}^{ideal} = A \cdot P_{in}$). Однако, поскольку идеальная радиометрическая система не существует в реальных измерительных приложениях, существует некоторая неопределенность в работе производительности системы ($P_{out}^{actual} = A \cdot [1 \pm \Delta Gain] \cdot P_{in} \cdot [1 \pm \Delta Gain]$, где $\Delta Gain$ - неопределенность коэффициента усиления, а ΔP_{in} - неопределенность входной мощности). Эту неопределенность в электрическом поведении системы необходимо смоделировать, чтобы предсказать, как должен вести себя результирующий выходной сигнал. Аналогичным образом, поскольку микроволновая радиометрия является полностью пассивным методом измерения, необходимо знать предварительные данные о рассеянии и излучении в слоях тканей человеческого тела, чтобы точно соотнести электромагнитное (ЭМ) поведение слоёв ткани тела с пассивным измерением абсолютной температуры под кожей. Это означает, что как диэлектрическая проницаемость, так и

толщина материала должны быть точно известны, чтобы предсказать абсолютную температуру по скрытому слою.

Заключение и выводы

Эти вышеупомянутые проблемы требуют создание всеобъемлющей радиометрической модели, которая способна решить проблемы, связанные с пассивным измерением температуры под кожей. Разработка такой модели, которая позволит преодолеть эти проблемы – единственно возможный способ решения всех поставленных в данной статье проблем. Другими словами, моделируется электромагнитное поведение (ЭМ) всего разнообразия микроволновых (МВ) термометров.

Эффективность комплексной радиометрической модели подтверждается сравнением с контролируемым измерением внутренней температуры тела с помощью физически и электрически точного испытательного стенда, имитирующего ткани человеческого тела. Анатомия комплексной аналитической радиометрической модели закрытой формы состоит

из следующих подсистем, показанных на рис. 2: (А) калибровка радиометра и моделирование системных уравнений, (Б) моделирование антенны, (В) моделирование излучения, (Г) моделирование человеческого тела (которое представлено имитирующей тканью испытательным стендом) и (Σ) комбинация подсистем (А) - (Д) для достижения неинвазивного определения внутренней температуры тела. В частности, будут преследоваться следующие цели (рис. 2):

(А) калибровка радиометра и моделирование системных уравнений, которое включает коррекцию сигнала, поступающего с выхода радиометра на вход антенны;

(Б) моделирование антенны, которое включает в себя поправку на излучение антенны;

(С) моделирование переноса излучения, которое включает коррекцию от поверхности кожи до последнего интересующего слоя;

(Д) имитирующее ткань человека моделирование, которое включает моделирование электромагнитных свойств ткани;

(Σ) точное неинвазивное определение внутренней температуры тела, которое включает в себя полное моделирование системы для точного определения внутренней температуры на выходе радиометра.



Рис. 2. Представление комплексной аналитической радиометрической модели замкнутой формы.

Путь Σ - полное моделирование системы для точного определения внутренней температуры на выходе радиометра.

Путь А - коррекция с выхода радиометра на вход. Путь В - коррекция с выхода радиометра на вход антенны.

Путь С - коррекция от поверхности кожи до последнего интересующего слоя. Путь D - моделирование человеческого тела (которое представлено имитирующей тканью испытательным стендом)

Литература

1. National Environmental Public Health Tracking Network // *State Hospital Inpatient Discharge data*, C. f. D. C. a. Prevention, Ed., ed.
2. National Center for Health Statistics // Centers for Disease Control and Prevention.
3. Byrne C. and Lim C.L. The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications // *British Journal of Sports Medicine*. 2007. Vol. 41. Pp. 126-133.

4. Nichols A.W. Heat-related illness in sports and exercise // *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*. 2014. Vol. 7. Pp. 355-365.

5. Методы расчета радиочастотных помех на основе передаточной функции / Башкиров А.В., Демикова А.С., Астахов Н.В., Долженко М.В., Елкин Д.Р. // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2021. Т. 17. № 1. С. 50-55.

6. Bongers C.C.W.G., Hopman M.T.E., and Eijssvoegels T.M.H. Using an Ingestible Telemetric Temperature Pill to Assess Gastrointestinal Temperature During Exercise // *Journal of Visualized Experiments: JoVE*. 2015. P. 53258.

Поступила 10.01.2022; принята к публикации 21.02.2022

Информация об авторах

Турецкая Елена Викторовна – ассистент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kibr@vorstu.ru

Астахов Николай Владимирович – канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-8574>

Дежин Денис Александрович - студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru

Демикова Аlesia Сергеевна – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kpr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

PROBLEMS OF IMPLEMENTATION OF THE METHOD OF MICROWAVE RADIOMETRIC MEASUREMENT OF THE INTERNAL BODY TEMPERATURE OF ATHLETES

E.V. Turetskaya, N.V. Astakhov, D.A. Dezhin, A.S. Demikhova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: this paper provides an overview of the methods of non-invasive measurement of the internal body temperature of athletes (in real time). Despite the fact that there are many options for measuring body temperature for inactive people (for example, oral/ear/temporal/rectal thermometers), there are several options for measuring body temperature for active people. Bio-wireless technology has been proposed as a potential method for monitoring body temperature in active people. The article discusses new modeling methods based on existing works to develop a more comprehensive analytical radiometric model in a closed form, which will accurately determine the absolute temperature of the internal organs of the human body. At the moment, there is no fully universal equation of the radiometer system available that would adequately take into account all potential source temperatures. Also, no study has considered the error resulting from the use of simplified equations of the radiometer system in relation to different levels of system isolation. In connection with the above, the task of analyzing all the factors that influence the development of such an equation and the problem of measuring a person's internal temperature in real time with an accuracy of 0.1 degrees is an important and urgent task

Key words: methods of non-invasive measurement of the internal temperature of the human body, bio-wireless measurement technology, radiometry, problems of constructing a universal equation of the radiometer system with the required accuracy and noise reduction

References

1. "National environmental public health tracking network," *State Hospital Inpatient Discharge data*, C. f. D. C. a. Prevention
2. "National center for health statistics," Centers for Disease Control and Prevention.
3. Byrne C., Lim C.L. "The ingestible telemetric body core temperature sensor: a review of validity and exercise applications," *British Journal of Sports Medicine*, 2007, vol. 41, pp. 126-133.
4. Nichols A.W. "Heat-related illness in sports and exercise," *Current Reviews in Musculoskeletal Medicine*, 2014, vol. 7, pp. 355-365.
5. Bashkurov A.V., Demikhova A.S., Astakhov N.V., Dolzhenko M.V., Elkin D.R. "Methods for calculating radio frequency interference based on the transfer function", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 1, pp. 50-55
6. Bongers C.C.W.G., Hopman M.T.E., Eijssvogels T.M.H. "Using an ingestible telemetric temperature pill to assess gastrointestinal temperature during exercise," *Journal of Visualized Experiments: JoVE*, 2015, pp. 53258.

Submitted 10.01.2022; revised 21.02.2022

Information about authors

Elena V. Turetskaya, Assistant, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kpr@vorstu.ru

Nikolay V. Astakhov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7156-8574>

Denis A. Dezhin, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru

Alesia S. Demikhova, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kpr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2948-3240>

ИССЛЕДОВАНИЕ И ОБЗОР МЕХАНИЗМОВ БАЛАНСИРОВКИ НАГРУЗКИ НА ОСНОВЕ SDN В 5G/IMT-2020

Б. Данешманд, Л.А. Ту

Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики
и оптики, г. Санкт-Петербург, Россия

Аннотация: ожидается, что рост числа мобильных устройств и потребность в пользовательских данных к 2030 году окажут беспрецедентное давление на текущую мобильную сеть. У будущих мобильных сетей должно быть несколько требований в отношении объема данных, задержки, качества обслуживания и опыта, мобильности, спектра и энергоэффективности. Поэтому в последнее время начались усилия по созданию более эффективных решений для мобильных сетей. С этой целью балансировка нагрузки привлекла большое внимание как многообещающее решение для более эффективного использования ресурсов, повышения производительности системы и снижения эксплуатационных расходов. Это эффективный способ сбалансировать трафик и уменьшить перегрузку в гетерогенных сетях в будущих сетях 5G / IMT-2020. Балансировка нагрузки - одна из наиболее важных задач, необходимых для максимального повышения производительности, масштабируемости и надежности сети. В настоящее время с появлением программно-конфигурируемых сетей (SDN) балансировка нагрузки для SDN стала важной проблемой в будущей сети 5G / IMT-2020. SDN позволяет использовать программируемые балансировщики нагрузки и обеспечивает гибкость для разработки и реализации стратегий балансировки нагрузки. В этом обзоре мы выделяем методы балансировки нагрузки на основе сетей SDN и предполагаемые требования к балансировке нагрузки в сетях 5G

Ключевые слова: балансировка нагрузки, программно-конфигурируемые сети, SDN, 5G / IMT-2020

Введение

Сеть пятого поколения (5G / IMT-2020) была запущена в 2018 году в Южной Корее [1]. Цель 5G - обеспечить высокую пропускную способность, уменьшить задержку, увеличить пропускную способность. Спрос на трафик данных со стороны пользователей мобильного широкополосного доступа рос за последние несколько лет. Сети 5G предназначены для поддержки мобильных широкополосных подключений и миллиардов устройств M2M, а также сверхнадежных устройств связи с малой задержкой в будущем [2]. Базовые станции 5G оптимизированы для поддержки малых задержек для таких устройств. Кроме того, согласно ежегодному прогнозу Cisco, количество пользователей Интернета в мире достигнет 5,3 миллиарда в 2023 году. Более того, по прогнозам Cisco, к 2023 году будет 14,7 миллиарда M2M-подключений. Следовательно, операторы должны разработать эффективную обработку данных в 5G, учитывая потенциал будущего роста использования данных и роста числа подписчиков. Безопасная инфраструктура существующих сетей и сервисы костей приводят к сложному, неэффективному распределению ресурсов и низкому использованию сетевых

ресурсов, особенно в беспроводных сетях. Различные методы балансировки нагрузки основаны на полезности поставщика услуг и удовлетворенности пользователей. Сеть 5G на основе SDN - еще одна область исследований для распределения ресурсов и подключения к ним в сети 5G. В этой статье представлен обзор балансировки нагрузки интеграции 5G с SDN. Программно-конфигурируемая сеть (SDN) - это развивающаяся архитектура, которая позволяет физически отделить панель управления сетью от уровня пересылки или уровня инфраструктуры, где панель управления управляет несколькими устройствами. Преимущества, предлагаемые SDN, включают автоматическую балансировку нагрузки, выделение ресурсов по запросу и возможность масштабирования сетевых ресурсов. Кроме того, SDN сокращает расходы на управление оборудованием и снижает затраты. Сети предоставляются без ручной настройки. Он предоставляет компаниям платформу для подготовки к новым технологиям, таким как облачные приложения, устройства Интернета вещей и приложения для работы с большими данными.

Балансировка нагрузки - это метод разделения рабочей нагрузки на несколько ресурсов во избежание перегрузки любых ресурсов [3]. Цели балансировки нагрузки - максимизировать пропускную способность, минимизировать

время отклика и оптимизировать трафик. Существенными и функциональными компонентами SDN являются протокол и контроллеры OpenFlow. Сетевой контроллер - это мозг архитектуры SDN. Он находится между сетевыми устройствами и приложениями. Он основан на операционных системах в вычислительной технике. В [4] контроллер определяется как программная абстракция, которая контролирует все функции любой сетевой системы. Он поддерживает контроль над сетью через интерфейсы, первый - южный интерфейс (например, OpenFlow), второй - северный интерфейс (например, API). Южный интерфейс абстрагирует функциональные возможности программируемых переключателей и подключает их к контроллеру. NOX - одна из первых общедоступных реализаций контроллера OpenFlow в Windows, Linux, Mac OS и других платформах. OpenFlow - первый из ведущих авторизованных коммуникационных интерфейсов, объединяющий уровни пересылки и управления в архитектуре SDN, обеспечивает прямой доступ и управление плоскостями пересылки на сетевом устройстве, таком как виртуальные или физические коммутаторы и маршрутизаторы. В этой статье мы сравниваем и рассматриваем алгоритмы балансировки нагрузки на основе SDN, выполняемые исследователями, и описываем преимущества и недостатки каждого метода. Балансировка нагрузки является важным компонентом сетевой инфраструктуры пятого поколения из-за растущего числа подключенных к Интернету устройств, ресурсы которых распределяются по широкому спектру систем и требуют подписки от конечных пользователей.

Архитектура SDN и обзор балансировки нагрузки на основе SDN

SDN Архитектура

SDN - это полностью программно конфигурируемая компьютерная сеть, в которой уровни управления самой сетью и передачей данных отделены друг от друга путем передачи функций управления отдельному устройству - сетевому контроллеру [3]. SDN определяется способностью динамически управлять поведением сети с помощью программного обеспечения через открытые интерфейсы. Основное отличие SDN от обычных сетей заключается в централизованном интеллектуальном управлении и мониторинге сети, что позволяет прове-

рять, контролировать и изменять передаваемые потоки данных.

Технология SDN направлена на решение следующих задач:

- Повышение эффективности механизмов управления пропускной способностью сети.
- Снижение капитальных и эксплуатационных затрат.
- Упрощение управления сетью и повышение уровня ее автоматизации.
- Ускорение и автоматизация процесса создания новых сервисов и их запуска.
- Повышение безопасности всей информационно-коммуникационной системы.
- Повышение эффективности маршрутизации.

Сетевая инфраструктура SDN должна быть построена в соответствии с открытыми протоколами. OpenFlow должен быть унифицированным и обеспечивать возможность реализации мультивендорных технических решений. Архитектура SDN разделена на три основных уровня, а именно: уровень инфраструктуры (плоскость пересылки), уровень управления (плоскость управления) и уровень приложения, объединенные друг с другом, как показано на рис. 1.

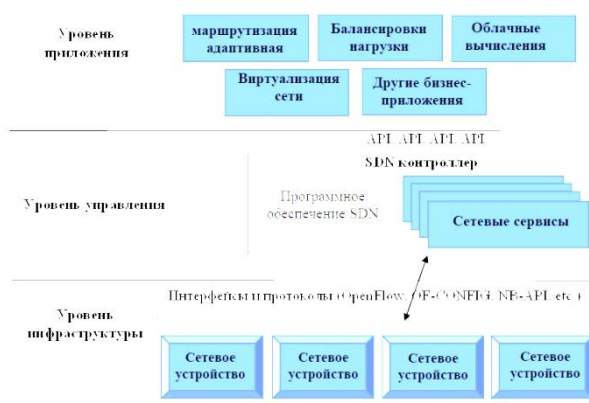


Рис. 1. Архитектура SDN

Балансировка нагрузки в SDN

Как правило, балансировка нагрузки обычно представляет собой отдельно развертываемую функцию в сети, которая распределяет нагрузку трафика между сетевыми путями (или элементами центра обработки данных) в соответствии с конкретными метриками оптимизации, такими как минимальная средняя нагрузка или стоимость канала.

Текущие решения для балансировки нагрузки эффективны, но предлагают ограниченную гибкость с точки зрения настройки. Благодаря технологии SDN балансировка нагрузки может быть интегрирована с любым элементом передачи в сети, например коммутатором OpenFlow, что устраняет необходимость в отдельных устройствах. Кроме того, SDN позволяет балансировать нагрузку для работы с любой степенью детализации потока.

Как работает балансировка нагрузки с помощью SDN? Балансировка нагрузки SDN удаляет протоколы на аппаратном уровне, чтобы улучшить управление сетью и диагностику. Балансировка нагрузки контроллера SDN принимает решения по управлению трафиком данных, не полагаясь на алгоритмы, определенные традиционным сетевым оборудованием. Балансировщик нагрузки на основе SDN экономит время работы, управляя всей сетью приложений и веб-серверами.

Методы балансировки нагрузки можно разделить на статические, динамические (распределенные и централизованные) или комбинированные (гибридные), как показано на рис. 2.

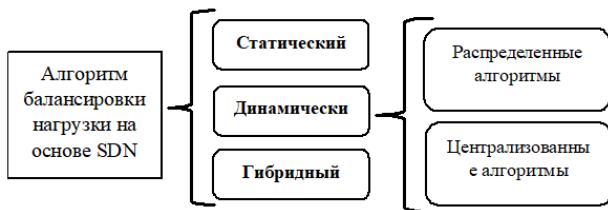


Рис. 2. Алгоритм балансировки нагрузки на основе SDN

А. Статическая балансировка нагрузки

В статическом алгоритме трафик равномерно распределяется между серверами. Статический алгоритм подходит для систем с небольшими изменениями нагрузки. Этот алгоритм должен иметь предварительную информацию из системных источников, чтобы гарантировать, что решение о переключении нагрузки не зависит от текущего состояния системы [6]. Однако алгоритмы статической балансировки нагрузки имеют недостаток, заключающийся в том, что задачи назначаются процессору или машине только после создания, а задачи не могут переноситься на любое другое устройство для балансировки нагрузки во время выполнения [7].

В. Динамическая балансировка нагрузки

Методы динамической балансировки нагрузки более эффективны, чем статические аналоги из-за динамического распределения предварительно запрограммированных шаблонов балансировки нагрузки [8], [9]. Правильная балансировка нагрузки имеет решающее значение для оптимизации минимального времени отклика, максимальной пропускной способности, минимального потребления ресурсов, масштабируемости и предотвращения перегрузки ресурсов. Метод динамической балансировки нагрузки может быть получен из двух методов.

1. В нераспределенном методе один узел (централизованный) получает все запросы и распределяет их по серверам. Централизованные контроллеры реализуют всю логику уровня управления в одном месте. В таком контроллере один сервер берет на себя все действия на уровне управления. Основными преимуществами этих контроллеров являются простота и управляемость, поскольку они обеспечивают единую точку управления. Однако они страдают от проблем с масштабируемостью, поскольку каждый сервер имеет ограниченную емкость для обработки устройств плоскости данных. Несколько распределенных алгоритмов упоминаются в следующих разделах.

- QoS-Aware алгоритм;
- Эвристические подходы;
- Балансировка нагрузки Wardrop.

2. В распределенном методе все узлы используются совместно с распределением запросов. Распределенный контроллер не имеет проблем с масштабируемостью и обладает преимуществом высокой производительности при больших нагрузках трафика. Существует несколько централизованных алгоритмов, упомянутых в следующих подразделах:

- Платформа управления маршрутизацией (RCP).
- Алгоритм балансировки нагрузки на базе сервера.
- Алгоритм DUTE.

С. Гибридная балансировка нагрузки

Эти методы используются для преодоления недостатков методов динамической и статической балансировки нагрузки, а также для сбора преимуществ и недостатков статических и динамических алгоритмов для разработки

нового метода [8]. Это означает, что объединение преимуществ двух или более существующих алгоритмов, динамического или статического алгоритма, может создать новый алгоритм.

Алгоритмы динамической балансировки нагрузки могут показаться более эффективными, чем статические, но они более сложны, поскольку учитывают текущее состояние системы. Эта сложность часто приводит к накладным расходам и неправильным решениям по балансировке нагрузки. Вот почему так важно получить полную картину механизма балансировки нагрузки, прежде чем выбирать балансировщик нагрузки.

Таблица 1

Сравните статические и динамические характеристики

Особенности балансировки нагрузки	Статическая балансировка нагрузки	Динамическая балансировка нагрузки
Распределение нагрузки	Во время компиляции	Во время выполнения
Стабильность	Более	Меньше
Сложность и стоимость	Меньше	Более
Надежность и время отклика	Меньше	Более
Предсказуемость	Легкая	Трудная
Перегрузка процессора и колебание состояния	-	Значительные
Утилизация ресурсов	Меньше	Более
Задержка связи	Меньше	Более

Важной и фундаментальной особенностью статических методов является предварительное знание системы. Правило программируется непосредственно в балансировщике нагрузки статическими методами, поскольку поведение пользователя непредсказуемо. Методы статической балансировки нагрузки в сети могут быть неэффективными. Динамические методы более эффективны, поскольку нагрузка распределяется динамически в соответствии с некоторыми запрограммированными шаблонами в балансировке нагрузки [23]. Правильная балансировка нагрузки помогает максимизировать масштабируемость, минимизировать время отклика, максимизировать энергопотребление, минимизировать потребление ресурсов, предотвратить перегрузку любого отдельного ресурса и многое другое. Основные качественные параметры для балансировки нагрузки в SDN представлены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры балансировки нагрузки

№	Параметры балансировки нагрузки	Описание
1	Среднее количество синхронизаций в минуту	Среднее количество синхронизаций состояния контроллера в минуту в SDN.
2	Накопленная частота	Индекс производительности, позволяющий оценить точность алгоритма.
3	Степень балансировки нагрузки	Показатель равномерности распределения нагрузки между объектами.
4	Потребление энергии	Количество потребляемой энергии в сети.
5	Время исполнения	Продолжительность выполнения программы.
6	Пересылка записей	Маршрутизаторы используют таблицу пересылки, чтобы принять решение об отправке пакета.
7	Гарантированная скорость передачи данных (GBR)	Один из параметров качества обслуживания (QoS) в сетях для обеспечения пропускной способности канала-носителя.
8	Задержка	Время, необходимое для пересылки пакета по сети.
9	Стоимость миграции	Она состоит из двух основных затрат: стоимости обмена сообщениями и стоимости загрузки. Некоторые сообщения должны передаваться между контроллерами для переключения миграции, например запросы на миграцию, запросы ролей и асинхронные сообщения.
10	Накладные расходы	Любое сочетание чрезмерного или косвенного времени вычислений, памяти, полосы пропускания или других ресурсов, необходимых для выполнения конкретной задачи, является накладным.
11	Скорость потери пакетов	Потеря пакетов происходит, когда один или несколько пакетов не достигают места назначения. Обычно это происходит из-за перегрузки сети. Это процент потерянных пакетов по сравнению с отправленными.

Продолжение табл. 2

12	Коэффициент пиковой нагрузки	Для измерения характеристик маршрута.
13	Доля согласованных потоков сроков	Этот параметр представляет процент потоков, удовлетворяющих крайнему сроку.
14	Использование ресурсов	Степень использования сетевых ресурсов, таких как использование канала, полосы пропускания, процессора и памяти.
15	Время отклика	Он определяется интервалом, который начинается от принятия запроса или задания до ответа на запрос или задачу для сервера.
16	Среднеквадратичная ошибка (RMSE)	Метрика для оценки производительности балансировки нагрузки. Лучшая производительность имеет меньшее RMSE.
17	Пропускная способность	Количество данных, правильно перемещенных из одного места в другое за определенный период.
18	Нагрузка	Объем работы, которую должен выполнить контролер. Чтобы сбалансировать рабочие нагрузки между контроллерами, были введены подходы к балансировке нагрузки.

Балансировка нагрузки может быть реализована в программном или физическом оборудовании. Выбранный метод будет зависеть от типа обслуживаемой службы или приложения, а также от состояния сети и серверов на момент запроса. Эти методы будут использоваться в комбинации для определения лучшего сервера для обслуживания новых запросов. Текущий уровень запросов к балансировщикам нагрузки часто определяет, какой метод используется. Когда нагрузка невелика, то достаточно одного из простых методов балансировки нагрузки. Во время высокой нагрузки более сложные методы обеспечивают равномерное распределение запросов [3, 10, 11].

Балансировка нагрузки в SDN приводит к обнаружению наилучшего пути и сервера для самой быстрой доставки запросов.

