

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

Учредитель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

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

Журнал выходит шесть раз в год

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

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

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

Ответственный секретарь Ю.В. Татаренко – Воронеж

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

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

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

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

Телефон: +7 (473) 246-28-63

E-mail: vestnik@vorstu.ru

Издатель: ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет»

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

© ФГБОУ ВО «Воронежский государственный технический университет», 2022

12+

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

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

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

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

The journal is published six times a year

EDITORIAL BOARD:

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

Executive secretary Yu.V. Tatarenko – Voronezh

MEMBERS OF EDITORIAL BOARD:

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

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

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

Phone number: +7(473)246-28-63

E-mail: vestnik@vorstu.ru

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

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

© Voronezh State Technical University, 2022

12+

СОДЕРЖАНИЕ

Информатика, вычислительная техника и управление

Синергетическая система нечёткого управления подвешенным грузом С.Л. Подвальный, А.А. Калтырина, Е.М. Васильев.....	7
Разработка программного обеспечения автоматизированной установки нанесения фоторезиста А.Н. Анненков, О.В. Белоусова.....	18
Математическая модель прогнозирования теплообмена одиночной капли доменного шлака при неустановившемся движении во встречном потоке газа Н.Н. Сеницын, Н.В. Запатрина, Ю.В. Донцова.....	30
IT-архитектура интеллектуального стенда А.В. Бредихин, В.В. Сокольников, Д.А. Зиновкина.....	39
Использование рекуррентных сетей для прогнозирования потребления электроэнергии С.Л. Подвальный, М.А. Лихотин, А.В. Михайлулов, А.К. Донских.....	45

Радиотехника и связь

Частотные характеристики модифицированных микрополосковых шлейфов, эквивалентных четвертьволновым отрезкам А.В. Останков, Н.Н. Щетинин, С.Ю. Дашян.....	51
Активный волноводный полосовой фильтр на основе метаматериала Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров, И.А. Черноиваненко...	57
Сравнительный анализ программных комплексов для определения тепловых характеристик радиоэлектронных устройств А.С. Костюков, С.А. Проценко, Г.И. Мурачёв, А.В. Бугаев, А.А. Затонский.....	61
Использование нейронных сетей для обнаружения ММО и декодирования каналов А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова (публикация отозвана 02.03.2026)	71
Использование нейросетевых алгоритмов для визуального контроля топологии печатных плат М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов.....	78
Плоские антенные решетки с различными способами расположения излучателей А.Д. Базанова, К.А. Лайко, Ю.О. Филимонова.....	83
Применение технологии виртуальных антенных решеток для повышения точности пеленгатора воздушного базирования Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров, И.А. Черноиваненко..	90
Методика автоматизированной оценки устойчивости электронных средств к электромагнитным помехам М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов.....	95
Улучшение конструктивных и энергетических параметров импульсных источников питания путем оптимизации высокочастотных потерь в обмотках магнитных компонентов Н.Ю. Веретенников, О.Ю. Денисов, А.В. Башкиров, О.Ю. Макаров.....	100
Идентификация речевых пауз в условиях сложной акустической помеховой обстановки Р.С. Власов, И.А. Козлов, А.А. Афанасьев, А.В. Питолин.....	106
Многодиапазонная патч-антенна на основе активного метаматериала Е.А. Ищенко, Ю.Г. Пастернак, В.А. Пендюрин, С.М. Фёдоров.....	113

Алгоритм сходимости для LDPC-кодека низкой сложности на основе нейронной сети М.В. Хорошайлова	117
--	------------

Машиностроение и машиноведение

Исследование физико-механических характеристик композитных сварных соединений установок АЭС, восстановленных методом поверхностного пластического деформирования О.В. Уразов, В.Г. Егоров, А.Д. Данилов, И.Г. Дроздов	124
Исследование кинематических углов фрезы-протяжки при обработке эксцентриковых валов В.В. Куц, Ю.А. Мальнева, А. Бейе	133
Методика определения толщины узких коллекторных сварных соединений с использованием ионизирующего излучения В.В. Шурупов, Д.И. Бокарев, В.П. Чумарный, С.В. Сафонов, М.Н. Давыдов	139

CONTENTS

Informatics, computer engineering and control

Synergic system of fuzzy control for suspended load S.L. Podval'ny, A.A. Kaltyrina, E.M. Vasil'ev.....	7
Development of software for automated photoresist application unit A.N. Annenkov, O.V. Belousova.....	18
Mathematical model for predicting heat exchange of a single blast of furnace slag droplet in unsteady motion in a counter gas flow N.N. Sinitsyn, N.V. Zapatrina, Yu.V. Dontsova.....	30
IT-architecture of an intelligent stand A.V. Bredikhin, V.V. Sokol'nikov, D.A. Zinovkina.....	39
Using recurrent networks to predict electricity consumption S.L. Podval'ny, M.A. Likhotin, A.V. Mikhaylusov, A.K. Donskikh.....	45