Балансировка нагрузки SDN имеет следующие преимущества:

- Более низкая стоимость;

- Большая масштабируемость;
- Более высокая надежность;
- Гибкость в настройке;
- Уменьшено время на развертывание;
- Автоматизация;
- Возможность построить сеть без какого-либо программного/аппаратного обеспечения конкретного производителя.

Для оптимизации сетевого потока и достижения интеллектуальной балансировки нагрузки использовались различные методы и алгоритмы. Мы упомянули, что типы текущих методов балансировки нагрузки на основе SDN, которые используются в сетях пятого поколения, описаны ниже:

❖ Балансировка нагрузки мультиконтроллеров SDN

Единственный контроллер представляет собой проблему узкого места. Использование централизованного контроллера может ограничить масштабируемость и надежность, в то время как децентрализованные контроллеры в сетях SDN работают лучше. Таким образом, использование нескольких контроллеров станет жизненно важным решением для улучшения масштабируемости, надежности и возможностей плоскости управления. Чтобы повысить производительность балансировки нагрузки, важно использовать контроллеры с несколькими SDN вместо централизованных контроллеров [12, 13, 14].

❖ Балансировка нагрузки сервера (SLB)

Серверная балансировка нагрузки (SLB) развертывает один балансировщик нагрузки перед несколькими серверами. Таким образом, можно разумно распределить нагрузку на несколько серверов, чтобы полностью использовать ресурсы сервера. В [11] авторы предлагают стратегию балансировки нагрузки для распределения запросов клиентов по нескольким серверам. Балансировка нагрузки сервера обеспечивает сетевые службы и доставку контента с использованием ряда алгоритмов балансировки нагрузки.

ИТ-команды все чаще полагаются на балансировщики нагрузки на серверы, здесь мы упомянули некоторые преимущества балансировки нагрузки сервера (SLB):

- Повышение масштабируемости;
- Резервирование;

- Обслуживание и производительность.

❖ **Выбор различных ссылок. Балансировка нагрузки**

Система активно контролирует качество с точки зрения задержки, потери пакетов и джиттера, а также пропускную способность с точки зрения пропускной способности каналов и направляет трафик на наиболее подходящий канал на основе бизнес-намерений, определенных как политика. Этот метод увеличивает масштабируемость и эффективное использование сетевых ресурсов. В [15] авторы предложили алгоритм оптимизации пути динамической балансировки нагрузки (DLPO), основанный на SDN, полезный для сетевых топологий центров обработки данных. Алгоритм с несколькими каналами может быстро сбалансировать нагрузку на каналы в сети, чтобы исключить перегруженные пути [15, 16, 17].

❖ **Балансировка нагрузки на основе искусственных нейронных сетей**

Искусственные нейронные сети (ИНС) прогнозируют спрос и, таким образом, распределяют ресурсы в соответствии с этим спросом. Таким образом, ИНС всегда поддерживают активные серверы в соответствии с текущим спросом, что приводит к более низкому энергопотреблению, чем консервативный подход с избыточным выделением ресурсов. Кроме того, высокое использование серверов приводит к большему энергопотреблению, сервер, работающий с более высоким коэффициентом использования, может обрабатывать больше рабочих нагрузок с аналогичным энергопотреблением. Использование метода искусственной нейронной сети (ANN), основанного на SDN в балансировке нагрузки, связано с тем, что этот метод способен категоризировать и выбирать входные данные в указанные группы или заранее определенные пути с основной ролью в балансировке нагрузки [18, 19, 20, 21].

❖ **Балансировка нагрузки в стандарте IEEE 802.11 (беспроводные каналы связи)**

Стандарт IEEE 802.11 указывает, что клиентское устройство решает, к какой точке доступа подключаться. В средах с высокой плотностью пользователей выбор клиентского устройства для подключения к одной точке до-

ступа может привести к перегрузке точки доступа [22]. Это также может привести к колебаниям в ассоциации AP, поскольку клиентское устройство имеет ограниченные данные о производительности сети. Алгоритмы, развернутые на контроллере SDN, могут динамически балансировать нагрузку точек доступа (AP), выбирая менее загруженные из области совместного использования для ассоциации клиента.

Исследование методов балансировки нагрузки

Несколько методов и алгоритмов могут применяться с использованием нескольких методов организации очередей в методах балансировки нагрузки в сети. Выбранный метод будет зависеть от типа обслуживаемой службы или приложения, а также от состояния сети и серверов на момент запроса. Описанные ниже методы будут использоваться в комбинации для определения лучшего сервера для обслуживания новых запросов. Текущий уровень запросов к балансировщикам нагрузки часто определяет, какой метод используется. Когда нагрузка невелика, то достаточно одного из простых методов балансировки нагрузки. Во время высокой нагрузки используются более сложные методы для обеспечения равномерного распределения запросов. Программная балансировка нагрузки (SLB) обычно предлагается как контроллер доставки приложений (ADC), который работает на стандартном сервере или виртуальной машине. Аппаратное устройство балансировки нагрузки (HLD) - это автономное оборудование, на котором выполняется программное обеспечение балансировки нагрузки.

Обычно он разворачивается как часть пары на случай отказа одного устройства балансировки нагрузки. Программная балансировка нагрузки предлагает те же функции, что и HLD, но не требует специального устройства балансировки нагрузки. Программное обеспечение для балансировки нагрузки может работать на обычном сервере или даже на виртуальном сервере. В табл. 3 мы упомянули преимущества и недостатки каждого метода.

Таблица 3

Характеристики SLB и HLB

SLB (БАЛАНСИРОВКА НАГРУЗКИ НА ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ) ¹	
ПРЕИМУЩЕСТВА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ	НЕДОСТАТКИ ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ
- Гибкое внедрение. - Большая масштабируемость для балансировки нагрузки программного обеспечения. - Уменьшение затрат на балансировку нагрузки через облако.	- При масштабировании сверх начальной емкости может возникнуть некоторая задержка при настройке программного обеспечения балансировки нагрузки. - Текущие расходы на обновления.
HLB (БАЛАНСИРОВКА НАГРУЗКИ НА АППАРАТНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ) ²	
АППАРАТНЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА	АППАРАТНЫЕ НЕДОСТАТКИ
- Высокая пропускная способность благодаря программному обеспечению, работающему на специализированных процессорах. - Повышенная безопасность, поскольку только организация может получить физический доступ к серверам. - Фиксированная стоимость после покупки.	- Требуется больше персонала и опыта для настройки и программирования физических машин. - Невозможность масштабирования при установленном ограничении количества подключений. В подключении отказано или обслуживание ухудшается до тех пор, пока не будут приобретены и установлены дополнительные машины. - Более высокая стоимость покупки и обслуживания физического балансировщика сетевой нагрузки. Владение аппаратным балансировщиком нагрузки также может потребовать платных консультантов для управления им

Таблица 4

Метод балансировки нагрузки

№	Методы балансировки нагрузки	Описание	С ³ / Д ⁴
1	Round Robin (RR)	Простой способ распределения клиентских запросов по группе серверов. Клиентский запрос пересылается каждому серверу по очереди.	С
2	Weighted Round Robin (WRR)	Основан на простом алгоритме балансировки нагрузки Round Robin для учета различных характеристик сервера приложений. Администратор назначает вес каждому серверу приложений на основе выбранных ими критериев, чтобы продемонстрировать способность серверов приложений обрабатывать трафик.	С
3	Least Connection	Алгоритм динамической балансировки нагрузки, при котором клиентские запросы распределяются на сервер приложений с наименьшим количеством активных соединений на момент получения клиентского запроса. В случаях, когда серверы приложений имеют аналогичные характеристики, сервер приложений может быть перегружен из-за более длительных подключений; этот алгоритм учитывает активную нагрузку на соединение.	Д
4	Weighted Least Connection	Основан на алгоритме балансировки нагрузки по наименьшему количеству подключений для учета различных характеристик сервера приложений. Администратор назначает вес каждому серверу приложений на основе выбранных ими критериев, чтобы продемонстрировать способность серверов приложений обрабатывать трафик.	Д
5	Software Defined Networking (SDN) Adaptive	SDN Adaptive - это алгоритм балансировки нагрузки, который объединяет знания уровней 2, 3, 4 и 7 и ввод от контроллера SDN для принятия более оптимизированных решений по распределению трафика. Это позволяет информации о статусе серверов, статусе запущенных на них приложений, работоспособности сетевой инфраструктуры и уровне перегрузки в сети играть роль в принятии решения о балансировке нагрузки.	Д

Балансировка нагрузки имеет жизненно важное значение для решения проблемы чрезмерного трафика в сети. Это было одно из первых привлекательных приложений в сетях SDN. Обычно следующие методы используются в комбинации для поиска лучшего сервера для ответа на новые запросы. В этом разделе мы рассмотрим некоторые из наиболее часто используемых подходов к балансировке нагрузки, которые кратко изложены в табл. 4.

¹Software Load Balancing

²Hardware Load Balancing

³Статический

⁴Динамический

Продолжение табл. 4

6	Fixed Weighting	Алгоритм балансировки нагрузки, при котором администратор назначает вес каждому серверу приложений на основе критериев по их выбору, чтобы продемонстрировать способность серверов приложений обрабатывать трафик. Сервер приложений с наибольшим весом получит весь трафик. Если сервер приложений с наибольшим весом выходит из строя, весь трафик будет направлен на следующий сервер приложений с наибольшим весом.	Д
7	Weighted Response Time	Алгоритм балансировки нагрузки, при котором время ответа серверов приложений определяет, какой сервер приложений получит следующий запрос. Время ответа сервера приложений на проверку работоспособности используется для расчета весовых коэффициентов сервера приложений. Сервер приложений, отвечающий быстрее всех, получает следующий запрос.	Д
8	Source IP Hash	Алгоритм, который объединяет исходный и целевой IP-адреса клиента и сервера для создания уникального хеш-ключа. Ключ используется для привязки клиента к определенному серверу. Поскольку ключ может быть повторно сгенерирован, если сеанс прерван, запрос клиента направляется на тот же сервер, который он использовал ранее. Это полезно, если важно, чтобы клиент подключился к сеансу, который все еще активен после отключения.	Д
9	Random	Как следует из названия, этот алгоритм сопоставляет клиентов и серверы случайным образом, то есть с использованием базового генератора случайных чисел. В случаях, когда балансировщик нагрузки получает большое количество запросов, случайный алгоритм сможет равномерно распределить запросы по узлам. Как и Round Robin, случайного алгоритма достаточно для кластеров, состоящих из узлов с аналогичной конфигурацией (ЦП, ОЗУ и т. д.).	Д

Выводы

В статье представлен обзор механизма балансировки нагрузки в SDN. Решения на основе SDN используются для обеспечения балансировки нагрузки в сетях 5G / IMT-2020. Были исследованы архитектура SDN и методы балан-

сировки нагрузки, которые подразделяются на три группы: динамические, статические и гибридные. В статье упоминаются существенные качественные параметры балансировки нагрузки в SDN.

Мы попытались рассмотреть типы методов балансировки нагрузки на основе SDN, которые используются в балансировке нагрузки. Кроме того, мы сравнили два метода SLB и HSL и исследовали преимущества и недостатки обоих. Основываясь на результатах наших предыдущих разделов, механизмы балансировки нагрузки на основе SDN обеспечивают обзор сети, поэтому эти методы обычно улучшают производительность системы по сравнению с традиционными подходами балансировки нагрузки.

В следующих работах мы сосредоточимся на практической реализации и сравнении различных методов балансировки в области сети 5G, чтобы мы могли достичь лучшего метода балансировки нагрузки в сетях следующего поколения (5G) путем сравнения и комбинирования различных алгоритмов.

Литература

1. Toward the network of the future: From enabling technologies to 5G concepts / D. Bega, M. Gramaglia, C.J. Bernardos Cano, A. Banchs, X. Costa-Perez // Trans Emerging Tel Tech. 2017.
2. Subburayalu N., Natarajan S. and Das D. Dynamic Load Balancing across Multi-radio Access Bearers in 5G // 11th International Conference on Communication Systems Networks (COMSNETS). Bengaluru, India, 2019, Pp. 306-311.
3. Load Balancing Mechanisms in the Software Defined Networks: A Systematic and Comprehensive Review of the Literature / A.A. Neghabi, N. Jafari Navimipour, M. Hosseinzadeh and A. Rezaee // IEEE Access. 2018. Vol. 6. Pp. 14159-14178.
4. Survey of Promising Technologies for 5G Networks / Nam Tuan Le, Mohammad Arif Hossain, Amirul Islam, Doyun Kim, Young-June Choi, Yeong Min Jang // Mobile Information Systems. 2016. vol. 2016, Article ID 2676589. 25 p.
5. Open Networking Foundation (ONF). URL: <https://opennetworking.org>.
6. Nadeem Shah and Farik M. Static Load Balancing Algorithms In Cloud Computing: Challenges Solutions // International Journal of Scientific Technology Research. 2015. 4. Pp. 365-367.
7. Yadav A.V. and Mohammad F. Different Strategies for Load Balancing in Cloud Computing Environment: A Critical Study. 2014. Vol. 3. Is. 1. Pp. 85-90.
8. Milani A.S. and Jafari N. Load balancing mechanisms and techniques in the cloud environments Systematic literature review and future trends // NetwComput. Appl., 2016. Vol. 71. Pp. 86-98.
9. Chen S., Chen Y., and Kuo S. CLB: A novel load balancing architecture and algorithm for cloud services // Comput. Electr. Eng. 2017. Vol. 58. Pp. 154-160.

10. Mustafa Hasan Al.B., Nurul A.Z., Z. Zainal Abidin Load balancing algorithms in software defined network // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE), 2019. Vol. 7. Is. 6S5. Pp. 686-692.
11. Intelligent Load Balancing Techniques / S. Thabo, M. Thabiso, A. Stephen, K. Kefalotse, D. Setso, B. Gabanthone, S. Seth // Software Defined Networks: A Survey" Electronics 9. 2020. № 7: 1091.
12. Reliable and load balance-aware multi-controller deployment in SDN / T. Hu, P. Yi, J. Zhang and J. Lan // China Communications. 2018. vol. 15. № 11. Pp. 184-198.
13. Sridev K., Saifulla M.A. Multi Controller Load Balancing in Software Defined Networks: A Survey // Advances in Decision Sciences, Image Processing, Security and Computer Vision. Learning and Analytics in Intelligent Systems. Springer. Cham. Vol 3. Pp. 417-425.
14. Load-Balancing Multiple Controllers Mechanism for Software-Defined Networking / YW. Ma, JL. Chen, YH. Tsai, et al. Wireless // Pers Commun 94, 3549-3574(2017).
15. Lan Y., Wang K. and Hsu Y. Dynamic load-balanced path optimization in SDN-based data center networks // 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP), Prague, Czech Republic. 2016. Pp. 1-6.
16. Hopps C. RFC2992: Analysis of an Equal-Cost Multi-Path Algorithm. RFC Editor. USA. 2000.
17. An Effective Path Load Balancing Mechanism Based on SDN / J. Li, X. Chang, Y. Ren, Z. Zhang and G. Wang // IEEE 13th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications. Beijing. China, 2014. Pp. 527-533.
18. Cui Chen-xiao, and Xu Ya-bin Research on Load Balance Method in SDN // International Journal of Grid and Distributed Computing. 2016. Vol. 9. № 1. Pp. 25-36.
19. Pradana A.M., Purboyo T.W. and Latuconsina R. A simulation of load balancing in software defined network (SDN) based on Artificial Neural Networks method // ARPJ Journal of Engineering and Applied Sciences. 2020. Vol. 15. № 6.
20. Alex M.R. Ruelas and Christian Esteve Rothenberg. 2018. A Load Balancing Method based on Artificial Neural Networks for Knowledge-defined DataCenter Networking // Proceedings of the 10th Latin America Networking Conference (LANC '18). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, P. 106-109.
21. SDN Controller Load Balancing Based on Reinforcement Learning / Z. Li, X. Zhou, J. Gao and Y. Qin // IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS). Beijing. China. 2018. Pp. 1120-1126.
22. Yen L.H., Yeh T.T., Chi K.H. Load balancing // IEEE 802.11 networks. IEEE Internet Comput. 2009. № 13. Pp. 56-64.
23. Ghosh, Anish, Mrs. T. Manoranjitham. A study on load balancing techniques in SDN // International Journal of Engineering Technology [Online], 7.2.42018:174-177.

Поступила 10.12.2021; принята к публикации 15.02.2022

Информация об авторах

Бехруз Данешманд – аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49), e-mail: daneshmandbehrooz@gmail.com

Ту Ле Ань – аспирант, Санкт-Петербургский национальный исследовательский университет информационных технологий, механики и оптики (197101, Россия, г. Санкт-Петербург, Кронверкский пр., 49), e-mail: leanhtutcdt@gmail.com

STUDY AND REVIEW OF SDN-BASED LOAD BALANCING MECHANISMS IN 5G / IMT-2020

B. Daneshmand, L.A. Tu

Saint Petersburg State University of Information Technologies, Mechanics and Optics, St. Petersburg, Russia

Abstract: the growing number of mobile devices and the demand for user data by 2030 are expected to put pressure on the current mobile network in an unprecedented way. Future mobile networks must have several requirements regarding data amount, latency, quality of service and experience, mobility, spectrum, and energy efficiency. Therefore, efforts have recently begun for more efficient mobile network solutions. To this end, load balancing has attracted much attention as a promising solution for greater resource utilization, improved system performance, and reduced operating costs. This is an effective way to balance traffic and reduce congestion in heterogeneous networks in future 5G/IMT-2020 networks. Load Balancing is one of the most critical tasks required to maximize network performance, scalability, and robustness. Nowadays, with the emergence of Software-Defined Networking (SDN), Load Balancing for SDN has become a significant issue in future network 5G/IMT-2020. SDN allows for programmable load balancers and provides the flexibility to design and implement load balancing strategies. In this survey, we highlight the methods of load balancing based on SDN networks and prospective load balancing requirements on 5G networks

Key words: load balancing, software defined networking (SDN), 5G/IMT-2020

References

1. Bega D., Gramaglia M., Bernardos Cano C.J., Banchs A., Costa-Perez X. "Toward the network of the future: From enabling technologies to 5G concepts", *Trans Emerging Tel Tech.*, 2017.
2. Subburayalu N., Natarajan S., Das D. "Dynamic load balancing across multi-radio access bearers in 5G," *11th International Conference on Communication Systems Networks (COMSNETS)*, Bengaluru, India, 2019, pp. 306-311.
3. Neghabi A.A., Jafari Navimipour N., Hosseinzadeh M., Rezaee A. "Load balancing mechanisms in the software Defined networks: a systematic and comprehensive review of the literature," *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 14159-14178
4. Nam Tuan Le, Mohammad Arif Hossain, Amirul Islam, Do-yun Kim, Young-June Choi, Yeong Min Jang "Survey of promising technologies for 5G networks", *Mobile Information Systems*, 2016, vol. 2016, Article ID 2676589, pp. 25
5. Open Networking Foundation (ONF), available at: <https://opennetworking.org>.
6. Shah N., Farik M. "Static load balancing algorithms in cloud computing: challenges solutions", *International Journal of Scientific Technology Research*, 2015, vol. 4 (2015), pp. 365-367
7. Yadav A.V., Mohammad F. "Different strategies for load balancing in cloud computing environment: a critical study," 2014, vol. 3, issue 1, pp. 85-90
8. Milani A.S., Jafari N. "Load balancing mechanisms and techniques in the cloud environments Systematic literature review and future trends", *J. NetwComput. Appl.*, 2016, vol. 71, pp. 86-98
9. Chen S., Chen Y., Kuo S. "CLB: a novel load balancing architecture and algorithm for cloud services", *Comput. Electr. Eng.*, 2017, vol. 58, pp. 154-160.
10. Mustafa Hasan Al.B, Nurul A.Z, Zainal Abidin Z. "Load balancing algorithms in software defined network," *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, April 2019, vol. 7, issue 6S5, pp.686-692.
11. Semong T., Maupong T., Anokye S., Kehulakae K., Dimakatso S., Boipelo G. Sarefo S. "Intelligent load balancing techniques in software Defined networks: a survey", *Electronics* 9, 2020, no. 7, pp. 1091.
12. Hu T., Yi P., Zhang J., Lan J. "Reliable and load balance-aware multi-controller deployment in SDN," *China Communications*, Nov. 2018, vol. 15, no. 11, pp. 184-198
13. Sridev K., Saifulla M.A. "Multi controller load balancing in software defined networks: a survey", *Advances in Decision Sciences, Image Processing, Security and Computer Vision. Learning and Analytics in Intelligent Systems*, vol 3. Springer, Cham, pp. 417-425
14. Ma Y.W., Chen J.L., Tsai Y.H. et al. "Load-balancing multiple controllers mechanism for software-Defined networking", *Wireless Pers Commun*, 2017, vol. 94, pp. 3549-3574.
15. Lan Y., Wang K., Hsu Y. "Dynamic load-balanced path optimization in SDN-based data center networks," *2016 10th International Symposium on Communication Systems, Networks and Digital Signal Processing (CSNDSP)*, Prague, Czech Republic, 2016, pp. 1-6
16. Hopps C. "RFC2992: Analysis of an Equal-Cost Multi-Path Algorithm", RFC Editor, USA, 2000.
17. Li J., Chang X., Ren Y., Zhang Z., Wang G. "An Effective path load balancing mechanism based on SDN", *2014 IEEE 13th International Conference on Trust, Security and Privacy in Computing and Communications*, Beijing, China, 2014, pp. 527-533.
18. Cui Chen-xiao, Xu Ya-bin "Research on load balance method in SDN," *International Journal of Grid and Distributed Computing*, 2016, vol. 9, no. 1, pp. 25-36
19. Andika Malraherawan Pradana, Tito Waluyo Purboyo, Roswan Latuconsina "A simulation of load balancing in software defined network (SDN) based on Artificial Neural Networks method," *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, March 2020, vol. 15, no. 6
20. Ruelas A.M.R., Rothenberg C.E. "A load balancing method based on Artificial neural networks for Knowledge-defined data center networking", *Proc. of the 10th Latin America Networking Conference (LANC '18)*, Association for Computing Machinery, New York, USA, 2018, pp. 106-109.
21. Li Z., Zhou X., Gao J., Qin Y. "SDN controller load balancing based on reinforcement learning", *2018 IEEE 9th International Conference on Software Engineering and Service Science (ICSESS)*, Beijing, China, 2018, pp. 1120-1126.
22. Yen L.H., Yeh T.T., Chi K.H. "Load balancing in IEEE 802.11 networks", *IEEE Internet Comput.* 2009, vol. 13, pp. 56-64
23. Anish G., Manoranjitham T. "A study on load balancing techniques in SDN", *International Journal of Engineering Technology*, 2018, no. 7.2.4, pp. 174-177.

Submitted 10.12.2021; revised 15.02.2022

Information about the authors

Behrooz Daneshmand, graduate student, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (49 Kronverkskiy ave., St. Petersburg 197101, Russia), e-mail: daneshmandbehrooz@gmail.com
Le Anh Tu, graduate student, St. Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics (49 Kronverkskiy ave., St. Petersburg 197101, Russia), e-mail: leanhtutcdt@gmail.com

ДВУХДИАПАЗОННАЯ ЩЕЛЕВАЯ АНТЕННА ДЛЯ СМАРТФОНА С ПОДДЕРЖКОЙ ТЕХНОЛОГИИ MIMO

А.М. Жихарев, Е.А. Ищенко, С.М. Фёдоров, И.А. Черноиваненко

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается многодиапазонная восьмипортовая MIMO антенная решетка для сетей четвертого (4G) и пятого (5G) поколений (sub-6 GHz), которая позволяет охватывать два спектральных диапазона. Для достижения многолучевого режима работы в углы печатной платы смартфона интегрированы двухэлементные ромбовидные излучатели с технологией подачи микрополосковых линий. В связи с доступностью изготовления рабочего прототипа антенны и простотой интеграции системы MIMO в печатную плату телефона разрабатываемая система MIMO 4x4 реализуется на основе щелевых антенн-излучателей. Для предложенной конструкции определены основные характеристики антенного элемента: возвратные потери (S-параметры), распределение поверхностных токов, диаграммы направленности. Для минимизации степени влияния неучтенных факторов были произведены измерения при экспериментальном исследовании, а также проведено сравнение характеристик антенны при моделировании и реальном исполнении. Для MIMO антенной решетки был определен коэффициент корреляции огибающей, а также коэффициент удельного поглощения, показавший безопасность применения конструкции для человека. Итоговые результаты моделирования показали, что ширина полосы импеданса каждого антенного излучателя составляет от 2.6 до 2.7 ГГц и от 3.45 до 3.8 ГГц, которые охватывают резонансные частоты 2.6 ГГц и 3.6 ГГц соответственно

Ключевые слова: технология MIMO, мобильная связь, мобильный телефон, 4G, 5G, излучатель, щелевая антенна, диаграмма направленности, влияние на человека, SAR

Введение

Развитие современных технологий мобильной связи позволяет улучшить качество получения информации из сети Интернет. Сети пятого поколения (5G) способны обеспечить высокоскоростной доступ в интернет с малой задержкой при получении данных, поддержку большого количества подключенных устройств на небольших расстояниях. Одной из самых главных технологий, которая позволяет достичь требуемых показателей, выступает MIMO [1].

Объектом исследования является MIMO антенная решетка, представляющая собой конструкцию, состоящую из четырех одиночных антенных элементов и восьми микрополосковых линий питания [2].

Целью данной работы является разработка многоканальной MIMO-антенны для мобильных телефонов текущего (LTE) и перспективного (5G) поколений систем связи с дальнейшим исследованием её влияния на пользователя.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующий ряд задач:

- выбор формы центрального антенного элемента;
- выбор конфигурации системы MIMO;
- моделирование центрального антенного элемента;

- моделирование конфигурации системы MIMO;
- исследование влияния конструкции на пользователя и SAR;
- создание рабочего прототипа антенны.

Конструкция антенны

Антенна представляет собой двухэлементный щелевой ромбовидный резонатор, построенный по печатной технологии (материал диэлектрика – Fr-4) [3].

Конструкция антенны приводится на рис. 1.

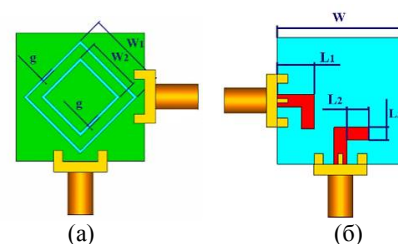


Рис. 1. Конструкция предлагаемого двухэлементного ромбовидного щелевого излучателя: а) вид сверху; б) вид снизу

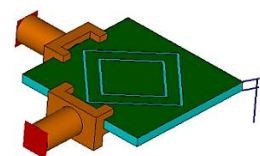


Рис. 2. Конструкция предлагаемого двухэлементного ромбовидного щелевого излучателя: вид сбоку

Значения параметров конструкции антенного излучателя

Параметр	Значение (мм)
W	24
W ₁	15
W ₂	10.5
g	0.5
L ₁	7
L ₂	4.2
L ₃	2.4
h	1.5

Резонансные частоты антенны в основном определяются длиной окружности используемых ромбовидных прорезей.

Первый резонанс (при 2.6 ГГц) зависит от окружности внешнего ромбовидного кольца.

Второй резонанс (при 3.6 ГГц) зависит от окружности внутреннего ромбовидного кольца.

Таким образом, длина окружности паза кольца должна удовлетворять диэлектрической длине волны в соответствующей частотной точке:

$$W_1/2 + g = \lambda_1, \quad (1)$$

$$W_2/2 + g = \lambda_2. \quad (2)$$

Применение конструкции с двумя ромбовидными резонаторами позволяет достичь двух рабочих диапазонов, что показывает график Return Loss (рис. 3).

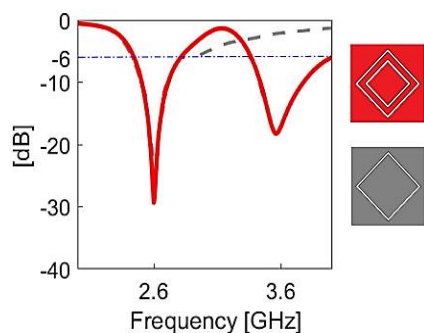


Рис. 3. Возвратные потери при использовании двух резонаторов (сплошная линия) и одного (пунктир)

Полученные результаты моделирования для одиночного антенного элемента с запиткой при помощи двух L-образных линий питания приводятся на рис. 4. При использовании предлагаемого варианта исполнения антенна не только имеет более широкую полосу импеданса, но также демонстрирует высокую изоляцию с низкой характеристикой взаимной связи (менее -20 дБ) в желаемом рабочем диапазоне частот.

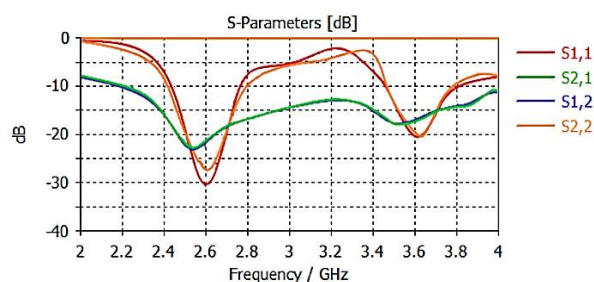
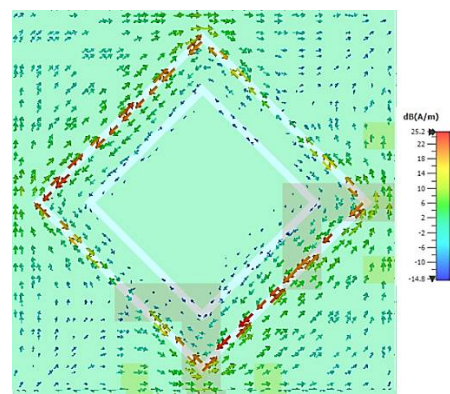
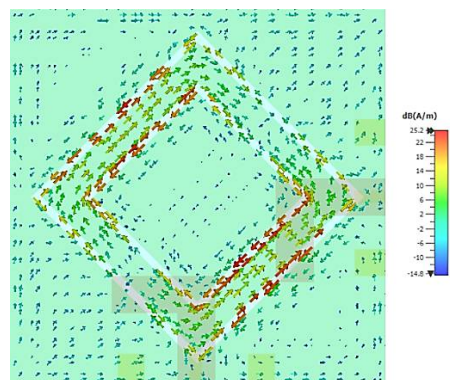


Рис. 4. График S-параметров для одиночного антенного элемента

Для наглядной демонстрации двухдиапазонного режима работы антенны на рис. 5 приведены картины поверхностных токов. По полученным результатам отчетливо видны два частотных резонанса (2.6 ГГц и 3.6 ГГц).



(а)



(б)

Рис. 5. Распределение тока при 2.6 ГГц (а) и 3.6 ГГц (б)

Поскольку разрабатываемая антенна предназначена для установки в печатную плату телефона, она должна обладать всесторонней диаграммой направленности, что позволяет обеспечить плавное подключение к базовым станциям [4]. Картины диаграмм направленности приводятся на рис. 6.

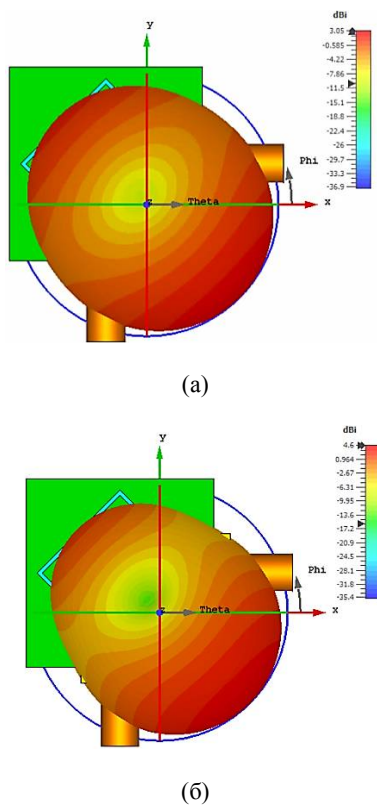


Рис. 6. Трехмерные изображения диаграмм направленности излучателя на 2.6 ГГц (а) и 3.6 ГГц (б)

Трехмерные диаграммы направленности на обеих рабочих частотах получились практически идентичными, имеют форму «гантелей» и обладают коэффициентом усиления 3-5 дБ.

Для реализации МИМО антенной решетки предлагается установить 4 антенных элемента по углам корпуса устройства (рис. 7), причем расстояния между антенными элементами: $W_{sub}=75$ мм; $L_{sub}=150$ мм [5].

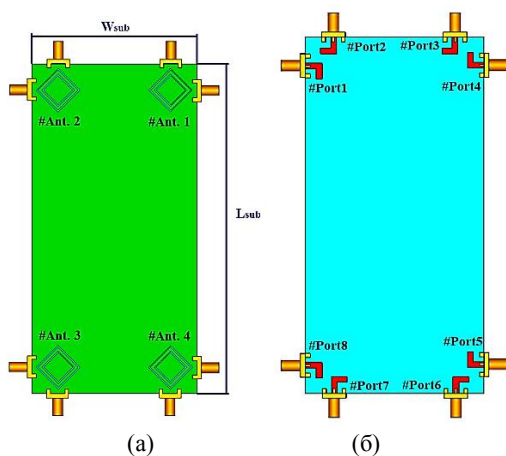


Рис. 7. Конфигурация предлагаемого массива МИМО: а) вид сверху; б) вид снизу

Важнейшим параметром МИМО антенной решетки выступает коэффициент корреляции огибающей [6]:

$$ECC = \frac{|S_{mm}^* S_{nm} + S_{mn}^* S_{nn}|^2}{(1 - |S_{mm}|^2 - |S_{mn}|^2)(1 - |S_{nm}|^2 - |S_{nn}|^2)^*} \quad (3)$$

На основе полученной конструкции был получен график коэффициентов корреляции (рис. 8).

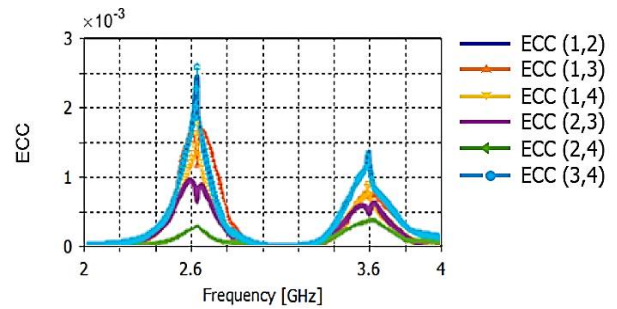


Рис. 8. Смоделированный коэффициент корреляции огибающей (ECC)

На основе полученных результатов видно, что корреляция мала. Таким образом, наблюдается соответствие требованиям стабильной работы МИМО антенной решетки.

Измерение параметров реальной антенны

Для сравнения характеристик антенны при моделировании и реальном исполнении была разработана модель антенны (рис. 9).

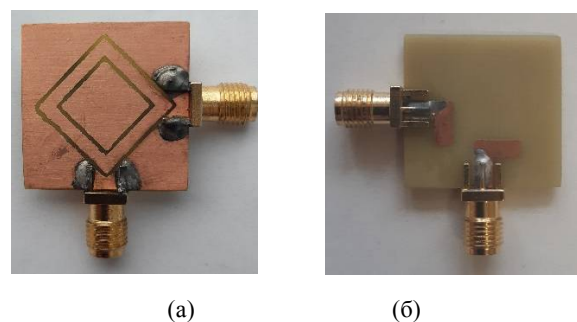


Рис. 9. Изготовленная антенна-излучатель: а) вид сверху; б) вид снизу

Результаты моделирования и измерения обратных потерь антенны-излучателя показаны на рис. 10. Как видно, при ширине полосы импеданса – 10 дБ антенна может покрывать полосы частот 2.5 – 2.7 ГГц и 3.45 – 3.8 ГГц с лучшими потерями во всех полосах. Кроме того, получено хорошее соответствие между моделированием и измерением. Незначительные

расхождения экспериментальных результатов связаны с тем, что диэлектрик FR-4 обладает высокими потерями, также стоит учитывать погрешность при вытравливании печатной платы и погрешность при монтаже прототипа.

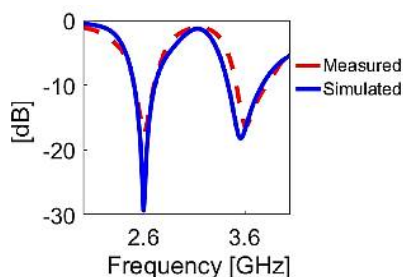


Рис. 10. График измеренных (пунктирная линия) и смоделированных (сплошная линия) обратных потерь двухэлементного ромбовидного щелевого излучателя

Исследование SAR для разработанной конструкции

В этом разделе выполняется моделирование характеристики удельной скорости поглощения (SAR). Рис. 11 и 12 иллюстрируют смоделированную характеристику SAR вблизи человеческой головы для разных резонансных частот. В ходе исследования соответствия требованиям стандарта SAR печатная плата смартфона располагалась на расстоянии менее 10 мм от головы пользователя.

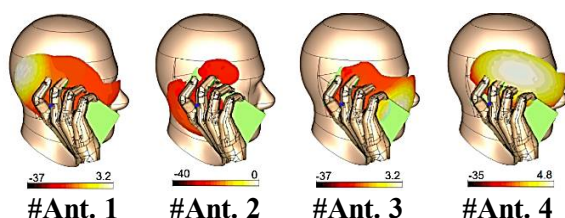


Рис. 11. Смоделированная удельная скорость поглощения (SAR) для каждого антенного элемента при 2.6 ГГц

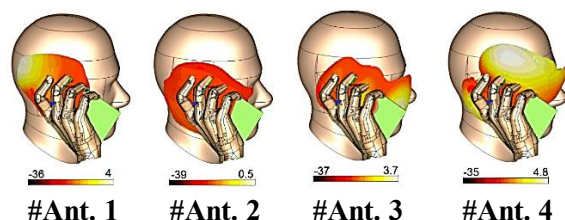


Рис. 12. Смоделированная удельная скорость поглощения (SAR) для каждого антенного элемента при 3.6 ГГц

Как показано, антенна имеет низкие значения SAR на 2.6 ГГц и 3.6 ГГц как в режиме покоя, так и в режиме разговора, что демонстрирует безопасность применения предложенной конструкции антенны для человека.

Заключение

В ходе выполнения работы была разработана многодиапазонная восьмипортовая антенна ММО для смартфонов будущего поколения, охватывающая два спектральных диапазона. Антенна подходит для текущего (4G) и перспективного (5G) поколений систем связи. Для достижения двухдиапазонности в углы печатной платы смартфона интегрированы двухэлементные ромбовидные щелевые излучатели с технологией подачи микрополосковых линий. Ширина полосы импеданса каждого излучателя составляет от 2.6 до 2.7 ГГц и от 3.45 до 3.8 ГГц, охватывающих резонансные частоты 2.6 ГГц и 3.6 ГГц соответственно. Все параметры удовлетворяют требованиям стандарта SAR, соответственно, разработанная конструкция является безопасной для пользователя.

Литература

1. MIMO Antenna Array for 5G Smartphone Application / Y. Liu, Y. Lu, Y. Zhang, S. Gong. 2019. P. 124 – 152. ID: 195222305.
2. Yoshimura Y. A Microstripline Slot Antenna// IEEE Trans. Microwave Theory and Tech. 1972. № 11. P. 760–762. DOI: 10.1109 / TMTT.1972.1127868.
3. 4G/5G Multiple Antennas for Future Multi-Mode Smartphone Applications/ Y.-L. Ban, C. Li, G. Wu, K.L. Wong// IEEE Access. 2016. № 4. P. 2981 – 2988. DOI: 10.1109 / ACCESS.2016.2582786.
4. Li Y., Luo Y., Yang G. Multiband 10-Antenna Array for Sub-6 GHz MIMO Applications in 5-G Smartphones// IEEE Access. 2018. № 6. P. 28041–28053. DOI: 10.1109 / ACCESS.2018.2838337.
5. Printed eight-element MIMO system for compact and thin 5G mobile handsets/ Z. Qin, W. Geyi, M. Zhang, J. Wang// Electron. Lett. 2016. № 52. P. 416 – 418. DOI: 10.1049 / el.2015.3960.
6. Nadeem Q.U.A., Debbah M., Alouini M.S. Design of 5G Full Dimension Massive MIMO Systems// IEEE Trans. Commun. 2018. № 66. P. 726 –740. DOI: 10.1109 / TCOMM.2017.2762685.
7. Low SAR phased antenna array for mobile handsets/ J. Moustafa, N.J. McEwan, R.A. Abd-Alhameed, P.S. Excell// Electromagn. Soc. J. 2006. № 21. P. 196 – 205.

Поступила 10.01.2022; принята к публикации 15.02.2022

Информация об авторах

Жихарев Александр Михайлович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия,

г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: gicharev98@mail.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Фёдоров Сергей Михайлович – канд. техн. наук, доцент кафедры радиоэлектронных устройств и систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

Черноиваненко Игорь Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

DUAL-BAND SLOT ANTENNA FOR SMARTPHONE WITH MIMO TECHNOLOGIES

A.M. Zhikharev, E.A. Ishchenko, S.M. Fyedorov, I.A. Chernoiivanenko

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers a multi-band eight-port MIMO antenna array for the fourth (4G) and fifth (5G) generation networks (sub-6 GHz), which allows one to cover two spectral ranges. To achieve multipath, two-element diamond-shaped emitters with microstrip line technology are integrated into the corners of the mobile phone's printed circuit board. Due to the availability of manufacturing a working prototype of the antenna and the ease of integration of the MIMO array into the printed circuit board of the smartphone, the MIMO 4x4 array being developed is implemented on the basis of slot antenna emitters. For the proposed design, we determined the main characteristics of the antenna element: return losses (S-parameters), distribution of surface currents, radiation patterns. To minimize the degree of influence of unaccounted factors, we measured the actual design, and compared the characteristics of the antenna during modeling and real experiment. For the MIMO antenna array, we determined the envelope correlation coefficient and the specific absorption coefficient, which showed the safety of the design for humans. The final simulation results showed that the impedance bandwidth of each antenna emitter ranges from 2.6 to 2.7 GHz and from 3.45 to 3.8 GHz, which cover the resonant frequencies of 2.6 GHz and 3.6 GHz, respectively

Key words: MIMO technology, mobile communication, mobile phone, 4G, 5G, emitter, slot antenna, radiation pattern, influence on a human, SAR

References

1. Liu Y., Lu Y., Zhang Y., Gong S. "MIMO antenna array for 5G smartphone application", 2019, pp. 124-152, ID: 195222305.
2. Yoshimura Y. "A microstripline slot antenna", *IEEE Trans. Microw. Theory and Tech.*, 1972, vol. 11, pp. 760–762, DOI: 10.1109 / TMTT.1972.1127868.
3. Ban Y.-L., Li C., Wu G., Wong K.L. "4G/5G multiple antennas for future multi-mode smartphone applications", *IEEE Access*, 2016, vol. 4, pp. 2981-2988, DOI: 10.1109 / ACCESS.2016.2582786.
4. Li Y., Luo Y., Yang G. "Multiband 10-antenna array for Sub-6 GHz MIMO applications in 5-G smartphones", *IEEE Access*, 2018, vol. 6, pp. 28041–28053, DOI: 10.1109 / ACCESS.2018.2838337.
5. Qin Z., Geyi W., Zhang M., Wang J. "Printed eight-element MIMO system for compact and thin 5G mobile handset", *Electron. Lett.*, 2016, vol. 52, pp. 416–418, DOI: 10.1049 / el.2015.3960.
6. Nadeem Q.U.A., Debbah M., Alouini M.S. "Design of 5G full dimension massive MIMO systems", *IEEE Trans. Commun.*, 2018, vol. 66, pp. 726–740, DOI: 10.1109 / TCOMM.2017.2762685.
7. Moustafa J., McEwan N.J., Abd-Alhameed R.A., Excell P.S. "Low SAR phased antenna array for mobile handsets", *Electromagn. Soc. J.*, 2006, vol. 21, pp. 196-205.

Submitted 10.01.2022; revised 15.02.2022

Information about the authors

Aleksandr M. Zhikharev, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: gicharev98@mail.ru

Evgeniy A. Ishchenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel. +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru

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

МОДЕЛИ СИММЕТРИЧНОГО ВИБРАТОРА В ЧАСТОТНОМ ДИАПАЗОНЕ

А.С. Разумихин, Ю.О. Филимонова, К.А. Лайко, Е.И. Алгазин

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация: рассмотрены математические модели симметричных вибраторов для заданных габаритных размеров в частотном диапазоне. Предложен переход входных импедансов, рассчитанных для различных относительных длин вибраторов, в частотный диапазон, что необходимо для дальнейшего исследования широкополосных вибраторных антенн. Рассмотрены классические выражения для расчета входных импедансов полуволнового вибратора в частотном диапазоне, а также модели вибратора в виде последовательного RLC контура, модернизированного RLC контура, где R задана как функция от частоты, и модель на длинных линиях. Предложенные модели достаточно точно описывают классические выражения входных импедансов вибратора. Данные модели рассматриваются для классического симметричного цилиндрического вибратора в дециметровом диапазоне длин волн. Описаны и приведены эквивалентные схемы математических моделей вибратора. Проведены сравнения рассчитанных входных импедансов вибратора в частотном диапазоне по предложенным моделям с классическими выражениями. Результаты расчета входных импедансов вибратора по предложенным моделям и классическим выражениям с высокой точностью в пределах 7-10% совпадают в 67% полосе частот. Данные модели позволяют произвести простой переход к построению двух-, трехконтурных моделей вибраторных антенн

Ключевые слова: симметричный вибратор, входной импеданс симметричного вибратора, математическая модель симметричного вибратора

Введение

В классической литературе, как в отечественной, так и зарубежной, рассматриваются цилиндрические металлические вибраторы в книгах Маркова, Сазонова [1], Айзенберга [2], Константина Баланиса [3], Томаса Милигана [4]. В литературе [3-4] есть примеры входных сопротивлений для разных соотношений длины плеча к диаметру от 200 до 2000 для гектаметровых, декаметровых и метровых диапазонов. В этих диапазонах в конструкциях вибраторных антенн используются цилиндрические проводники диаметром от 1 мм до 10 мм при достаточно большой длине вибратора (десятки метров). В книге [5] рассматриваются вибраторы с соотношением 20, 40, 60. Для дециметрового диапазона, в котором мы и рассматриваем модель вибратора, используются проводники диаметром не более 10 мм.

Электрическая и механическая длины плеча симметричного вибратора (рис. 1) приблизительно равны лишь в том случае, когда проводник плеча бесконечно тонок и находится в безвоздушном пространстве. Также на входной импеданс симметричного вибратора оказывает сильное влияние конструктивное исполнение точки питания антенны, никак не учитываемое в расчетных формулах. При практической раз-

работке антенн расчет входного импеданса антенны считают ориентировочно. Обязательным условием является дополнение теоретических расчетов экспериментальными исследованиями опытного образца [6].