Radio engineering and communication

Frequency characteristics of modified microstrip sub lines equivalent to quarter-wave segments A.V. Ostankov, N.N. Shchetinin, S.Yu. Dachian.....	51
Active rectangular waveguide bandpass filter based on the metamaterial E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, S.M. Fyedorov, I.A. Chernoiivanenko.....	57
Comparative analysis of software packages for determining thermal characteristics of radio-electronic devices A.S. Kostyukov, S.A. Protsenko, G.I. Murachyev, A.V. Bugaev, A.A. Zatonkiy.....	61
Using neural networks for mimo detection and channel decoding A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, M.V. Khoroshaylova (publication retracted 02.03.2026).....	71
Using neural network algorithms for visual control of the topology of printed circuit boards M.A. Romashchenko, D.V. Vasil'chenko, D.A. Pukhov.....	78
Flat antenna arrays with various ways of emitter arrangement A.D. Bazanova, K.A. Layko, Yu.O. Filimonova.....	83
Application of virtual array technology to increase the accuracy of air-based direction finder E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, S.M. Fyedorov, I.A. Chernoiivanenko.....	90
The method of automated assessment of the stability of electronic means to electromagnetic interference M.A. Romashchenko, D.V. Vasil'chenko, D.A. Pukhov.....	95
Improving the design and energy parameters of switching power supplies by optimizing high-frequency losses in the windings of magnetic components N.Yu. Veretennikov, O.Yu. Denisov, A.V. Bashkirov, O.Yu. Makarov.....	100
Identification of speech pauses in conditions difficult acoustic interfering situation R.S. Vlasov, I.A. Kozlov, A.A. Afanas'ev, A.V. Pitolin.....	106
Multi-band patch antenna based on active metamaterial E.A. Ishchenko, Yu.G. Pasternak, V.A. Pendyurin, S.M. Fyedorov.....	113

Convergence algorithm for LDPC codec of low complexity based on neural network M.V. Khoroshaylova	117
---	------------

Mechanical engineering and science of machines

Study of the physical and mechanical characteristics of the composite welded joints of NPP installations restored by the method of surface plastic deformation O.V. Urazov, V.G. Egorov, A.D. Danilov, I.G. Drozdov	124
Investigation of changes in the kinematic angles of the milling cutter during the processing of eccentric shafts V.V. Kutz, Yu.A. Mal'neva, A. Beye	133
Method for determining the thickness of narrow collector welded joints using ionizing radiation V.V. Shurupov, D.I. Bokarev, V.P. Chumarny, S.V. Safonov, M.N. Davydov	139

СИНЕРГЕТИЧЕСКАЯ СИСТЕМА НЕЧЁТКОГО УПРАВЛЕНИЯ ПОДВЕШЕННЫМ ГРУЗОМ

С.Л. Подвальный, А.А. Калтырина, Е.М. Васильев

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается задача перемещения подвешенного груза без колебаний. На основе уравнений Лагранжа для обобщённых координат получена математическая модель системы “каретка-груз”, продемонстрированы существенная нелинейность модели и нестационарность её параметров. Сделан вывод о целесообразности решения поставленной задачи на основе синергетических принципов многоальтернативного управления, которые бы позволили формировать управление с максимальным использованием траекторий собственного движения объекта. С этой целью проведён анализ физического содержания процесса перемещения груза и установлено, что для реализации плоскопараллельного перемещения системы начало движения необходимо осуществлять в несколько этапов: приложить первоначальное силовое воздействие на каретку для трогания её с места, затем снять воздействие и обеспечить свободное движение груза и снова сообщить каретке ускорение с целью выравнивания её скорости со скоростью груза с последующим переходом к движению без раскачиваний. Для останова груза без колебаний достаточно создать симметричную последовательность команд с обратным знаком. Указанное управление предложено построить на основе нечётких процедур принятия решений, хорошо зарекомендовавших себя в условиях нестационарности параметров объекта. Сформировано множество входных и выходных лингвистических переменных регулятора и определён перечень нечётких величин, необходимых для реализации синергетического управления. Предложено разделить функции каналов обратной связи по угловому положению груза и его угловой скорости, определив для первого из них основную задачу компенсации колебаний, а для второго – функцию переключения режимов разгона и торможения. Полученный алгоритм нечёткого управления по своей простоте и физическому содержанию оказался близким к неформальным приёмам разгона и торможения грузов под управлением оператора-человека. Отмечено сходство этого алгоритма с оптимальным управлением, синтезируемым на основе принципа максимума по критерию быстродействия. Представлены результаты проверки работоспособности системы на имитационной модели и подтверждена эффективность предложенных алгоритмов управления

Ключевые слова: перемещение подвешенного груза, синергетические принципы многоальтернативного управление, нечёткий регулятор

Введение

Задача управления подвешенным грузом заключается в перемещении точки его подвеса по горизонтали таким образом, чтобы груз в процессе его движения не раскачивался или, иными словами, не изменял знака своего углового положения относительно вертикальной оси подвеса.