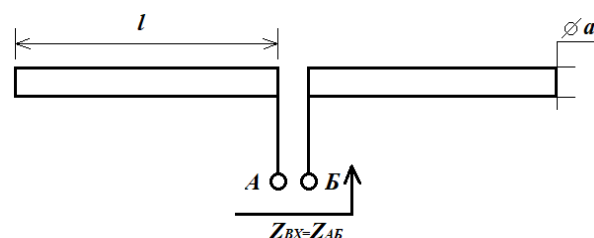


Рис. 1. Модель симметричного вибратора

В настоящей работе рассмотрены следующие модели и выражения, описывающие импеданс.

1. Классические выражения импедансов в частотном диапазоне.
2. Модель в виде последовательного RLC контура.
3. Модель модернизированного RLC контура, где R как функция от частоты.
4. Модель на длинных линиях.

Классические выражения импедансов в частотном диапазоне

Данная модель симметричного вибратора рис. 1 рассматривается в различных литера-

турных источниках как соотношение длины плеча l к диаметру a при фиксированной длине волн, но как наглядная модель она не вполне удобна, поэтому изменим ее. Построим графиче-

ки входного сопротивления вибратора (1) и сопротивления излучения как зависимость от частоты (2) (рис. 2).

$$Z_{BX} = \frac{R_{\Sigma}}{\cos\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot l}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{R_{\Sigma}}{W_B}\right)^2 + \sin\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot l}{c}\right)^2} - j \frac{W_B}{2} \frac{\sin 2\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot l}{c}\right)}{\cos\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot l}{c}\right)^2 \cdot \left(\frac{R_{\Sigma}}{W_B}\right)^2 + \sin\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot l}{c}\right)^2} \quad (1)$$

Z_{BX} - входное сопротивление симметричного вибратора.

R_{Σ} - сопротивление излучения, отнесенное к току в точках питания симметричного вибратора.

В нашем случае модель цилиндрического симметричного вибратора на центральной частоте 0.5 ГГц

$$R_{\Sigma} = \frac{Z_0}{2\pi} \int_0^{\pi} \frac{\left(\cos\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot l \cdot \cos \theta}{c}\right) - \cos\left(\frac{2\pi \cdot f \cdot l}{c}\right) \right)^2}{\sin \theta} \cdot d\theta, \quad (2)$$

где c - скорость света, l - длина плеча вибратора, f - частота.

Коэффициент отражения находится с помощью выражения (3):

$$\rho(f) = \frac{Z_{BX}(f) - R_B}{Z_{BX}(f) + R_B}, \quad (3)$$

где R_B - волновое сопротивление фидера (75 Ом).

Коэффициент стоячей волны (КСВ) (4):

$$КСВ(f) = \frac{1 + |\rho(f)|}{1 - |\rho(f)|}. \quad (4)$$

Реальная R_{BX} и мнимая части X_{BX} входного сопротивления симметричного вибратора представлены на рис. 2.

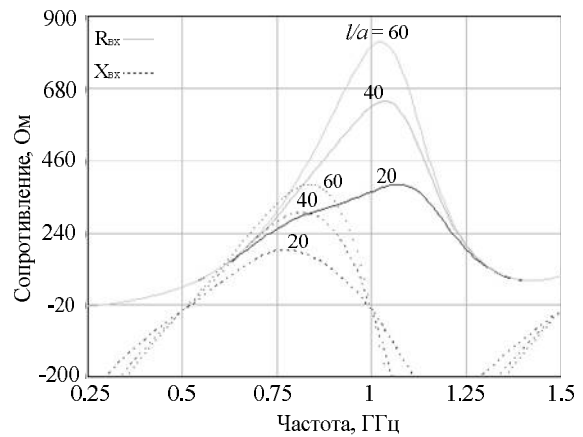


Рис. 2. Входное сопротивление симметричного вибратора для соотношений l/a 20,40,60

Графики КСВ для соотношений l/a от 10 до 100 представлены на рис. 3.

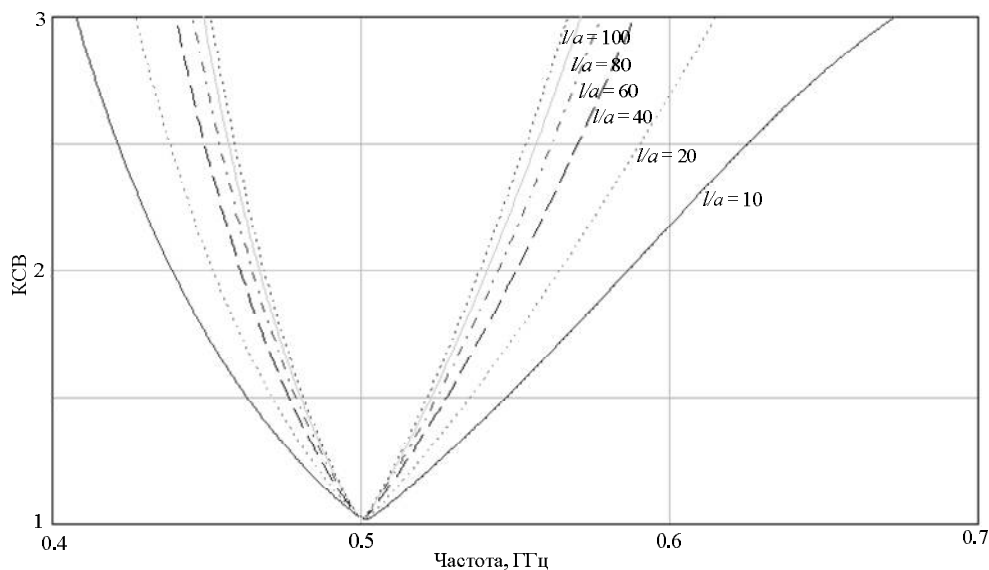


Рис. 3. КСВ модели для различных соотношений l/a

На графике представлены соотношения длины плеча вибратора к диаметру l/a в пре-

делах от 10 до 100, как видно из графика при наименьших соотношениях 10 и 20, вибратор

обладает большей широкополосностью и соответственно меньшей добротностью. При соотношении l/a больше 80, сужение рабочей полосы незначительно. При увеличении рабочей частоты и расширении полосы частот полуволновый вибратор конструктивно исполняют в печатном исполнении, и соотношение длины плеча к ширине плеча (два диаметра) может достигать значения около 10.

Модель RLC контура

Представим модель плеч вибратора в виде последовательного RLC контура (рис. 4).

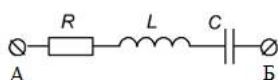


Рис. 4. Последовательный RLC контур

$R = R_{BX}$ – реальное сопротивление вибратора примем равным 75 Ом. Построим контур на частоте 0.5 ГГц. Примем емкость $C = 1$ пФ. Тогда индуктивность L найдем из формулы (5) и она будет равной 100 нГн.

$$L = \frac{1}{(2\pi \cdot f)^2 \cdot C} \quad (5)$$

Входное сопротивление контура рассчитывается по следующей формуле (6):

$$Z(f) = R_{BX} + j \cdot \left(L \cdot 2\pi \cdot f - \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \right). \quad (6)$$

График входных сопротивлений для $l/a = 40$ представлен на рис. 5.

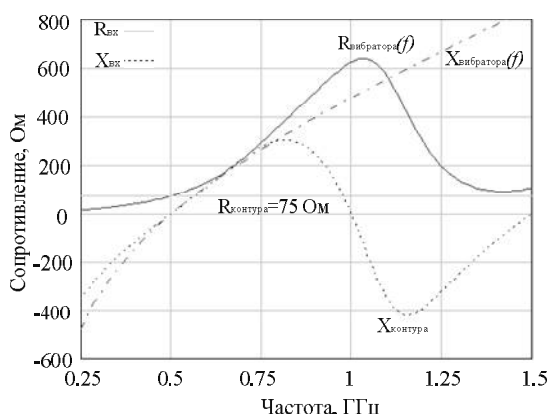


Рис. 5. График функции импедансов моделей RLC контура и классических выражений

Находим добротность контура (7):

$$Q = \sqrt{\frac{L}{C}} \cdot \frac{1}{R_{BX}}. \quad (7)$$

Проведем расчет добротностей для классических соотношений [1] $l/a = 20$, $Q = 3.25$; $l/a = 40$, $Q = 4.2$; $l/a = 60$, $Q = 4.7$. И построим графики KCB для этих соотношений (рис. 6).

Как видно из графика, реактивная составляющая для классических выражений импедансов и модели в виде последовательного RLC контура имеет одинаковое поведение на определенных частотах до 0.8 ГГц и с высокой точностью совпадает в пределах 10%. Зависимость KCB в полосе частот для данной модели RLC контура показана на рис. 6.

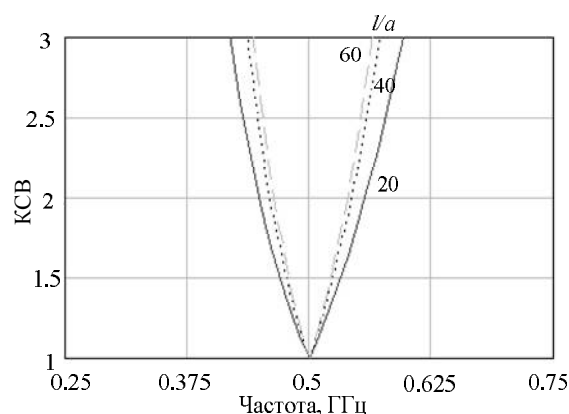


Рис. 6. KCB для соотношений l/a 20,40,60

В модели последовательного контура RLC R не является функцией от частоты у вибратора, но R_{BX} в классических выражениях есть функция от частоты. Аппроксимируем эту зависимость для модели $R(f)LC$ вибратора, R_{BX} – функция от частоты.

Модель модернизированного $R(f)LC$ контура

Определим для модели полосу частот от 250 МГц до 750 МГц с 3-кратным перекрытием по полосе. Аппроксимируем R_{BX} как функцию от частоты. Для дальнейшего рассмотрения модели возьмем одно из отношений $l/a=40$, так как оно наиболее актуально в дециметровом диапазоне частот.

Аппроксимируем реальную часть импеданса R_{BX} , как функцию от частоты (8):

$$R(f) = 15 + 920(f)^4. \quad (8)$$

Далее в последовательном контуре заменим постоянное R_{BX} на $R(f)$:

$$Z(f) = R(f) + j \cdot \left(L \cdot 2\pi \cdot f - \frac{1}{2\pi \cdot f \cdot C} \right). \quad (9)$$

На центральной частоте 0.5 ГГц сопротивление контура с $R(f) = 73.1$ Ом. Сравниваем

графики входного сопротивления вибратора R_{BX} (рис. 7) и контура с $R(f)$. Аналогичным способом аппроксимируются $R(f)$ и для других соотношений l/a .

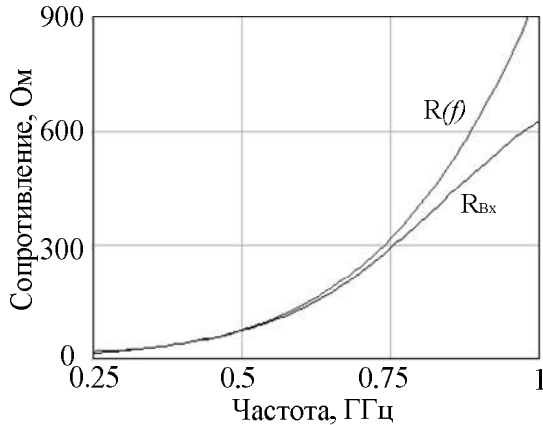


Рис. 7. Аппроксимация функции RLC контур

Полученная модернизированная модель максимально близка к колебательному контуру, а также классической математической модели полуволнового симметричного вибратора.

Следующий этап – переход к математической модели симметричного вибратора на длинных линиях.

Модель на длинных линиях

Построим модель вибратора исходя из теории длинных линий. Вибратор представляется в виде разомкнутого отрезка линии (рис. 8), входное сопротивление которого:

$$Z_B = -j \cdot W \cdot \operatorname{ctg}(kl), \quad (10)$$

где W – волновое сопротивление линии, k – волновое число, l – длина плеча вибратора.

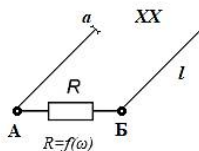


Рис. 8. Модель на длинных линиях

Аналогично, как и с предыдущей моделью зададим зависимость реального сопротивления от частоты, для этого используем аппроксимацию (8). В модели на линиях заменена постоянная $R = 75$ Ом на $R(f)$ в широкой полосе частот. На рис. 9 представлен входной импеданс модели на длинных линиях.

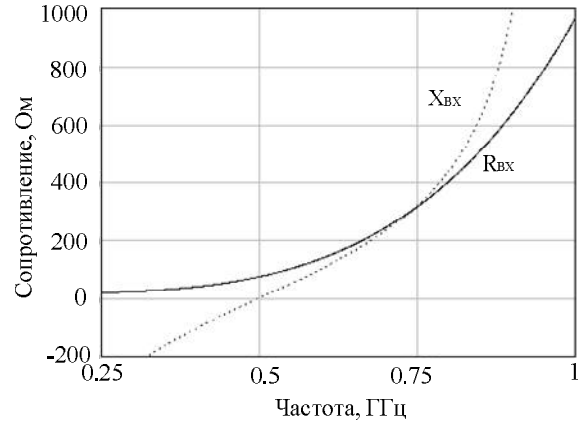
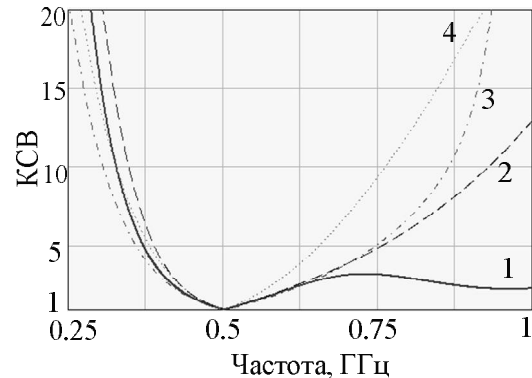


Рис. 9. Входное сопротивление модели на длинных линиях

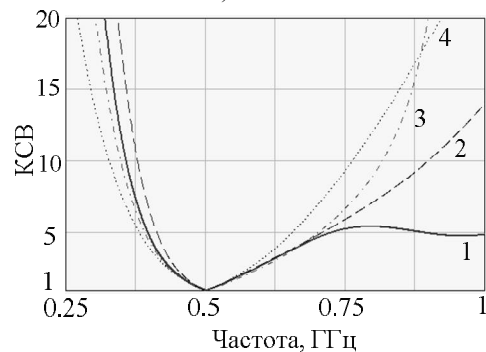
Далее переходим к сравнению всех моделей.

Сравнительный анализ моделей

Проведем сравнение КСВ всех четырех моделей для соотношений l/a 10, 20, 40, 60, наиболее актуальных в дециметровом и сантиметровом диапазоне частот.



а) $l/a = 10$



б) $l/a = 20$

Рис. 10. Графики КСВ для l/a а) 10; б) 20; в) 40; г) 60

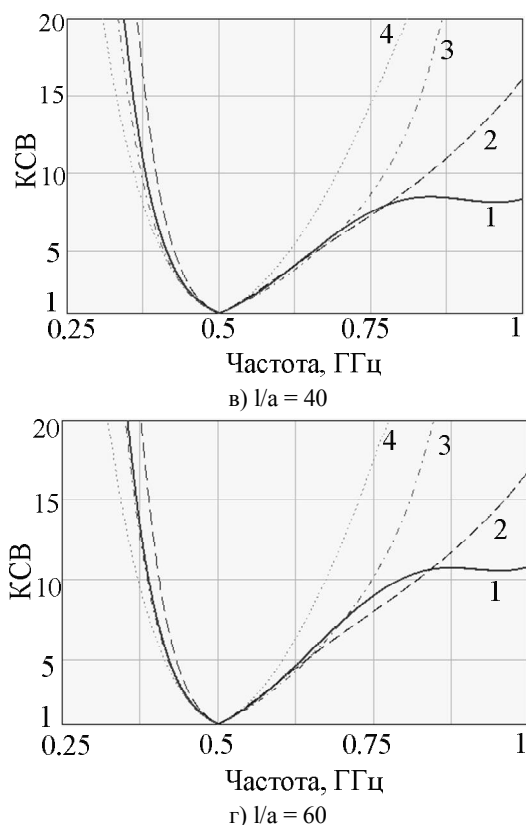


Рис. 10. Графики КСВ для l/a а) 10; б) 20; в) 40; г) 60 (продолжение)

На рис. 10, где 1 - КСВ классические выражения импедансов вибратора в частотном диапазоне, 2 - КСВ модернизированного $R(f)LC$ контура, 3 - КСВ модели на длинных линиях, 4 - КСВ RLC контура. Как видно из графиков КСВ, изображенных на рисунках, для соотношений l/a 10, 20, 40, 60, в 67% полосе частот, что составляет октаву, относительно 0.5 ГГц показали высокую точность в пределах 7-10%.

Поступила 10.01.2022; принята к публикации 16.02.2022

Информация об авторах

Разумихин Анатолий Сергеевич - аспирант, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. (953)778-82-37, e-mail: at-tel@mail.ru

Филимонова Юлия Олеговна - канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. (383)346-06-33, e-mail: jul7788@mail.ru

Лайко Константин Алексеевич - канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. (383)346-06-33, e-mail: play-byte@mail.ru

Алгазин Евгений Игоревич - д-р техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20), тел. (383)346-32-37, e-mail: algazin@corp.nstu.ru

MODELS OF A SYMMETRIC VIBRATOR IN THE FREQUENCY RANGE

A.S. Razumikhin, Yu.O. Filimonova, K.A. Layko, E.I. Algazin

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Заключение

В работе рассмотрены математические модели входных импедансов симметричной вибраторной антенны, приведены характеристики входных импедансов вибратора в полосе частот, рассчитанных по предложенным моделям с сосредоточенными элементами LC , с постоянным сопротивлением излучения 75 Ом, с аппроксимацией функции сопротивления излучения вибратора в частотном диапазоне и длинными линиями. Сравнительный анализ с классическими выражениями импедансов и моделей в частотном диапазоне показал высокую точность в пределах 7-10% в 67% полосе частот. Расчеты проведены для модели на средней частоте 0.5 ГГц. Данные исследования необходимы для решения задач согласования вибраторных антенн в широкой полосе частот и позволяют провести простой переход к построению двух-, трехконтурных моделей вибраторных антенн.

Литература

1. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны. М.: Энергия, 1975. 528 с.
2. Айзенберг Г.З. Антенны УКВ. М.: Связь, 1977. Ч. 2. 288 с.
3. Balanis C.A. Modern antenna handbook. New Jersey, John Wiley & Sons, 2008. 1704 p.
4. Milligan T.A. Modern antenna design. New Jersey, John Wiley & Sons, 2005. 633 p.
5. Драбкин А.Л. Антенно-фидерные устройства. М.: Советское радио, 1974. 536 с.
6. Карл Ротхаммель. Антенны. М.: Энергия, 1979. 320 с.

Abstract: here we consider mathematical models of symmetrical vibrators for given overall dimensions in the frequency range. We propose the transition of input impedances calculated for different relative lengths of vibrators to the frequency range, which is necessary for further research of broadband vibrator antennas. We considered classical expressions for calculating the input impedances of a half-wave vibrator in the frequency range, as well as a vibrator model in the form of a series RLC circuit, a modernized RLC circuit, where R is given as a function of frequency, and a model on long lines. The proposed models accurately describe the classical expressions for the vibrator input impedances. We considered these models for a classical symmetric cylindrical vibrator, in the decimeter wavelength range. We give and describe the equivalent schemes of mathematical models of the vibrator. We made comparisons between the calculated input impedances of the vibrator in the frequency range according to the proposed models with classical expressions. The results of calculating the input impedances of the vibrator according to the proposed models and classical expressions with high accuracy within 7-10% coincide in 67% of the frequency band. These models allow you to make a simple transition to the construction of two-, three-loop models of vibrator antennas

Key words: balanced vibrator, balanced vibrator input impedance, balanced vibrator mathematical model

References

1. Markov G.T., Sazonov D.M. "Antennas" ("Antenny"), Moscow, Energiya, 1975, 528 p.
2. Aizenberg G.Z. "VHF Antennas" ("Anteny UKV"), Moscow: Svyaz', 1977, 288 p.
3. Balanis C.A. "Modern antenna handbook", New Jersey, John Wiley & Sons, 2008, 1704 p.
4. Milligan T.A. "Modern antenna design", New Jersey, John Wiley & Sons, 2005, 633 p.
5. Drabkin A.L. "Antenna-feeder devices" ("Antenno-fidernye ustroystva"), Moscow: Sovetskoe radio, 1974, 536 p.
6. Rothammel K. "Antennas" ("Antenny"), Moscow, Energiya, 1979, 320 p.

Submitted 10.01.2022; revised 16.02.2022

Information about the authors

Anatoliy S. Razumikhin, graduate student, NSTU (20 Karl Marx av., Novosibirsk 630073, Russia), tel. +7 (953)778-82-37, e-mail: at-tel@mail.ru.

Yuliya O. Filimonova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, NSTU (20 Karl Marx av., Novosibirsk 630073, Russia), tel. +7(383)346-06-33, e-mail: jul7788@mail.ru

Konstantin A. Layko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, NSTU (20 Karl Marx av., Novosibirsk 630073, Russia), tel. +7(383)346-06-33, e-mail: play-byte@mail.ru

Evgeniy I. Algazin, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, NSTU (20 Karl Marx av., Novosibirsk 630073, Russia), tel. +7(383)346-32-37, e-mail: algazin@corp.nstu.ru

МОДИФИЦИРОВАННЫЙ ВИБРАТОР ПИСТОЛЬКОРСА С ПЛЕЧАМИ НА ОСНОВЕ ТРЕХ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ СПИРАЛЕЙ, ЗАМКНУТЫХ НА ТОРЦАХ

В.И. Николаев¹, Ю.Г. Пастернак², В.А. Пендюрин³

¹АО «Концерн «Созвездие», г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

³АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия

Аннотация: представлен модифицированный вибратор Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей. Исследовались два варианта конструкции вибратора: с противоположными направлениями намотки ветвей спирали в плечах и с одинаковыми направлениями намотки. Представленная конструкция позволяет решить актуальную задачу по уменьшению размеров антенн для радиотехнических систем. Проведено сравнение рабочих характеристик предложенных конструкций и представлены результаты экспериментального исследования. В ходе исследования был получен ряд основных параметров антенны: номограмма Вольперта-Смита, коэффициент отражения от входа, коэффициент полезного действия при различных условиях. Был изготовлен макет разработанной антенны, размещаемый в различных условиях: нижняя половина вибратора помещалась внутрь металлического цилиндра; вибратор и цилиндр размещались на вершине металлического конуса; вибратор размещался в кожухе из диэлектрика, установленном на подстилающей поверхности в виде стальной сетки. В результате проведенных исследований было установлено, что вибратору Пистолькорса с одинаковыми направлениями намотки ветвей спирали свойственна намного более широкая полоса рабочих частот по согласованию с фидерной линией, а величина его входного сопротивления примерно в 2 раза больше, чем при противоположно направленных намотках ветвей спирали

Ключевые слова: электрически малые антенны, вибратор Пистолькорса, спиральная антенна

Введение

Размер антенны является важным фактором, существенно влияющим на общий размер беспроводной системы. Следовательно, актуальным является разработка миниатюрных антенн для систем беспроводной связи. Однако уменьшение размера антенн является сложной задачей из-за его влияния на рабочие характеристики. Поэтому разработчикам приходится искать компромисс между этими двумя факторами.

Существуют конструкции электрически малых кольцевых антенн (в литературе можно найти обозначение “магнитное кольцо”), как правило, имеющих диаметр меньше одной десятой длины волны [1]. Из-за своих малых размеров такие антенны нашли широкое применение в различных отраслях. Например, в использовании в авиатехнике, кораблях, автомобилях [1]. В работе [2] рассматривается применение электрически малых антенн из половины петли (и схожих конструкций) для установки на объекты различной военной техники.

В работе [3] приводятся способы решения актуальной задачи при создании электрических антенн - учета потерь. В качестве исследуемой антенны авторы использовали кольцевую ан-

тенну с тороидальным трансформатором, предназначенным для вычисления импеданса антенны. Также приведены различные потери и математические выражения для их оценки.

Другой возможный способ уменьшения размеров кольцевых антенн описан в [1] - магнитный монополь окружен дополнительным емкостным экраном, а как указано в [6, 7], такой способ применим и для уменьшения размеров монопольных антенн.

В данной работе представлена конструкция модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с двумя вариантами направления намотки ветвей в спирали.

Модифицированный вибратор Пистолькорса

Принципы, положенные в основу построения электрически малой антенны в виде многозаходной (в частности – трехзаходной) спирали, плечи которой расположены на боковой поверхности цилиндра и замкнуты на кольца, лежащие по периметрам нижнего и верхнего оснований цилиндра, сходны с принципами построения вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда. Варианты данной антенны характеризуются коротким замыканием их входа по постоянному току и, по сути, яв-

ляются разновидностью петлевого вибратора Пистолькорса. Их отличиями от классических вариантов вибратора Пистолькорса являются: спиральная форма плечей; количество плечей может быть большим двух; у вибратора имеется продольный магнитный момент, являющийся следствием протекания токов по его плечам в форме цилиндрической спирали; высокая добротность, обусловленная малыми электрическими размерами антенного устройства.

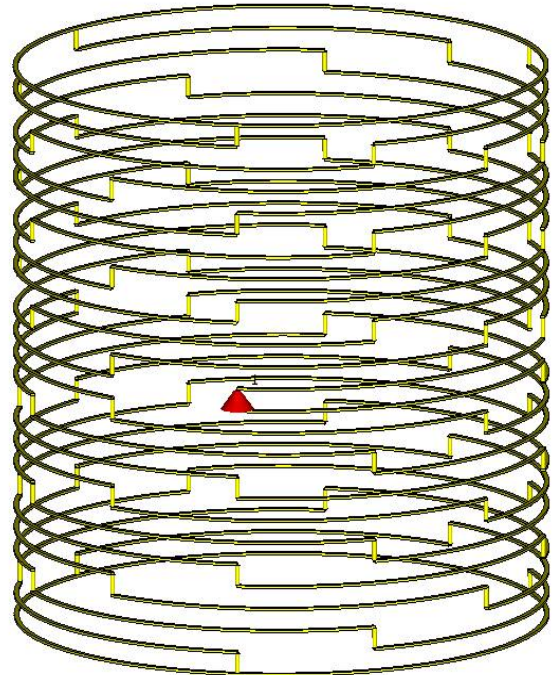
Отличиями описываемых ниже модифицированных вибраторов Пистолькорса от вибратора с плечами в виде плоских спиралей Архимеда, вызывающими существенное изменение входных характеристик антенны, являются следующие:

- тонкопроволочные плечи спирали характеризуются существенно более высокими значениями волнового сопротивления эквивалентной линии передачи, в результате чего сопротивление излучения и входное сопротивление антенны на частоте резонанса существенно выше, что упрощает методику проектирования согласующего устройства;

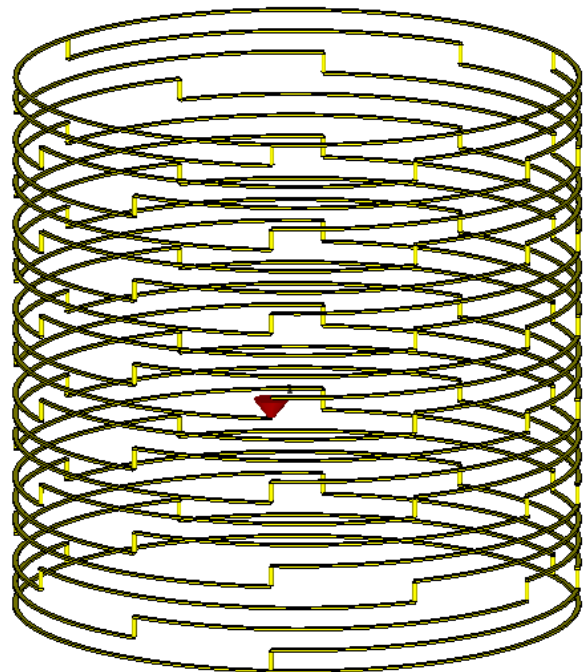
- более высокая концентрация реактивного магнитного поля вблизи антенны и, следовательно, меньшая относительная доля энергии реактивного электрического поля в непосредственной близости от излучателя приводит к снижению потерь мощности в грунте, т.к. в нем преобладают потери электрического характера;

- плечи вибратора в форме цилиндрических спиралей являются излучателями, преимущественно электрического типа (т.к. сопротивление излучения электрически малой рамки является существенно меньшим сопротивления излучения электрического вибратора сравнимого геометрического размера), поэтому излучатель имеет емкостный характер входного сопротивления на частотах ниже полуволнового резонанса и индуктивный характер – на частотах выше резонансной, в то время как два петлевых шунта каждого неразрывного плеча, наоборот, характеризуются индуктивным характером входного сопротивления на частотах ниже резонансной и емкостным – на частотах выше резонансной, как короткозамкнутые отрезки двухпроводной линии длиной большей четверти длины волны, но меньшей половины длины волны, в результате чего имеет место компенсация суммарной реактивной компоненты входного сопротивления, и антенна характеризуется большей шириной полосы рабочих частот по заданному качеству согласования с фидерной линией.

Были исследованы два варианта конструкции модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей: с противоположными направлениями намотки ветвей спирали в плечах (рис. 1 а) и с одинаковыми направлениями намотки (рис. 2).



а)



б)

Рис. 1. Вибраторы Пистолькорса в виде трехзаходной спирали, размещенной на боковой поверхности цилиндра: а) противоположные направления намотки ветвей спирали в плечах; б) одинаковые направления намотки ветвей спирали в плечах

В ходе численного эксперимента было выяснено, что вариант с одинаковыми направлениями намотки ветвей спирали обладает существенно более широкой полосой рабочих частот по согласованию с фидерной линией; при этом величина входного сопротивления антенны примерно в 2 раза больше, чем в случае противоположных направлений намотки ветвей спирали. Нижние плечи вибратора располагались в полости глубиной 113 мм и диаметром 238 мм внутри цилиндра с внешним диаметром 260 мм и высотой 1200 мм; полная высота вибратора составляла 297 мм, внешний диаметр вибратора – 216 мм; в идеальном случае поверхность считалась идеально проводящей и бесконечно протяженной, рис. 2. Входные характеристики антенны и частотная зависимость ее КПД показаны на рис. 3-5.

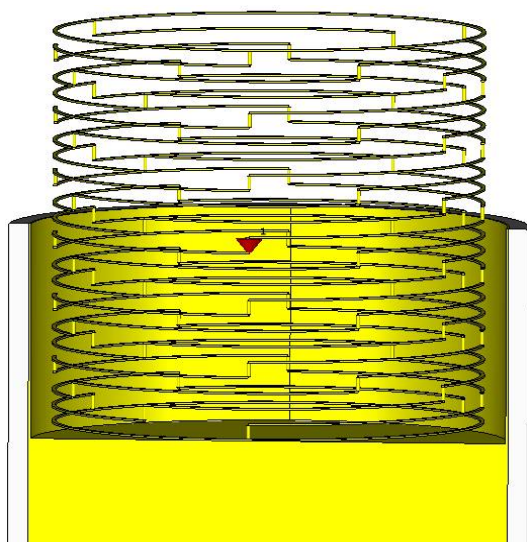


Рис. 2. Расположение вибратора в полости на вершине опорной стойки

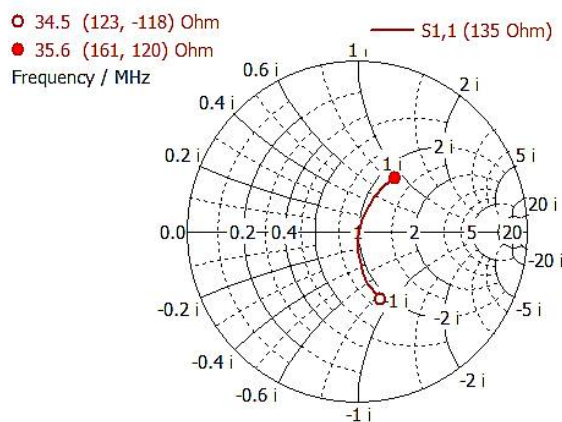


Рис. 3. Номограмма Вольперта-Смита модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

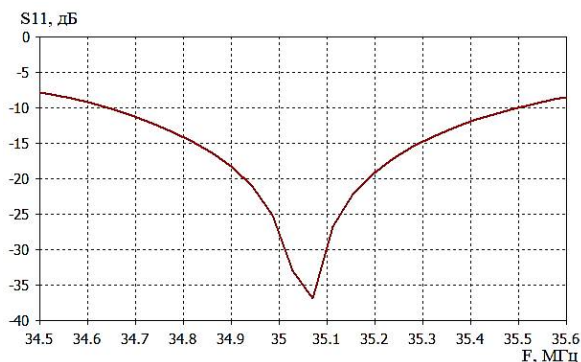


Рис. 4. Коэффициент отражения от входа модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

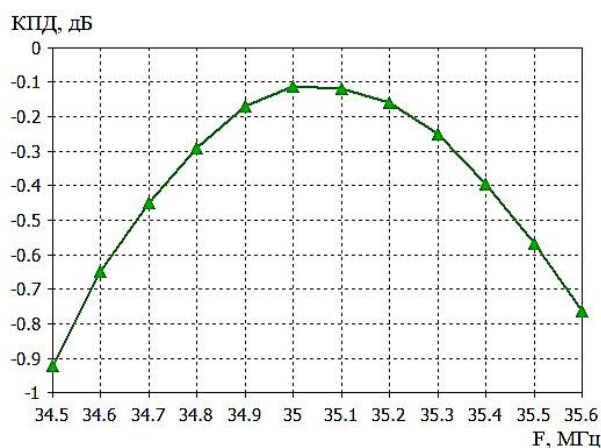


Рис. 5. Коэффициент полезного действия модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Случай идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности

Для оценки влияния конечности размеров хорошо проводящей подстилающей поверхности на характеристики антенны был проведен следующий численный эксперимент. Антенное устройство располагалось на стальном основании диаметром 3 м, установленном на грунте с относительной диэлектрической проницаемостью $\epsilon_r = 5$ и проводимостью $\sigma = 0.005$ См/м, рис. 6. Входное сопротивление практически не изменилось (рис. 7, 8), а значение КПД уменьшилось на 5 дБ (рис. 9) по сравнению со случаем идеально проводящей и бесконечно протяженной подстилающей поверхности.

Был изготовлен макет вибратора с плечами в виде трех цилиндрических спиралей, замкнутых на верхнее и нижнее основания, рис. 10.

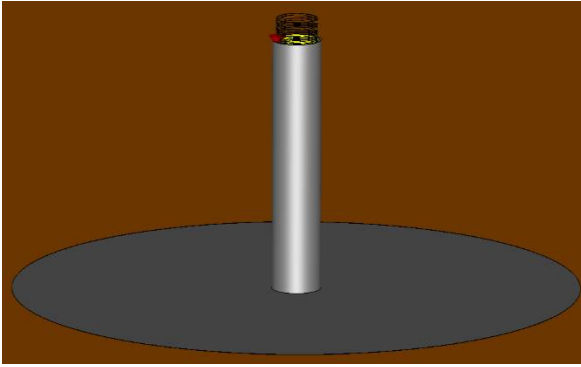


Рис. 6. Модель вибратора на стойке с конечной хорошо проводящей поверхностью, установленной на грунте с параметрами $\epsilon_\gamma = 5$ и $\sigma = 0.005$ См/м

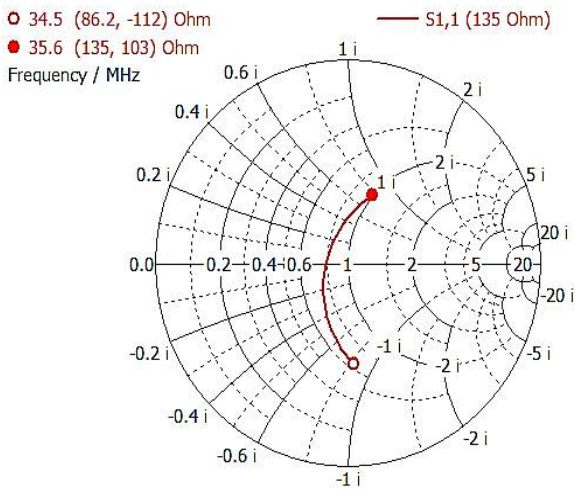


Рис. 7. Номограмма Вольперта-Смита модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Подстилающая поверхность – стальная плита диаметром 3 м и грунт с $\epsilon_\gamma = 5$ и $\sigma = 0.005$ См/м

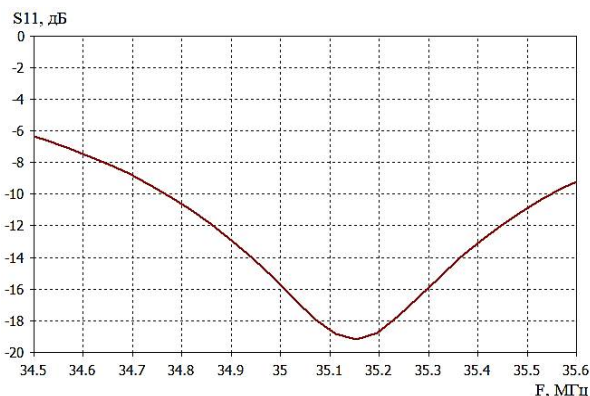


Рис. 8. Коэффициент отражения от входа модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Подстилающая поверхность – стальная плита диаметром 3 м и грунт с $\epsilon_\gamma = 5$ и $\sigma = 0.005$ См/м

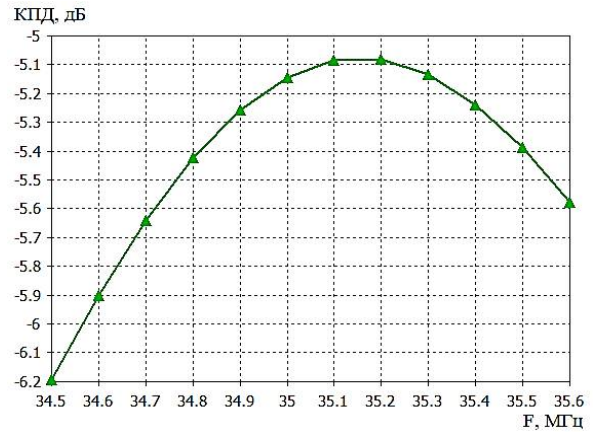


Рис. 9. Коэффициент полезного действия модифицированного вибратора Пистолькорса с плечами в виде цилиндрических спиралей с одинаковыми направлениями намотки. Волновое сопротивление фидера – 135 Ом. Подстилающая поверхность – стальная плита диаметром 3 м и грунт с $\epsilon_\gamma = 5$ и $\sigma = 0.005$ См/м



а)

Рис. 10. Макет вибратора Пистолькорса с цилиндрическими плечами: а) нижняя половина вибратора помещена внутрь металлического цилиндра; б) вибратор и цилиндр размещены на вершине металлического конуса высотой 1200 мм; в) вибратор в кожухе из диэлектрика, установленный на подстилающую поверхность в виде стальной сетки, полная высота антенны – 700 мм относительно поверхности грунта



б)



в)

Рис. 10. Макет вибратора Пистолькорса с цилиндрическими плечами: а) нижняя половина вибратора помещена внутрь металлического цилиндра; б) вибратор и цилиндр размещены на вершине металлического конуса высотой 1200 мм; в) вибратор в кожухе из диэлектрика, установленный на подстилающую поверхность в виде стальной сетки, полная высота антенны – 700 мм относительно поверхности грунта (продолжение)

Исследования макета антенны показали, что использование каркаса из вспененного диэлектрика снижает значение резонансной частоты относительно расчетного значения 35.1 МГц приблизительно до 27 МГц.

Измерение коэффициента усиления вибратора проводилось методом сравнения (методом замещения антенны) со стандартным четвертьволновым штырем, настроенным на частоту 27 МГц. В качестве передатчика использовался генератор с выходной мощностью 20 дБм, к выходу которого был подключен симметричный электрический вибратор. Для имитации железобетонного основания на земле была

расстелена металлическая сетка с периодом 50 мм и размерами $3 \times 3 \text{ м}^2$.

Результаты измерений показали, что в полосе частот около 7.4 % вибратор Пистолькорса с тремя спиральными плечами имеет коэффициент усиления на 1.5-1.9 дБ выше, чем у четвертьволнового несимметричного электрического вибратора, запитанного относительно той же металлической сетки, рис. 11.

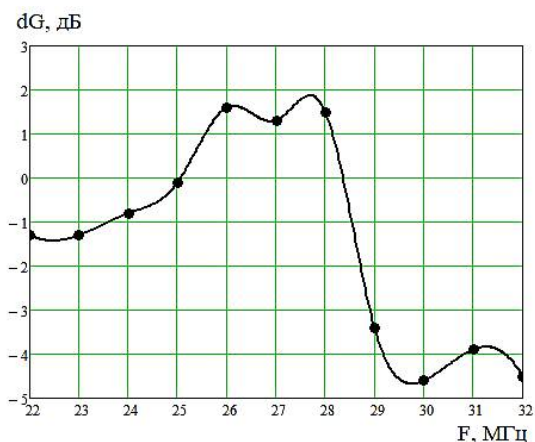


Рис. 11. Разница напряжений на выходе модифицированного вибратора Пистолькорса с тремя цилиндрическими спиральными плечами (рис. 10 в) и на выходе четвертьволнового штыря, настроенного на частоту 27 МГц

Заключение

Таким образом, результаты исследования показали, что вариант вибратора Пистолькорса с одинаковыми направлениями намотки ветвей спирали обладает существенно более широкой полосой рабочих частот по согласованию с фидерной линией. При этом величина входного сопротивления антенны примерно в 2 раза больше, чем в случае противоположных направлений намотки ветвей спирали. Результаты экспериментального исследования хорошо согласуются с численными расчетами.

Литература

1. Robert C. Hansen and Robert E. Collin. Small Antenna Handbook. John Wiley & Sons, Inc. Published, 2011. 346 p.
2. Ignatenko M., Filipovic D.S. On the Design of Vehicular Electrically Small Antennas for NVIS Communications // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2016. Vol. 64. Is. 6. Pp. 2136–2145. DOI: 10.1109/TAP.2016.2547018.
3. Austin B.A., Boswell A., Perks M.A. Loss Mechanisms in the Electrically Small Loop Antenna [Antenna Designer's Notebook] // IEEE Antennas and Propagation Magazine. 2014. Vol. 56. Is. 4. Pp. 142 - 147. DOI: 10.1109/MAP.2014.6931671.
4. Volger L.E., Noble J.L. Curves of Input Impedance Change Due To ground for Dipole Antennas // National

Bureau of Standarts Monograf 72. 1964. № 31. 48 p.

5. Best S.R. Optimizing the Receiving Properties of Electrically Small HF Antennas // *The Radio Science Bulletin*. 2016. No 359. Pp.13-29.

6. Слюсар В. Метаматериалы в антенной технике: основные принципы и результаты. Первая миля 3–4/2010. UPL:

http://www.lastmile.su/files/article_pdf/2/article_2036_557.pdf

7. Erentok A. and Ziolkowski R.W. Metamaterial-Inspired Efficient Electrically Small Antennas// *Transactions on Antennas and Propagation*. 2009. № 56(3). P. 691 - 707. DOI: 10.1109/TAP.2008.916949.

Поступила 01.12.2021; принята к публикации 16.02.2022

Информация об авторах

Николаев Валерий Иванович – д-р техн. наук, научный референт, АО «Концерн «Созвездие» (394018, Россия, г. Воронеж, ул. Плехановская, д. 14), e-mail: nivis@mail.ru

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Пендюрин Владимир Андреевич – генеральный директор, АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи» (394062, Россия, г. Воронеж, ул. Пеше-Стрелецкая, д. 108, офис 415), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

MODIFIED PISTOHLKORS DIPOLE WITH ARMS BASED ON THREE CYLINDRICAL SPIRALS CLOSED AT THE ENDS

V.I. Nikolaev¹, Yu.G. Pasternak², V.A. Pendyurin³

¹JSC «Concern «Sozvezdie», Voronezh, Russia

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

³Research and Production Enterprise “Automated Communication Systems”, Voronezh, Russia

Abstract: we present a modified Pistohlkors dipole with arms in the form of cylindrical spirals. We studied two versions of the dipole design: with opposite winding directions of the spiral branches in the arms and with the same winding directions. The presented design allows solving the actual problem of reducing the size of antennas for radio engineering systems. We compared the performance characteristics of the proposed structures and presented the results of an experimental study. In the course of the study, we obtained a number of basic parameters of the antenna: the Volpert-Smith nomogram, the reflection coefficient from the input, the efficiency under various conditions. We made a model of the developed antenna, placed in various conditions: the lower half of the dipole was placed inside a metal cylinder; the dipole and cylinder were placed on top of a metal cone; the dipole was housed in a dielectric casing mounted on the underlying surface in the form of a steel mesh. As a result of the research, we found that the Pistohlkors dipole with the same winding directions of the spiral branches is characterized by a much wider band of operating frequencies in agreement with the feeder line, and the value of its input resistance is approximately 2 times greater than with oppositely directed windings of the spiral branches

Key words: electrically small antennas, Pistohlkors dipole, helical antenna

References

1. Hansen R.C., Collin R.E. “Small antenna handbook”, 2011 John Wiley & Sons, Inc., 346 p.
2. Ignatenko M., Filipovic D.S. “On the design of vehicular electrically small antennas for NVIS communications”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, June 2016, vol. 64, issue 6, pp. 2136–2145, DOI: 10.1109/TAP.2016.2547018.
3. Austin B.A., Boswell A., Perks M.A. “Loss mechanisms in the electrically small loop antenna”, *IEEE Antennas and Propagation Magazine*, vol. 56, issue 4, Aug. 2014, pp. 142-147, DOI: 10.1109/MAP.2014.6931671.
4. Volger L.E., Noble J.L. “Curves of input impedance change due to ground for dipole antennas”, *National Bureau of Standards Monograf 72*, January 31, 1964.
5. Best S.R. “Optimizing the receiving properties of electrically small HF antennas”, *The Radio Science Bulletin*, December 2016, no. 359, pp. 13-29.
6. Slyusar V. “Metamaterials in antenna technology: basic principles and results”, *The First Mile 3-4/2010*, available at: http://www.lastmile.su/files/article_pdf/2/article_2036_557.pdf
7. Erentok A., Ziolkowski R.W. “Metamaterial-inspired efficient electrically small antennas”, *Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, vol. 56(3), pp. 691-707, DOI: 10.1109/TAP.2008.916949.