Практическая значимость этой задачи определяется широким распространением описанного способа перемещения грузов при погрузочно-разгрузочных работах на автомобильном, железнодорожном и водном транспорте, а также в разнообразных производственных процессах [1,2].

Физическая причина колебаний заключается в том, что уже в момент трогания с места груз, имеющий массу m_2 , в силу своей инерционности отстаёт от точки подвеса, и возникает

угловое отклонение α линии его подвеса от вертикали, рис. 1.

В результате груз приобретает потенциальную энергию, которая в процессе перемещения будет расходоваться на совершение медленно затухающих колебательных движений. Симметричное явление происходит при остановке точки подвеса: груз по инерции продолжает движение, его кинетическая энергия переходит в потенциальную, и снова возникают колебания.

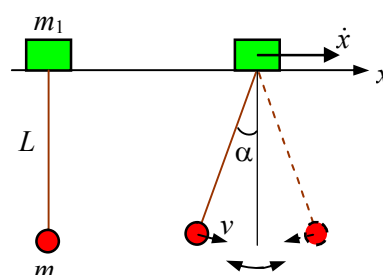


Рис. 1. Иллюстрация возникновения колебаний

Способы демпфирования возникающих колебаний можно разделить на пассивные, ис-

пользующие те или иные конструктивные исполнения системы подвеса [3,4], и активные, предполагающие устранение колебаний в результате силового управления движением точки подвеса (каретки) с помощью электрического или гидравлического привода [5,6].

Появление достаточно совершенных электроприводов с частотным управлением и надёжных гидроцилиндров открывает широкие возможности по внедрению активных способов решения рассматриваемой задачи [7,8]. Среди таких способов можно выделить:

способы разомкнутого управления [9];

управление с обратной связью по состоянию на основе типовых промышленных регуляторов [10-13];

оптимальное управление [14-16];

управление с нечёткими регуляторами [17-22].

Общим недостатком перечисленных способов является низкая степень гашения колебаний в сочетании с высокой чувствительностью результата управления к изменению параметров системы “каретка-груз”. К таким параметрам в первую очередь следует отнести массу груза, которая может варьироваться в широких пределах в зависимости от конкретной производственной задачи.

Смягчение этого недостатка возможно путём использования адаптивных и робастных регуляторов [23,24]. Однако этот путь сопровождается неоправданным усложнением системы управления и не всегда приводит к ожидаемому результату [25].

В связи с этим, авторами выдвигается тезис о том, что качественный скачок в решении задачи управления подвешенным грузом может быть достигнут в результате синергетического подхода к её решению на основе принципов многоальтернативности [26-28]. Управление свободно подвешенным грузом, обладающим большой массой и приобретающим в процессе перемещения значительной механической энергией, целесообразно осуществлять на основе максимального использования траектории и динамики его собственного движения. В результате такого управления следует ожидать значительного упрощения регуляторов и повышения качества регулирования с одновременным снижением энергетических затрат.

Свойство робастности при таком управлении можно обеспечить на основе нечёткого регулирования, идеологически близкого к управлению в условиях неопределённости [29].

Модель объекта управления

Объектом управления в рассматриваемой задаче является тележка и груз, свободно подвешенный к ней на гибком тросе. Расчётные физические величины, которые будем использовать при описании объекта, показаны на рис. 2.

На рис. 2 обозначены:

x – горизонтальная ось неподвижной системы координат, м;

y – вертикальная ось неподвижной системы координат, м;

F – сила, прикладываемая со стороны электропривода к точке подвеса, Н;

F_{mp} – сила трения, действующая на каретку, Н;

μ – коэффициент трения между колёсами каретки и направляющими её перемещения ($\mu=r/R$, где r – коэффициент трения качения, R – радиус колёс каретки, м);

m_1 – масса каретки, кг;

m_1g – сила тяжести, действующая на каретку, Н;

F_n – сила натяжения троса, Н;

L – длина троса, м;

α – угловое отклонение троса от вертикали, рад;

m_2 – масса груз, кг;

m_2g – сила тяжести, действующая на груз,

Н;

g – ускорение свободного падения, м/с²;

v – скорость груза в неподвижной системе координат, м/с;

$\omega = -\dot{\alpha}$ – частота вращения груза (угловая скорость), с⁻¹;

\dot{x} – скорость поступательного движения каретки, м/с;

\dot{x}_2 – горизонтальная составляющая скорости груза ($\dot{x}_2 = \dot{x} + \omega L \cos \alpha$), м/с.