Submitted 01.12.2021; revised 16.02.2022

Information about the authors

Valeriy I. Nikolaev, Dr. Sc. (Technical), Scientific Referent, «Concern «Sozvezdie» (14 Plekhanovskaya str., Voronezh 394018, Russia), e-mail: nivis@mail.ru

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pasternakyg@mail.ru

Vladimir A. Pendyurin, General Director, JSC RPE "Automated Communication Systems" (of. 415, 108 Peshe-Streletska str., Voronezh 394062, Russia), e-mail: infonpp-acc.ru@yandex.ru

ДЕКОМПОЗИЦИЯ СИГНАЛЬНОГО РАДИОПРОФИЛЯ В ПАССИВНОЙ РАДИОСЕНСОРНОЙ ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ И АУТЕНТИФИКАЦИИ ЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

К.А. Бойков

**Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем
"МИРЭА – Российский технологический университет", г. Москва, Россия**

Аннотация: предложен способ разложения (декомпозиции) сложного сигнального радиопрофиля, зарегистрированного при собственном излучении электронных узлов, на отдельные затухающие колебания с последующим определением их основных параметров для пассивной радиосенсорной технической диагностики и аутентификации электронных устройств. Представлено общее выражение для разложения сигнального радиопрофиля, позволяющее по известным параметрам восстановить форму исходного сигнала. Показана возможность использования модифицированного оконного преобразования Фурье для нахождения числа элементарных составляющих сложного радиопрофиля с оценкой корректности преобразования на начальных этапах анализа. Получена двумерная зависимость приведенной амплитуды спектра сигнала от частоты и от временного положения «окна», позволяющая определить аналитические выражения для основных параметров исходного сигнала. Используя предложенный способ декомпозиции по полученным параметрам и выражениям, восстановлен исследуемый сложный сигнальный радиопрофиль. Вычислена взаимная корреляционная функция исходного и восстановленного сигнального радиопрофиля и на участках с низкой корреляционной связью произведена коррекция рассчитанных ранее параметров. Показана возможность повышения качества восстановления за счет введения анализа силы корреляционной связи между участками восстановленного и исходного сигналов. Сделан вывод о возможности использования представленного разложения в методах радиосенсорной технической диагностики и аутентификации электронных устройств

Ключевые слова: сигнальный радиопрофиль, декомпозиция, корреляционный анализ, преобразование Фурье, техническая диагностика, частотно-временная зависимость

Введение

В настоящее время методы технической диагностики (ТД) и защиты радиоэлектронной техники от нелегального клонирования (обратного проектирования – реинжиниринга) стремительно развиваются как в области программных средств, так и в аппаратной среде. Несмотря на это, современные методы ТД либо обладают высокой инерцией, занимают процессорное время, требуют остановки функционирования электронного устройства, либо требуют гальванического контакта с объектом исследования, что зачастую недопустимо. В то же время серьезными недостатками большинства защитных от реинжиниринга мер являются значительные аппаратные затраты и, как следствие, высокое энергопотребление [1]. Такой подход идет вразрез с требованиями к минимизации площади, занимаемой электронным устройством на кристалле интегральной схемы. В работах [2, 3, 4] представлены методы радиосенсорной ТД и аутентификации электронных устройств, основанные на регистрации электрической составляющей электромагнитных

излучений, возникающих при перераспределении энергии в реактивных накопителях печатных узлов. Данные методы позволяют дистанционно обнаруживать структурные и функционально-аппаратные неисправности, целостность сигналов электронных устройств, а также отличать оригинальное радиоэлектронное изделие (блок, узел) от контрафакта.

Постановка задачи

Ранее было показано, что затухающие колебания в печатном узле или сигнальный радиопрофиль (СРП) – суперпозиция N затухающих колебаний входных и выходных цепей, входящих в него элементов [5]. Данные колебания могут быть описаны выражением:

$$U(t) = \sum_{i=1}^N U_{CBi}(t) = \sum_{i=1}^N U_{0i} e^{-\delta_i(t-t_{0i})} \sin[2\pi f_i(t-t_{0i})] \quad (1)$$

где U_i – мгновенное значение приведенного уровня i -го колебания, U_{0i} – приведенная амплитуда первой полуволны i -го колебания, δ_i – коэффициент затухания i -го колебания, t – те-

кущий момент времени, t_{0i} – момент времени начала излучения i -го колебания, ω_i – круговая частота i -го колебания.

Следует заметить, что выражение (1) справедливо только при выполнении условия $t - t_{0i} > 0$, при $t - t_{0i} \leq 0$: $U_i = 0$. С физической точки зрения это означает отсутствие i -го колебания в момент, когда в соответствующем узле или элементе еще не происходит перераспределения энергии между реактивными накопителями.

На рис. 1 представлен СРП, полученный в результате моделирования схемы, состоящей из двух параллельно соединенных МОП-ключей [5], иллюстрирующий выражение (1).

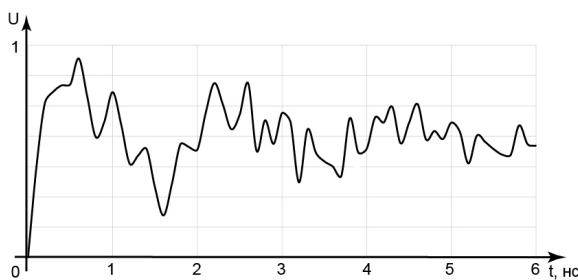


Рис. 1. СРП, полученный в результате моделирования

С точки зрения ТД и аутентификации, для определения технического состояния и оригинальности узлов электронного устройства полезно провести не только анализ СРП, но и сопоставить исходному СРП сумму составляющих сигналов, математическая обработка которых более проста и более полно раскрывает информационные аспекты исходного сигнала [6, 7]. В таблице представлены параметры СРП и параметры электронного устройства (узла), которые они в себе содержат.

Параметры СРП

Параметр СРП	Параметр электронного устройства
U_0	Приведенная мощность излучения узла
δ	Температура излучающего узла
t_0	Быстродействие излучающего узла
ω	Паразитные емкости излучающего узла
N	Число излучающих узлов

Методы и результаты

Для численного определения представленных в таблице параметров необходимо провести декомпозицию исходного СРП. Поскольку сигналы, приведенные в выражении (1), строго периодические функции и обладают свойством стационарности, то для определения числа из-

лучающих узлов и их частотного спектра можно воспользоваться преобразованием Фурье. Конечность принятого СРП, имеющего конечное число отсчетов K , делает возможным использование дискретного преобразования Фурье (ДПФ) [8,9]:

$$X(f) = \sum_{c=0}^{K-1} U(K) \exp\left(-j \frac{2\pi f c}{K}\right), \quad (2)$$

где $X(f)$ – дискретный частотный спектр сигнала, $U(K)$ – сигнал, дискретизированный во времени, c – номер отсчета, f – частота.

Поскольку частотный спектр здесь представлен в виде массива комплексных чисел, то для наглядности необходимо вычислить длину радиус-вектора X соответствующей точки комплексной плоскости:

$$|X| = \sqrt{X_a^2 + X_b^2}, \quad (3)$$

где X_a – действительная часть, X_b – мнимая часть.

Выполнив ДПФ для СРП, представленного на рис. 1, получим приведенный частотный спектр сигнала (рис. 2).

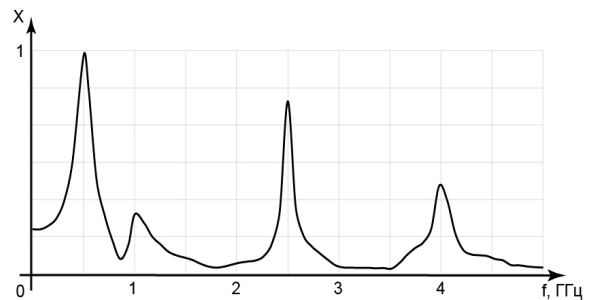


Рис. 2. Приведенный частотный спектр СРП

По максимумам частотной характеристики можно сделать вывод, что представленный СРП – суперпозиция четырех колебаний ($N=4$). Также для каждого колебания можно определить частоту $f_1 = 0,5$ ГГц, $f_2 = 1$ ГГц, $f_3 = 2,5$ ГГц, $f_4 = 4$ ГГц.

Следует заметить, что N показывает число источников затухающих колебаний, зная которое можно определить, все ли интересующие элементы узла участвуют в излучении. В случае если N полученного СРП меньше, чем N репера, то следует делать вывод о выходе из строя либо шунтировании некоторых компонентов интересующего узла. В случае равенства – все элементы узла участвуют в излучении. При превышении числа излучателей в тестовом СРП по сравнению с репером можно говорить о неверном вычислении данного па-

раматра либо некорректном производстве измерения (моделирования).

Для получения информации о коэффициенте затухания и времени начала излучения (фазе) для каждого из колебаний предлагается воспользоваться идеей оконного преобразования Фурье [10,11] и получить спектр затухающих колебаний со сдвигом на каждый дискрет:

$$X(f, h) = \sum_{c=h}^{O-1+h} U(O) \exp\left(-j \frac{2\pi f c}{O}\right), \quad (4)$$

где O – число точек, образующих «окно» преобразования, h – номер отсчета положения «окна» ($0 < h < K-O$).

Далее по полученным отсчетам строится двумерная зависимость приведенной амплитуды спектра сигнала от частоты и от положения «окна» (рис. 3).

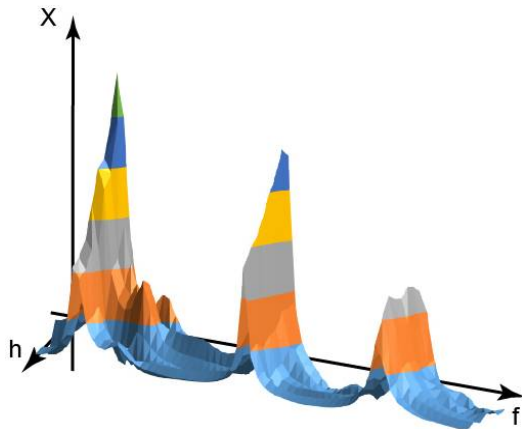


Рис. 3. Частотно-временной спектр СРП

По данной зависимости нетрудно определить момент времени начала излучения i -го колебания. Если при увеличении h значение приведенной амплитуды на частоте i -го колебания увеличивается либо остается неизменным, значит, i -е излучение на данном отсчете отсутствует. Уменьшение значения приведенной амплитуды на частоте i -го колебания говорит о том, что излучение появилось. Момент перехода от возрастания к затуханию (точка экстремума) и есть точка начала излучения. Уменьшение приведенного амплитудного спектра будет проходить по закону затухания колебания с тем же коэффициентом затухания.

$$X_i = X_{0i} \exp(-\delta_i t), \quad (5)$$

где X_{0i} – приведенный амплитудный спектр i -го колебания в начальной точке.

Аппроксимируя спадающую зависимость экспонентой, можно определить коэффициент затухания. Для наглядности на рис. 4 представлена временная зависимость приведенного ам-

плитудного спектра для третьего колебания ($i = 3$, рис. 4а) и кривая экспоненциальной аппроксимации (рис. 4б).

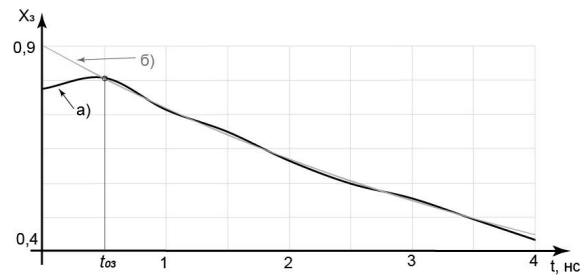


Рис. 4. Временная зависимость приведенного амплитудного спектра СРП на частоте 2,5 ГГц ($i = 3$)

Из данного рисунка видно, что точка начала излучения на частоте 2,5 ГГц $t_{03} = 0,5$ нс. Коэффициент затухания определяется по кривой рис. 4б с учетом выражения (5): $\delta_3 \approx 0,2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ (время затухания $\tau_3 = 1/\delta_3 \approx 5$ нс). По аналогии определяются коэффициенты затухания и время начала излучения для всех составляющих рассматриваемого СРП.

Поскольку амплитудный спектр является суммой амплитуд колебаний во времени, то для нахождения амплитуды первой полуволны каждого колебания необходимо провести операцию дифференцирования по времени (определить скорость изменения) приведенного амплитудного спектра в начальный момент времени:

$$v_i = \frac{dX_i}{dt} = -X_{0i} \delta_i \exp(-\delta_i t). \quad (6)$$

Таким образом, в начальный момент времени при $t = 0$:

$$v_i = -X_{0i} \delta_i. \quad (7)$$

Знак «-» в выражении (7) говорит о изменении приведенного амплитудного спектра в сторону уменьшения. Таким образом, опираясь на выражение (7) и рис. 4б, для третьего колебания:

$$|v_3| = 0,9 \cdot 0,2 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1} = 0,18 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}.$$

Аналогично можно определить параметры оставшихся колебаний: $t_{01} = 0$, $\delta_1 \approx 0,3 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $|v_1| = 0,3 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $t_{02} = 0,7$ нс, $\delta_2 \approx 0,5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $|v_2| = 0,19 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $t_{04} = 2,5$ нс, $\delta_4 \approx 0,4 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$, $|v_4| = 0,18 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$.

Для проверки корректности представленного способа декомпозиции необходимо произвести суперпозицию полученных сигналов (восстановить) и выполнить сравнение полученной суперпозиции с исходным СРП (репером).

Поскольку на рис. 1 представлена временная область приведенного сигнала, то и работать необходимо с приведенными начальными амплитудами. Очевидно, что $|v_1| \approx 0,3 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ является максимальным значением, поэтому $U_{01} = |v_1|/|v_1| = 1$, $U_{02} = |v_2|/|v_1| \approx 0,63$, $U_{03} = U_{04} = |v_3|/|v_1| \approx 0,6$.

Используя выражение (1), получим:

$$U = e^{-0,3 \cdot 10^9 t} \cdot \sin(2\pi \cdot 0,5 \cdot 10^9 t) + 0,63e^{-0,5 \cdot 10^9 (t-0,8 \cdot 10^{-9})} \cdot \sin(2\pi \cdot 10^9 t) + 0,6e^{-0,2 \cdot 10^9 (t-0,5 \cdot 10^{-9})} \cdot \sin(2\pi \cdot 2,5 \cdot 10^9 t) + 0,6e^{-0,4 \cdot 10^9 (t-2,5 \cdot 10^{-9})} \cdot \sin(2\pi \cdot 4 \cdot 10^9 t) \quad (8)$$

Для определения корректности восстановления СРП недостаточно вычислить взаимную корреляцию двух кривых, поскольку общая корреляция может существенно отличаться от корреляции в определенном диапазоне. Поэтому необходимо, опираясь на выражение (4), вычислить корреляционную функцию $r(h)$ между восстановленным сигналом и репером [12]:

$$r(h) = \frac{\sum_{i=h}^{M+h} (Y_{1,i} - \bar{Y}_1) \cdot (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)}{\sqrt{\sum_{i=h}^{M+h} (Y_{1,i} - \bar{Y}_1)^2 \cdot \sum_{i=h}^{M+h} (Y_{2,i} - \bar{Y}_2)^2}}, \quad (9)$$

где $Y_1 = \frac{U}{U_M}$ – выборки значений восстановленного сигнала, $Y_2 = \frac{U_B}{U_{MB}}$ – выборки значений

репера, $\bar{Y}_1 = \frac{1}{M} \sum_{i=h}^{M+h} Y_{1,i}$, $\bar{Y}_2 = \frac{1}{M} \sum_{i=h}^{M+h} Y_{2,i}$ – сред-

ние значения выборок, M – число выборок («окно»), U – значение сигнала a в точке выборки, U_M – максимальное значение сигнала a , U_B – значение сигнала b в точке выборки, U_{MB} – максимальное значение сигнала b , $0 < h < K-M$.

На рис. 5 по полученным выражениям (8) и (9) построена корреляционная функция (рис. 5в) исходного (рис. 5б) и восстановленного сигналов (рис. 5а).

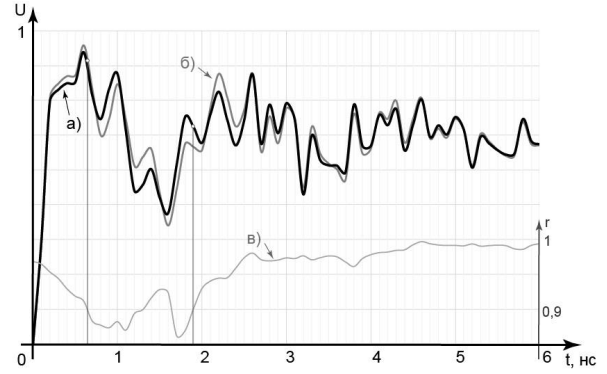


Рис. 5. Корреляционная функция восстановленного и исходного СРП

Опираясь на коэффициенты Чеддока [13], по рис. 5 видно, что параметры колебания $i = 2$ рассчитаны с достаточно высокой погрешностью (взаимная корреляция на данном участке $r < 0,9$). Данная погрешность могла возникнуть вследствие низкой энергетики быстро затухающего колебания ($i = 2$), что подтверждает приведенный частотный спектр СРП (рис. 2), а также в результате частотно-временной неопределенности при определении частотно-временного спектра СРП (рис. 3). Для корректировки данного недостатка нужно обратить внимание на «отставание» восстановленного сигнала от репера в диапазоне, указанном на рис. 5. Таким образом, необходимо увеличивать значение параметра t_{02} до достижения взаимной корреляции на данном участке приемлемой величины $r \geq 0,9$. Данное условие выполняется при $t_{02} = 0,8 \text{ нс}$ (рис. 6).

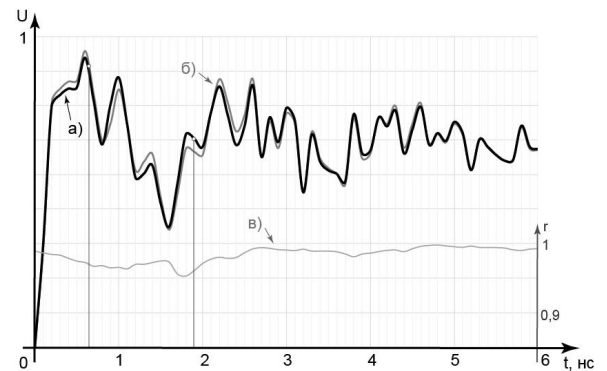


Рис. 6. Корреляционная функция скорректированного восстановленного и исходного СРП

Очевидно, что число итераций по корректировке восстановления может быть увеличено до достижения лучших результатов по взаимной корреляции восстановленного и исходного СРП.

Выводы

В работе представлен новый способ декомпозиции СРП, зарегистрированных при собственных излучениях электронного устройства, связанных с перераспределением энергии в реактивных накопителях его печатных узлов. Основное достоинство представленного разложения – наличие корреляционной оценки, позволяющей произвести коррекцию восстановленных параметров каждого из присутствующих колебаний, что является основным отличием от известных методов преобразований. В качестве недостатка следует отметить влияние частотно-временной неопределенности на ДПФ [14]. С уменьшением размера «окна» увеличивается разрешение по времени, но уменьшается разрешение по частоте, и, наоборот, с увеличением размера «окна» разрешение по времени уменьшается. Данный недостаток также нивелируется введением анализа корреляционной функции.

Декомпозиция СРП с анализом корреляционной функции ввиду высокой скорости преобразований и простоты своей реализации может быть исполнена на ПЛИС, как самостоятельное радиотехническое устройство, открывая новые перспективы в области пассивной радиосенсорной ТД и аутентификации электронных приборов.

Литература

1. Костин М.С., Ворунчев Д.С. Реинжиниринг радиоэлектронных средств: монография. М.: Московский технологический университет (МИРЭА), 2018. 130 с.
2. Бойков К.А., Костин М.С., Куликов Г.В. Радиосенсорная диагностика целостности сигналов внутрисхемной и периферийной архитектуры микропроцессорных устройств // Российский технологический журнал. 2021. №9(4). С.20–27. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27>.
3. Бойков К.А., Костин М.С. Метод радиосенсорной технической диагностики микропроцессорных устройств

// Наука – Общество – Технологии – 2021: материалы Всерос. науч.-практ. конф. М.: Московский Политех, 2021. С.119-123.

4. Пат. 2755153 Рос. Федерации МПК H04L 9/32. Метод радиоволновой аутентификации микропроцессорных устройств/ Бойков К.А.; заявитель и правообладатель Бойков К.А. № 2021103796; заявл. 16.02.2021; опубл. 13.09.2021, Бюл. №26. 3с.
5. Бойков К.А. Моделирование и анализ колебательного перераспределения энергии при собственных электромагнитных излучениях в ключевых радиоэлектронных схемах на МОП-транзисторах // Журнал радиоэлектроники [электронный ресурс]. 2021. №6. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14>.
6. Кудряков С.А. Радиотехнические цепи и сигналы. СПб.: Изд-во «Свое Издательство», 2015. 340 с.
7. Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao. Oscillatory-Plus-Transient Signal Decomposition Using TQWT and MCA// Journal of electronic science and technology. 2019. Vol. 17. No. 2. P. 135-151
8. Gonzalez R.C., Woods R.E. Digital Image Processing// 4th Ed. Published by Pearson. 2018. 1168 p.
9. Пономарева О.В., Пономарев А.В., Смирнова Н.В. Определение дискретно-частотного преобразования Фурье методом дискретного преобразования Фурье с варьируемым параметром во временной области // Цифровая обработка сигналов. 2021. № 1. С. 3-9.
10. Частотно-временной анализ нестационарных сигналов методами вейвлет-преобразования и оконного преобразования Фурье/ Н.В. Астахов, А.В. Башкиров, О.Е. Журилова, О.Ю. Макаров// Радиотехника. 2019. Т. 83. № 6 (8). С. 109-112.
11. Данилов Д.Е. Оконное преобразование Фурье при вычислении частотно-временных корреляционных функций. Globus// Технические науки. 2020. № 4 (35). С. 20-25.
12. Бойков К.А. Разработка и исследование системы радиоимпульсной регенерации для устройств высокоскоростной стробоскопической оцифровки// Журнал радиоэлектроники [электронный ресурс]. 2018. №3. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf>
13. Костин М.С., Шильцин А.В. Моделирование радиофотонных повторителей субнаносекундных сигналов с дробным мультиплексированием // Актуальные проблемы и перспективы развития радиотехнических и инфокоммуникационных систем («Радиоинфоком-2019»): сб. тр. IV междунар. науч.-практ. конф. М.: МИРЭА – Российский технологический университет, 2019. С. 257-260.
14. Осипов О.В. Прямое быстрое преобразование Фурье по основанию два с высоким частотным разрешением // Цифровая обработка сигналов. 2018. № 4. С. 59-62.

Поступила 25.11.2021; принята к публикации 17.02.2022

Информация об авторах

Бойков Константин Анатольевич - канд. техн. наук, доцент кафедры радиоволновых процессов и технологий, Институт радиотехнических и телекоммуникационных систем «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, г. Москва, пр-т Вернадского, д. 78), e-mail: nauchnyi@yandex.ru

DECOMPOSITION OF SIGNAL RADIO PROFILE IN PASSIVE RADIO-SENSOR TECHNICAL DIAGNOSIS AND AUTHENTICATION OF ELECTRONIC DEVICES

K.A. Boykov

Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems "MIREA - Russian Technological University", Moscow, Russia

Abstract: the paper presents a new method for decomposition of the signal radio profile obtained by recording the electrical component of the electromagnetic radiation of an electronic device. This radio profile carries information about the technical condition and individual characteristics of the electronic device. For a detailed study, it is necessary to decompose into the simplest damped components and determine their parameters. The number of damped components and each of their parameters carries information about the electronic device and its state. In the proposed decomposition method, an analog of the windowed Fourier transform is used to construct the time-frequency dependences of the amplitude spectrum of the signal under study. Examining the constructed dependences for extrema and carrying out their approximation, I found such parameters as the damping coefficient, the oscillation frequency, the time of the onset of radiation, and the reduced initial amplitude. The time-frequency contradiction of the window transformation, the low energy of rapidly damped oscillations gives rather high errors. To correct, I introduced a window correlation feedback - the construction of a temporal correlation function between the reconstructed and the original signal radio profile. If the correlation coefficient in any time section of the signal radio profile has not reached the threshold set by the user, then the values of the parameters affecting the change are changed. This operation is carried out until the required correlation coefficient is reached. The presented decomposition can be performed on FPGA, improving the quality of radiosensor technical diagnostics and authentication of electronic devices

Key words: signal radio profile, decomposition, correlation analysis, Fourier transform, technical diagnostics, time-frequency dependence

References

1. Kostin M.S., Vorunichev D.S. "Reengineering of radio-electronic means" ("Reinzhiniring radioelektronnykh sredstv"), monograph, Moscow Technological University (MIREA), 2018, 130 p.
2. Boykov K.A., Kostin M.S., Kulikov G.V. "Radiosensory diagnostics of the integrity of signals of in-circuit and peripheral architecture of microprocessor devices", *Russian Technological Journal (Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal)*, 2021, no. 9 (4), pp. 20-27, doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-4-20-27.
3. Boykov K.A., Kostin M.S. "Method of radiosensory technical diagnostics of microprocessor devices", *Proc. of the All-Russian Scientific-Practical Conf. "Science - Society - Technologies - 2021" (Nauka – Obshchestvo – Tekhnologii – 2021: materialy Vseros. nauch.-prakt. konf.)*, Moscow: Moskovskiy Politekh, 2021, pp.119-123.
4. Boykov K.A. "Method of radio wave authentication of microprocessor devices" ("Metod radiovolnovoy autentifikatsii mikroprotssornykh ustroystv), patent 2755153 Rus. Federation IPC H04L 9/32, no. 2021103796; declared 02/16/2021; publ. 13.09.2021, bul.26.
5. Boykov K.A. "Modeling and analysis of vibrational energy redistribution in the case of intrinsic electromagnetic radiation in key electronic circuits on MOS transistors", *Journal of Radio Electronics (Zhurnal radioelektroniki)*, 2021, no. 6, available at: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2021.6.14>.
6. Kudryakov S.A. "Radio engineering circuits and signals" ("Radiotekhnicheskie tsepi i signaly"), St. Petersburg: Svoye, 2015, 340 p.
7. Ravi Shankar Reddy G., Rameshwar Rao. "Oscillatory-plus-transient signal decomposition using TQWT and MCA", *Journal of Electronic Science and Technology*, June 2019, vol. 17, no. 2, pp. 135-151.
8. Gonzalez R.C., Woods R.E. "Digital image processing", Pearson, 2018, 1168 p.
9. Ponomareva O.V., Ponomarev A.V., Smirnova N.V. "Determination of the discrete-frequency Fourier transform by the method of discrete Fourier transform with a variable parameter in the time domain", *Digital Signal Processing (Tsifrovaya obrabotka signalov)*, 2021, no. 1, pp. 3-9.
10. Astakhov N.V., Bashkurov A.V., Zhurilova O.E., Makarov O.Yu. "Time-frequency analysis of non-stationary signals by methods of wavelet transform and windowed Fourier transform", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2019, vol. 83, no. 6 (8), pp. 109-112.
11. Danilov D.E. "Windowed Fourier transform for calculating time-frequency correlation functions", *Globus: Technical Sciences (Globus. Tekhnicheskie nauki)*, 2020, no. 4 (35), pp. 20-25.
12. Boykov K.A. "Development and research of a radio-pulse regeneration system for devices of high-speed stroboscopic digitization", *Journal of Radio Electronics (Zhurnal radioelektroniki)*, 2018, no. 3, available at: <http://jre.cplire.ru/jre/mar18/6/text.pdf/>.
13. Kostin M.S., Shiltsin A.V. "Modeling of radio-photon repeaters of subnanosecond signals with fractional multiplexing", *Proc. of IV Int. Sci. and Practical Conf. "Actual Problems and Prospects for the Development of Radio Engineering and Infocommunication Systems ("Radioinfocom-2019")*, MIREA - Russian Technological University, 2019, pp. 257-260.
14. Osipov O.V. "Forward fast fourier transform in base two with high frequency resolution", *Digital Signal Processing (Tsifrovaya obrabotka signalov)*, 2018, no. 4, pp. 59-62.

Submitted 25.11.2021; revised 17.02.2022

Information about the author

Konstantin A. Boykov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78 Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia), e-mail: nauchnyi@yandex.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕНЕТИЧЕСКОГО АЛГОРИТМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ АМПЛИТУДНО-ФАЗОВОГО РАСПРЕДЕЛЕНИЯ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ

И.А. Баранников¹, К.А. Бердников¹, Е.А. Ищенко¹, К.В. Смусева², С.М. Фёдоров¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский государственный университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается генетический алгоритм как способ расчета амплитудно-фазового распределения в фазированной антенной решетке (ФАР). Благодаря предложенному алгоритму возможно определить амплитудно-фазовое распределение с высокой точностью и эффективностью. На основе полученных значений производилась проверка полученных результатов путем проведения электродинамического моделирования с использованием двух методов: множителя антенной решетки и полного проекта антенной решетки с указанным амплитудно-фазовым распределением. На основе полученных результатов можно сделать вывод, что применение генетического алгоритма позволяет достичь требуемых характеристик диаграммы направленности, а также определить необходимое амплитудно-фазовое распределение для обеспечения направленного излучения в требуемом направлении. Для подтверждения верности работы алгоритма было определено амплитудно-фазовое распределение для направления главного лепестка в 0 и 30 градусов. В качестве электродинамической модели базовым антенным элементом выступала патч-антенна. Проведенное электродинамическое моделирование подтвердило высокую корреляцию результатов, а также верность амплитудно-фазового распределения, полученного генетическим алгоритмом. В работе приводится описание генетического алгоритма, а также представлены диаграммы направленности для всех исследованных методов расчета итоговых характеристик: математического, множителя антенной решетки, моделирования полного проекта

Ключевые слова: амплитудно-фазовое распределение, антенная решетка, генетический алгоритм

Введение

Антенные решетки являются неотъемлемой частью современных систем связи. На основе активных фазированных антенных решеток разрабатываются радиолокационные станции, обеспечивается режим формирования луча в антенных системах сотовой связи. Особо важными фазированные антенные решетки станут в задачах сотовой связи пятого поколения, так как для повышения качества и эффективности связи в миллиметровом диапазоне планируется применение SMART-антенных решеток.

В работе авторов [1] рассматривается метод формирования антенной решетки на основе умножения диаграмм направленности. При этом сформированная антенная решетка предназначена для пеленгации объектов с малыми значениями эффективной площади рассеяния, что является одной из основных задач использования фазированных антенных решеток (ФАР).

Другой пример использования ФАР приводится в работе [2]. Как показывают авторы, использование даже четырехэлементной малой

антенной решетки для миллиметрового диапазона радиоволн сетей пятого поколения позволяет повысить направленные свойства антенны, а возможность поворота главного лепестка позволяет обеспечить формирование луча при связи, что является одним из основных требований для антенных систем, предназначенных для сетей пятого поколения.

В работе [3] авторами предлагается конструкция ФАР с круговым обзором, которого удастся достичь благодаря использованию технологии изогнутых антенн. Такая конструкция ФАР позволяет обеспечить работу как при линейных типах поляризации электромагнитных волн, так и при круговых.

Другим направлением применения ФАР является спутниковая связь [4]. Благодаря повышению направленных свойств удастся достичь улучшенных характеристик связи, что особо важно в задачах связи на большие расстояния.

Таким образом, можно сделать вывод, что применение фазированных антенных решеток важно во многих задачах современной связи, при этом удастся достичь повышения направленных свойств антенны, а также сканирования главным лепестком. Поэтому очень важной остается задача нахождения оптимального ам-

плитудно-фазового распределения в антенной решетке. В данной работе предлагается новый алгоритм нахождения амплитудно-фазового распределения на основе генетического алгоритма.

Генетический алгоритм

Генетический алгоритм является типовым для решения многих задач в биологии, которые связаны с генетикой и прогнозом характеристик популяции. Для математических расчетов этот алгоритм интересен благодаря тому, что он является адаптивным методом поиска минимума или максимума функции. Каждый последующий расчет в генетическом алгоритме учитывает предыдущие расчеты и на основе этого делает прогноз результатов и в случае достижения результата выдает итоговый результат.

В нашем случае благодаря адаптивным расчетам становится возможным обнаружение оптимального амплитудно-фазового распределения для антенной решетки. Стартовыми значениями при расчетах являются предельные значения фазы и амплитуды для амплитудно-фазового распределения, которое будет получено в итоге.

Детализировано в процессе нахождения распределения введенные начальные данные проходят через следующие стадии в генетическом алгоритме:

1. Формирование начальной популяции – выполняется на основе исходного амплитудно-фазового распределения, которое описывается предельными значениями амплитуды и фазы. Стоит учитывать лишь то, что при введении изначальных условий число фаз и амплитуд должно соответствовать числу антенных элементов, иначе алгоритм закончится с ошибкой;

2. Процедура селекции производит отбор наиболее подходящих результатов. В генетическом алгоритме используется четыре вида селекции:

2.1. Турнирная селекция – сущностью такой селекции является взятие двух случайных особей и сравнение их приспособленностей на основе целевой функции;

2.2. Метод рулетки – основывает вероятность выживания особи прямо пропорционально приспособленности ее к целевой функции:

$$p_i = \frac{f_i}{\sum_{i=1}^N f_i}, \quad (1)$$

где p_i – вероятность выбора i -го объекта в процессе селекции; f_i – результат целевой функции для объекта; N – число всех объектов в группе;

2.3. Метод ранжирования – основан на позиции, в которой оказывается объект, отсортированный в соответствии с требованиями целевой функции:

$$p_i = \frac{1}{N} \left(a - (a - b) \cdot \frac{i-1}{N-1} \right), \quad (2)$$

где $a \in [1,2]$; $b = 2 - a$; i – порядковый номер исследуемой пары значений на основе функции приспособленности;

2.4. Равномерное ранжирование – осуществляет выбор в соответствии с выражением:

$$p_i = \begin{cases} \frac{1}{\mu}, & \text{при } 1 \leq i \leq \mu, \\ 0, & \text{при } \mu \leq i \leq N, \end{cases} \mu \leq N. \quad (3)$$

Благодаря такой модели работы генетического алгоритма селекции становится возможным определение оптимального амплитудно-фазового распределения для антенной решетки. Рассмотрим математический алгоритм, который позволяет определить амплитудно-фазовое распределение для ФАР.

Использование генетического алгоритма для определения амплитудно-фазового распределения

Для определения диаграммы направленности в антенной решетке используется выражение:

$$F(\theta) = \sum_{i=1}^N A_i \cdot \exp(j \cdot \theta_i) \cdot \exp(-j \cdot k_0 \cdot x \cdot \sin(\theta)), \quad (4)$$

где A_i – амплитудное распределение в антенной решетке i -го элемента; θ_i – фазовое распределение в антенной решетке i -го элемента; N – число элементов в антенной решетке; $k_0 = \frac{2\pi}{\lambda}$ – волновое число; x – координаты элемента в решетке.

На основании данного выражения возможно построить результирующую диаграмму направленности для всей антенной решетки в соответствии с амплитудно-фазовым распределением. Для этого в расчетах с генетическим алгоритмом требуется:

1. Выбрать целевую частоту антенной решетки;

2. Определить расстояние между антенными элементами в решетке, что используется

в дальнейшем для определения координат антенного элемента в решетке;

3. Определить целевую функцию алгоритма в соответствии с целевым углом максимума результирующей диаграммы направленности:

$$f_{MGA} = \frac{\int_0^{2\pi} |F(\theta)|^2 d\theta}{|F(\theta_{target})|^2}, \quad (5)$$

где f_{MGA} – целевая функция для генетического алгоритма; $|F(\theta)|$ – диаграмма направленности антенной решетки (взятие модуля от выражения (4)); θ_{target} – целевой угол максимума диаграммы направленности;

4. Определение амплитудно-фазового распределения на основе генетического алгоритма:

$$MGA(2 \cdot N, \mu, D, \varepsilon, f_{MGA}) = \begin{pmatrix} A_i \\ \vdots \\ \theta_i \end{pmatrix}, \quad (6)$$

где MGA – генетический алгоритм; N – число антенных элементов; μ – число переборов (особей) влияет на количество и точность расчетов в процессе исследования принято равным 40; D – изначальные условия, представляют из себя матрицу из двух столбцов: нулевого и разделенного на пополам второго, верхняя часть – максимумы амплитуды в распределении, нижняя – 2π ; ε – точность расчетов (была принята как 0.005); f_{MGA} – целевая функция.

На основе проведенного расчета будет получен вектор значений из амплитуд и фаз для получения целевой диаграммы направленности. Произведем проверку работы генетического алгоритма на основе электродинамического моделирования.

Проверка генетического алгоритма с использованием моделирования

Для проверки работоспособности генетического алгоритма было определено амплитудно-фазовое распределение для антенной решетки из 8 элементов с целевыми углами максимума диаграммы направленности 0° и 30° . Исследуемая в процессе моделирования антенная решетка была сформирована из патч-антенн с целевой частотой 6 ГГц и расстоянием между элементами в 25 мм – рис. 1.

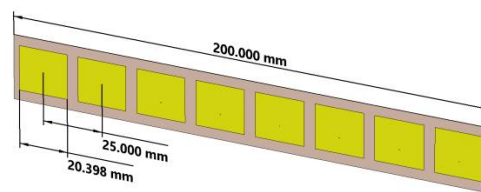


Рис. 1. Линейная ФАР из 8 элементов

Для полученной антенной решетки были построены нормированные диаграммы направленности тремя способами: математическим расчетом на основе (4); с использованием множителя решетки для одного элемента (Array Factor); моделированием полноразмерной модели ФАР с указанием амплитудно-фазового моделирования.

Полученные диаграммы направленности приводятся на рис. 2.

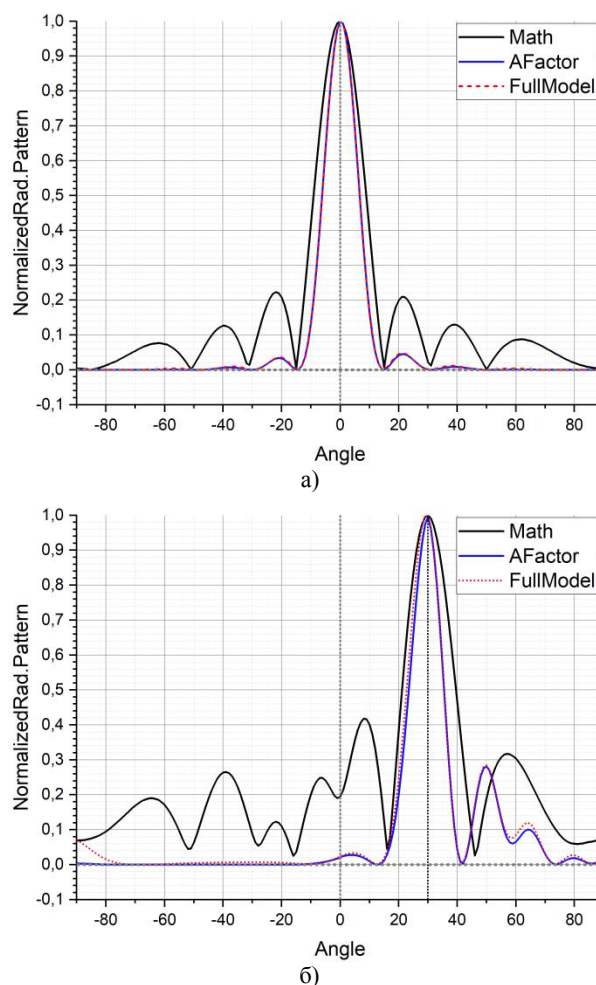


Рис. 2. Диаграммы направленности с использованием амплитудно-фазового распределения на основе генетического алгоритма: а) целевой угол 0 градусов; б) целевой угол 30 градусов

Как видно по полученным результатам, удается достичь точной настройки направления излучения антенной решетки. При этом стоит отметить, что благодаря использованию планарных антенных элементов результирующие модели обладают более узким главным лепестком с малыми боковыми лепестками. Также отчетливо видно, что антенная решетка из 8 элементов обладает высокой точностью расчетов характеристик как при использовании множителя решетки (Array Factor), так и при полноразмерном моделировании.

Заключение

Существует множество способов определения амплитудно-фазового распределения антенных решеток для оптимизации характеристик результирующей диаграммы направленности. В данной работе был предложен новый способ на основе генетического алгоритма, который показал свою эффективность результатами электродинамического моделирования. Рассчитанные таким методом амплитуды и фазы позволяют сформировать направленную

диаграмму направленности с направлением главного лепестка, которое соответствует целевому.

Литература

1. Method to Estimate Antenna Mode Radar Cross Section of Large-Scale Array Antennas / L. Gan, W. Jiang, Q. Chen, X. Li, Z. Zhou, S. Gong // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2021. Vol. 69. №. 10. Pp. 7029-7034.
2. Li W.-Y., Chung W., Chou J.-H. Highly-Integrated Wideband 28 GHz and 39 GHz Array Antennas for 5G Mobile Phone Applications // 2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting. 2020. Pp. 1581-1582.
3. Knott P. Design and Experimental Results of a Spherical Antenna Array for a Conformal Array Demonstrator // 2007 2nd International ITG Conference on Antennas. 2007. Pp. 120-123.
4. Beam scanning of phased array antenna using phase modification method for satellite application / A.A.S.A. Shah, N.H.A. Rahman, M.T. Ali, N.F. Fauzi, A.A.A. Aziz // 2016 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE). 2016. Pp. 291-295.

Поступила 27.12.2021; принята к публикации 21.02.2021

Информация об авторах

Баранников Илья Андреевич – студент, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>

Бердников Кирилл Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kir_ber@mail.ru

Ищенко Евгений Алексеевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Смусева Ксения Владимировна – студент, Воронежский государственный университет (394018, Россия, г. Воронеж, Университетская площадь, 1), e-mail: smusevaz@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8515-2841>

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), e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

RESEARCH OF POSSIBILITY OF USING GENETIC ALGORITHM FOR DETERMINATION OF ANTENNA ARRAY AMPLITUDE-PHASE DISTRIBUTION

I.A. Barannikov¹, K.A. Berdnikov¹, E.A. Ishchenko¹, K.V. Smuseva², S.M. Fyedorov¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Voronezh State University, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses a genetic algorithm as a method for calculating the amplitude-phase distribution in a phased array antenna. Thanks to the proposed algorithm, it is possible to determine the amplitude-phase distribution with high accuracy and efficiency. On the basis of the obtained values, we checked the obtained results by carrying out electrodynamic modeling using two methods: the antenna array multiplier and the complete design of the antenna array with the indicated amplitude-phase distribution. On the basis of the results obtained, it can be concluded that the use of the genetic algorithm makes it possible to achieve the required characteristics of the radiation pattern, as well as to determine the necessary amplitude-phase distribution to provide directional radiation in the required direction. To confirm the correctness of the algorithm, we determined the amplitude-phase distribution for the direction of the main lobe at 0 and 30 degrees. The basic antenna element was a

patch antenna as an electrodynamic model. The performed electrodynamic modeling confirmed the high correlation of the results, as well as the correctness of the amplitude-phase distribution obtained by the genetic algorithm. The paper provides a description of the genetic algorithm, as well as provides directional diagrams for all investigated methods of calculating the final characteristics: mathematical, antenna array multiplier, modeling of a complete project

Key words: amplitude-phase distribution, antenna array, genetic algorithm

References

1. Gan L., Jiang W., Chen Q., Li X., Zhou Z., Gong S. "Method to estimate antenna mode radar cross section of large-scale array antennas", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2021, vol. 69, no. 10, pp. 7029-7034.
2. Li W.-Y., Chung W., Chou J. -H. "Highly-integrated wideband 28 GHz and 39 GHz array antennas for 5G mobile phone applications", *2020 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and North American Radio Science Meeting*, 2020, pp. 1581-1582.
3. Knott P. "Design and experimental results of a spherical antenna array for a conformal array demonstrator", *2007 2nd International ITG Conference on Antennas*, 2007, pp. 120-123.
4. Shah A.A.S.A., Rahman N.H.A., Ali M.T., Fauzi N.F., Aziz A.A.A. "Beam scanning of phased array antenna using phase modification method for satellite application", *2016 IEEE Asia-Pacific Conference on Applied Electromagnetics (APACE)*, 2016, pp. 291-295.

Submitted 27.12.2021; revised 21.02.2021

Information about the authors

Il'ya A. Barannikov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: 8thbar@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3093-0455>
Kirill A. Berdnikov, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kir_ber@mail.ru
Evgeniy A. Ishchenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>
Kseniya V. Smuseva, student, Voronezh State University (1 Universitetskaya sq., Voronezh 394018, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: smusevaz@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8515-2841>
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 Solnechnaya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

**ТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО РЕМОНТА
ПОВЕРХНОСТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ
МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО НАКЛЕПА****О.В. Уразов¹, А.Д. Данилов²****¹Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция»,
г. Нововоронеж, Россия****²Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия**

Аннотация: представлены результаты работы по техническому обеспечению процесса восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов различных диаметров методом поверхностного наклепа, реализующего явление *поверхностного пластического деформирования*, приводящее к изменению распределения напряжений по толщине. В результате проведенных лабораторных исследований данного процесса на Нововоронежской АЭС был разработан специализированный технический комплекс для восстановительного ремонта поверхностных повреждений трубопроводов различного диаметра без остановки технологических процессов. С помощью лабораторного стенда были исследованы следующие физико-механические характеристики: глубина наклепа; величина остаточных напряжений; глубина распределения остаточных напряжений; время обкатки; нагрузка на ролик. Доказано очевидное преимущество роликов большего радиуса профиля - они позволяют обеспечить необходимое изменение шероховатости обрабатываемой поверхности при обкатке с большей подачей, что приводит к снижению времени технологического процесса. При этом в принятом диапазоне параметров режимов обкатки (нагрузка 2500÷3000Н, глубина вдавливания 0.04÷0.06мм) величины компонентов остаточных напряжений оказались практически идентичными для рассмотренных режимов для всех исследованных роликов. Дальнейшие исследования остаточного смещения поверхностного слоя при различных режимах обкатки, измерения микротвердости и твердости по Виккерсу с записью диаграммы вдавливания, анализ микроструктуры приповерхностных слоев стали 10ГН2МФА после ППД позволили сделать вывод о соответствии восстановленных поверхностей эксплуатационным требованиям. Таким образом, представленный в статье технический комплекс был допущен к промышленной эксплуатации

Ключевые слова: поверхностный наклеп, поверхностное пластическое деформирование, остаточное напряжение, технический комплекс

Введение

Трубопроводы первого контура АЭС с ВВЭР являются одним из основных элементов реакторной установки, обеспечивающих эксплуатацию в рамках проектных требований. С увеличением срока службы АЭС возрастает число эксплуатационных режимов, которые приводят к повреждению от циклических нагрузок, связанному не только с дефектообразованием, но и со снижением служебных свойств (потеря пластичности, прочности) вследствие исходных технологических микроструктурных повреждений наиболее «ослабленных» зон сварного соединения. Большинство эксплуатационных повреждений обусловлено недостаточным сопротивлением металла сварных соединений зарождению и развитию трещин [1-5]. Как правило, эксплуатационные повреждения сопряжены со значительным эко-

логическим и материальным ущербом. Проблемой эксплуатации такого оборудования является невозможность оперативной остановки технологического процесса и демонтаж дефектных узлов для ремонта. Решение данной проблемы требует разработки специализированного оборудования и технологии восстановительного ремонта трубопроводов непосредственно в процессе эксплуатации.

На Нововоронежской атомной электростанции была разработана технология восстановительного ремонта, спроектировано и изготовлено оборудование, реализующее данную технологию для поврежденных поверхностей трубопроводов различных диаметров методом поверхностного наклепа [6, 7].

**Лабораторный стенд для отработки
технологии поверхностного наклепа**

Для отработки режимов поверхностного упрочнения был разработан и изготовлен лабо-

раторный стенд на базе станка с числовым программным управлением.

Стенд состоит из основных модулей, перечисленных ниже (рис. 1):

а) 3-координатной силовой рамы (штатива);

б) ПК;

в) блока управления;

г) программное обеспечение и программные профили настроек персонального компьютера.



Рис. 1. Лабораторный стенд для отработки технологии поверхностного наклепа

Конструкция лабораторного стенда следующая. 3-координатный штатив (рис. 2) представляет собой основание, выполненное из высокопрочного чугуна 1, на котором установлена силовая рама 2, представляющая собой металлоконструкцию коробчатого сечения. На основании 1 на прямоугольных шариковых направляющих с предварительным натягом 3 установлен стол продольного перемещения 4. На силовой раме 2 на прямоугольных шариковых направляющих с предварительным натягом 5 установлена каретка поперечного перемещения 6, на которой на прямоугольных шариковых направляющих с предварительным натягом 7 смонтирован стол вертикального перемещения 8. Перемещение стола продольного перемещения 4, каретки поперечного перемещения 6 и стола вертикального перемещения 8 осуществляется посредством шариковинтовых пар 9 с помощью шаговых двигателей 10. На столе вертикального перемещения 8 на кронштейне 11 установлена роликовая накатка 12. Элементы перемещений защищены от попадания

стружки двойной защитой (сальники + скребки), а ходовые винты дополнительно к этому защищены жалюзями. Максимальный статический момент (X, Y, Z) на ходовых винтах до 50 кг·см. Продольная подача 500 мм. Поперечная подача 370 мм. Вертикальная подача 160 мм. Масса 250 кг.

Вертикальная часть представляет собой направляющую, закрепленную на основании при помощи уголка, суппорт, фланец с концентрическим Т-образным пазом, проставку фланца, поворотный кронштейн крепления шпиндельной головки, узел быстрой подачи шпиндельной головки.

К суппорту через проставку крепится устройство для проведения поверхностного пластического деформирования (ППД), (рис. 3 а,б), которое состоит из корпуса 1, на котором на плоских упругих элементах 2 установлена державка 3 с накатным роликом 4. Величину усилия пластического деформирования контролируют с помощью индикатора 5.

С помощью лабораторного стенда были исследованы следующие физико-механические характеристики: глубина наклепа, величина остаточных напряжений, глубина распределения остаточных напряжений, время обкатки, нагрузка на ролик. Доказано очевидное пре-

имущество роликов большого радиуса профиля - они позволяют обеспечить необходимое изменение шероховатости обрабатываемой поверхности при обкатке с большей подачей, что приводит к снижению времени технологического процесса.

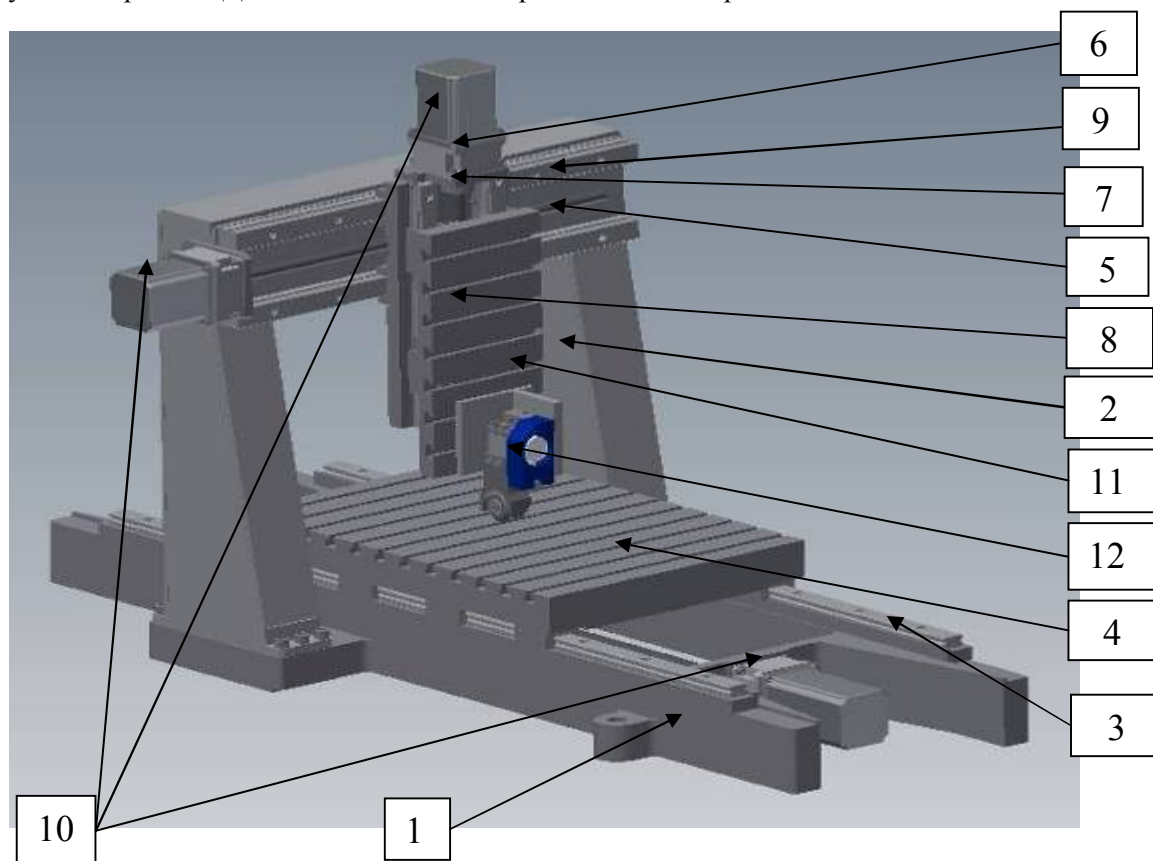
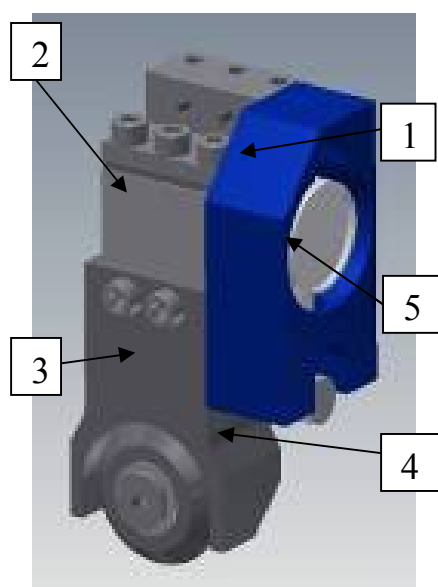
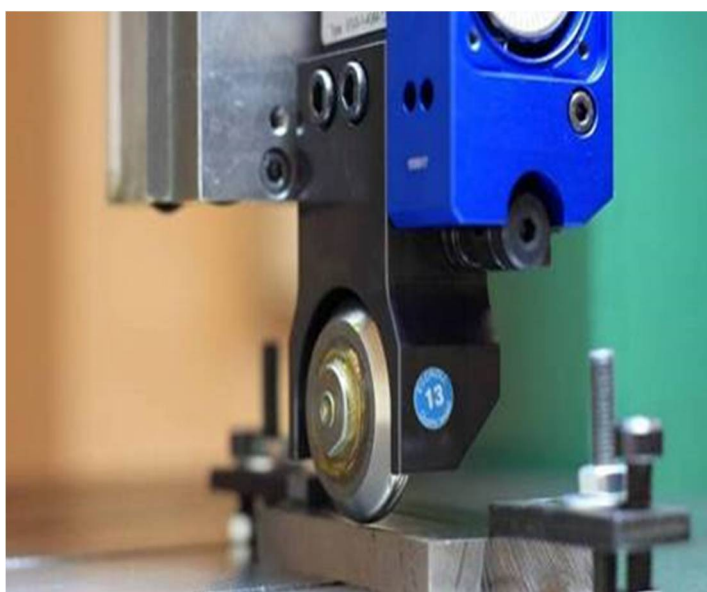


Рис. 2. Общий вид лабораторного стенда



а)



б)

Рис. 3. Устройство для проведения ППД: а) конструкция; б) внешний вид

Однако с увеличением скорости обкатывания помимо роста температуры в зоне обработки наблюдается некоторое снижение степени пластического деформирования, что связано с инерционностью материала [8]. С учетом этого экспериментально была выбрана скорость обкатывания $V=1000$ мм/мин.

Таким образом, например, для трубы $\varnothing 426 \times 40$ мм время одного оборота ролика равно:

$$t_{об} = \frac{l}{V} = \frac{\pi \cdot D}{V} = \frac{\pi \cdot 426 \text{ мм}}{1000 \text{ мм/мин}} = 1.34 \text{ мин}$$

Подача ролика S выбирается исходя из требуемого параметра итоговой шероховатости поверхности после обкатки и ширины заходной впадины $2a$.

В справочной литературе [8] рекомендованы следующие правила:

- для уменьшения R_a на 0.8 мкм $2a/S \geq 1.5$,
- для уменьшения R_a на 1.1-1.4 мкм $2a/S \geq 3$,
- для уменьшения R_a на 1.4-1.6 мкм $2a/S \geq 9$.

Основываясь на этих рекомендациях, было принято решение придерживаться соотношения $2a/S=5$.

Уменьшение подачи S приводит, с одной стороны, к увеличению времени накатки, а с другой – к снижению шероховатости. Величина подачи связана с параметром шероховатости R_z по формуле

$$R_z = R_{\text{ПР}} - \frac{\sqrt{4 R_{\text{ПР}}^2 - S^2}}{2},$$

где $R_{\text{ПР}}$ – радиус профиля ролика.

В результате экспериментов были получены средние значения диапазонов подачи S , приводящие к компромиссному решению между параметрами получаемой поверхности и временем обкатки:

$$S = 0.15 \text{ мм при } R_{\text{ПР}} = 2.5 \text{ мм}$$

$$S = 0.2 \text{ мм при } R_{\text{ПР}} = 4.0 \text{ мм}$$

При этом в принятом диапазоне параметров режимов обкатки (нагрузка $2500 \div 3000$ Н, глубина вдавливания $0.04 \div 0.06$ мм) величины компонентов остаточных напряжений оказались практически идентичными для рассмотренных режимов для всех рассмотренных роликов.

Технический комплекс для восстановительного ремонта поверхностных повреждений трубопроводов

С учетом полученных результатов (влияние силы и скорости обкатки, подачи, формы ролика, глубины обработки) [7] при лабораторных исследованиях режимов поверхностного упрочнения трубопроводов различных диаметров методом поверхностного наклепа на Нововоронежской АЭС была разработана автоматизированная установка по упрочнению сварных соединений трубопроводов большого диаметра (рис. 4).



Рис. 4. Установка для поверхностного упрочнения зоны повреждения сварных соединений $\varnothing 426 \times 40$

Механическая часть установки (рис. 5) состоит из устройства кругового движения узла нагружения с деформирующим роликом вокруг трубопровода 1; устройства продольной подачи узла нагружения с деформирующим роликом вдоль оси трубопровода 2; узла нагружения с деформирующим роликом 3; электронного блока управления.

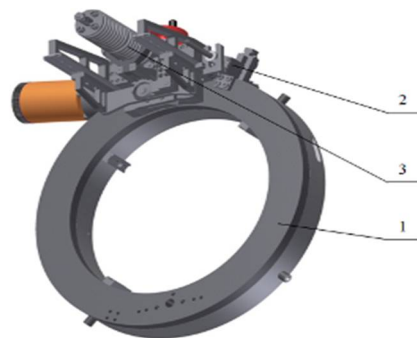


Рис. 5. Механическая часть установки

Устройство кругового движения узла нагружения с деформирующим роликом вокруг трубопровода (рис. 6) представляет собой разъемную конструкцию и состоит из основания 1 с направляющими роликами 2, планшайбы с зуб-

чатый венцом 3, опор крепления 4 и электропривода 5.

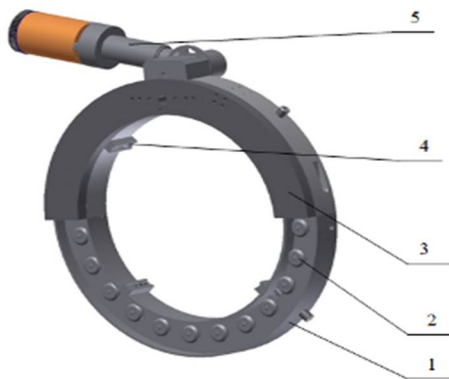


Рис. 6. Устройство кругового движения узла нагружения с деформирующим роликом вокруг трубопровода

Устройство продольной подачи узла нагружения с деформирующим роликом вдоль оси трубопровода (рис. 7) состоит из кронштейнов с направляющими 1, закрепленных на каретке 2 механизма радиального перемещения 3. На направляющих 1 установлены кронштейны 4, на которых крепится узел нагружения с деформирующим роликом 3. Осевое перемещение осуществляется посредством винтовой пары 5, на винте которой установлено зубчатое колесо 6, взаимодействующее с упором 7, закрепленным на основании 1.

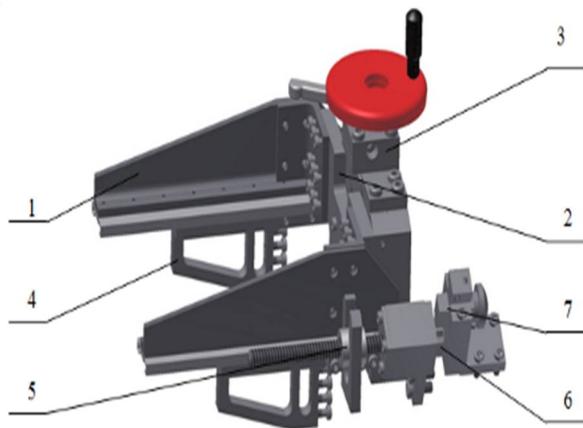


Рис. 7. Устройство продольной подачи узла нагружения с деформирующим роликом вдоль оси трубопровода

Узел нагружения с деформирующим роликом (рис. 8) состоит из блока силовых пружин 1, установленного на направляющих 2, закрепленных на площадке 3. Площадка 3 крепится к кронштейнам 4. Усилие от блока силовых пружин 1 посредством коромысла 4 и тяг 5 передается через двуплечий рычаг 6 и сферический упор 7 рычагу 8 с деформирующим роликом 9.

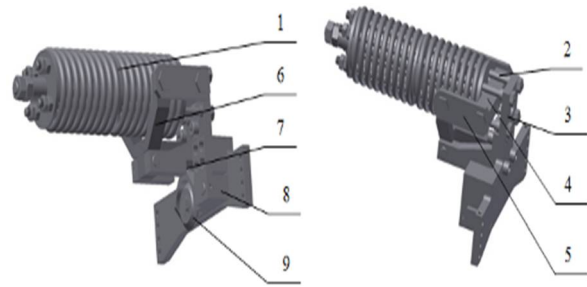


Рис. 8. Узел нагружения с деформирующим роликом

Заключение

В результате проведенных лабораторных исследований процесса восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов различных диаметров методом поверхностного наклепа, реализующего явление *поверхностного пластического деформирования*, приводящее к изменению распределения напряжений по толщине, на Нововоронежской АЭС был разработан специализированный технический комплекс для восстановительного ремонта поверхностных повреждений трубопроводов различного диаметра без остановки технологических процессов.

Апробация метода роликовой накатки композитных сварных соединений на примере дыхательного трубопровода АЭС с энергоблоком ВВЭР-1000 была проведена на полномасштабном тест-образце. Для этого было изготовлено 2 сварных соединения из 4-х темплетов, вырезанных из сектора трубы $\varnothing 990 \times 70$ мм с точным воспроизведением технологии плакирования и сварки, применяемых в монтажных условиях для компенсатора давления с трубопроводом Ду 350 ($\varnothing 426 \times 40$ мм).

Далее были проведены исследования на 3D цифровом микроскопе Keyence VHX-600 остаточного смещения поверхностного слоя при различных режимах обкатки (см. табл. 1).

Таблица 1

Результаты измерения остаточного смещения поверхностного слоя

Режим обработки	Остаточное смещение поверхностного слоя измеренное, мкм	Расчетное значение смещения поверхностного слоя, мкм
Одиночное вдавливание роликом с нагрузкой 250 кг.	39,2	34
Двухпроходный с нагрузкой 250 кг.	31	28

Измерения микротвердости и твердости по Виккерсу проводилось с применением твердо-

мера Zwick ZHU2,5 с записью диаграммы вдавливания. Результаты приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений твердости по Виккерсу

Поверхность стали	HV30	Среднее значение HV30
Исходная	193; 187; 188; 189; 189.	189,2
Однопроходная обработка	227; 224; 228; 222; 226.	225,4
Двухпроходная обработка	228; 226; 228; 233; 228.	228,6

Анализ микроструктуры приповерхностных слоев стали 10ГН2МФА после ППД и до обработки позволил сделать вывод о практическом отсутствии отличий в представленных образцах (рис. 9).



а)



б)

Рис. 9. Микроструктура стали до и после обработки соответственно

Данные исследования позволили сделать вывод о соответствии восстановленных поверхностей эксплуатационным требованиям.

Внедрение разработанного технического комплекса для восстановительного ремонта поверхностных повреждений трубопроводов методом поверхностного наклепа без остановки ядерного блока на Нововоронежской АЭС сокращает простой энергоблока ежегодно на 14 суток. Учитывая, что работа энергоблока позволяет в среднем произвести электроэнергии на 30 млн. руб. в сутки, предприятие за счет дополнительно произведенной электроэнергии увеличивает выручку предприятия более чем на 400 млн. рублей в год [7].

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. Ser. 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018, 2018. Pp. 2009.
4. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterruptible condition monitoring / V. Povarov, A. Danilov, V. Burkovsky, K. Gusev // MATEC Web of Conferences. 13. Ser. 13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" – 2018, 2018. Pp. 2012.
5. Расчетно-экспериментальная оценка влияния термической стратификации на эксплуатационную нагруженность дыхательного трубопровода энергоблока № 5 Нововоронежской АЭС / В.П. Поваров, О.В. Уразов, М.Б. Бакиров, В.И. Левчук // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2017. № 1. С. 5-16.
6. Restoration of metal properties of circulation pump blades by the method of surface ultrasonic impact treatment / V.P. Povarov, O.V. Urazov, M.B. Bakirov, S.S. Pakhomov, I.A. Belunik // Thermal Engineering. 2017. Vol. 64. № 10. Pp. 762-769.
7. Уразов О.В., Данилов А.Д. Исследование процесса восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов методом поверхностного наклепа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 5. С. 126-132.
8. Адашкин А.М., Седов Ю.Е., Онегина А.К. Материаловедение в машиностроении. М.: Издательство Юрайт, 2020. Ч. 1. 258 с.

Поступила 06.12.2021; принята к публикации 18.02.2022

Информация об авторах

Уразов Олег Владимирович – заместитель директора, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция» (396072, Россия, г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1), e-mail: urazovov@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Данилов Александр Дмитриевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (324026, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

TECHNICAL COMPLEX FOR THE RESTORATION REPAIR OF SURFACE DAMAGE OF PIPELINES BY THE METHOD OF SURFACE RIVETING

O.V. Urazov¹, A.D. Danilov²

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

²Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we present the results of work on the technical support of the process of restoring damaged surfaces of pipelines of various diameters by the method of surface riveting, which implements the phenomenon of surface plastic deformation, leading to a change in the distribution of stresses over the thickness. As a result of laboratory studies of this process at the Novovoronezh NPP, a specialized technical complex was developed for the restoration repair of surface damage to pipelines of various diameters without stopping technological processes. With the help of a laboratory stand, we investigated the following physical and mechanical characteristics: hardening depth, the value of residual stresses, the depth of distribution of residual stresses, the break-in time, the roller load. We proved the obvious advantage of rollers with a larger profile radius - they allow you to provide the necessary change in the roughness of the machined surface when running in with a larger feed, which leads to a decrease in the time of the technological process. At the same time, in the accepted range of parameters of the running-in modes (load 2500÷3000N, indentation depth 0.04÷0.06mm), the values of the residual stress components turned out to be almost identical for the considered modes for all considered rollers. Further studies of the residual displacement of the surface layer under different running conditions, measurements of microhardness and Vickers hardness with recording of the indentation diagram, analysis of the microstructure of the near-surface layers of 10GN2MFA steel after PPD made it possible to conclude that the restored surfaces correspond to operational requirements. Thus, the technical complex presented in the article was approved for commercial operation

Key words: surface riveting, roller running-in, surface plastic deformation, residual stress

References

1. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. "Automated system of multiparametric monitoring of parameters of the state of NPP power plants" ("Автоматизированная система многопараметрического мониторинга параметров состояния энергетических установок 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 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. Ser. "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. Ser. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics" Zavalishin's Readings – 2018*, 2018, pp. 2012.
5. Povarov V.P., Urazov O.V., Bakirov M.B., Levchuk V.I. "Computational and experimental assessment of the effect of thermal stratification on the operational load of the breathing pipeline of the Novovoronezh NPP Unit No. 5", *News of Higher Educational Institutions. Nuclear Power Engineering (Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Yadernaya energetika)*, 2017, no. 1, pp. 5-16.
6. Povarov V.P., Urazov O.V., Bakirov M.B., Pakhomov S.S., Belunik I.A. "Restoration of metal properties of circulation pump blades by the method of surface ultrasonic impact treatment", *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 10, pp. 762-769.
7. Urazov O.V., Danilov A.D. "Investigation of the process of restoration of damaged pipeline surfaces by the method of surface riveting", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 5, pp. 126-132.
8. Adaskin A.M., Sedov Yu.E., Onegina A.K. "Materials science in mechanical engineering" ("Materialovedenie v mashinostroyeni"), Moscow: Yurait, 2020, 258 p.

Submitted 06.12.2021; revised 18.02.2022

Information about the authors

Oleg V. Urazov, Deputy Director, branch of JSC "Concern Rosenergoatom" Novovoronezh Nuclear Power Plant (1 Yuzhnaya Industrial Zone, Novovoronezh 396072, Voronezh region, Russia), e-mail: urazovov@nvnpp1.rosenergoatom.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