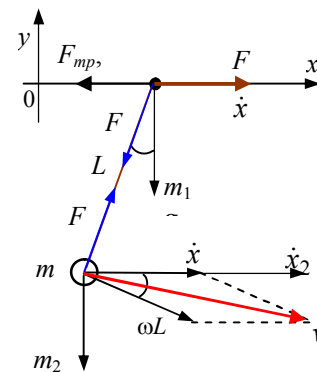


Рис. 2. Динамическая схема объекта управления

Составим уравнения Лагранжа, описывающие перемещение объекта в координатах состояния x и α [15]:

$$\begin{cases} -\frac{\partial E}{\partial x} + \frac{d}{dt} \frac{\partial E}{\partial \dot{x}} = F - F_{mp}; \\ -\frac{\partial E}{\partial \alpha} + \frac{d}{dt} \frac{\partial E}{\partial \dot{\alpha}} = -m_2 g L \sin \alpha, \end{cases} \quad (1)$$

где E – текущее значение кинетической энергии системы:

$$E = \frac{m_1 \dot{x}^2}{2} + \frac{m_2 v^2}{2}. \quad (2)$$

Скорость v груза:

$$\begin{aligned} v^2 &= \dot{x}^2 + (\omega L)^2 + 2\dot{x}\omega L \cos \alpha = \\ &= \dot{x}^2 + L^2 \dot{\alpha}^2 + 2L\dot{x}\dot{\alpha} \cos \alpha, \end{aligned} \quad (3)$$

Подставляя (3) в (2), получим:

$$E = \frac{m_1 + m_2}{2} \dot{x}^2 + \frac{m_2 L^2}{2} \dot{\alpha}^2 + m_2 L \dot{x} \dot{\alpha} \cos \alpha. \quad (4)$$

Подставив (4) в (1), получаем:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 L (\ddot{\alpha} \cos \alpha - \dot{\alpha}^2 \sin \alpha) = F - F_{mp}; \\ \ddot{x} \cos \alpha + L \ddot{\alpha} + g \sin \alpha = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Силу F_{mp} трения качения определим в виде:

$$F_{mp} = \mu(m_1 g + F_H \cos \alpha) \text{sign } \dot{x}, \quad (6)$$

где сила натяжения F_H :

$$F_H = m_2 g \cos \alpha + m_2 \ddot{x} \sin \alpha + m_2 \dot{\alpha}^2 L. \quad (7)$$

Система уравнений (5),(6),(7) полностью описывает движение рассматриваемого объекта.

Заметим, что модель объекта является нелинейной. При аналитическом синтезе регуляторов эту модель обычно линеаризуют, принимая значение α малым, т.е. таким, что выполняются соотношения:

$$\begin{aligned} \ddot{\alpha} \cos \alpha &\gg \dot{\alpha}^2 \sin \alpha; \\ \cos \alpha &\approx 1; \quad \sin \alpha \approx \alpha; \end{aligned} \quad (8)$$

$$g \cos \alpha \gg \ddot{x} \sin \alpha + \dot{\alpha}^2 L.$$

Кроме того, принимается, что знак скорости $\dot{x}(t)$ при движении каретки с грузом всегда положителен, т.е. $\dot{x}(t) > 0$ и, соответственно, $\text{sign } \dot{x} = 1$.

С учётом указанных допущений можно прийти к системе линейных дифференциальных уравнений:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 L \ddot{\alpha} = F - \mu(m_1 + m_2)g; \\ \ddot{x} + L \ddot{\alpha} + g \alpha = 0. \end{cases} \quad (9)$$

В соответствии с концепцией нечёткого управления, полученная полная модель (5),(6),(7), также как и линеаризованная модель (9) объекта, при синтезе регулятора не используется и предназначена в данной работе только для визуального анализа физических свойств объекта и проверки результатов синтеза на имитационной модели в пакете MatLab.

На рис. 3 показан процесс колебаний груза, возникающих при трогании каретки с места, и последующего ускоренного движения в результате приложения к ней тестовой постоянной силы $F = 500$ Н в течение 10 с.

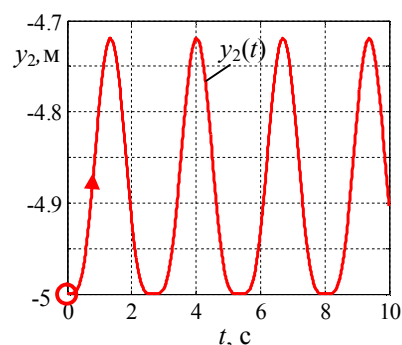


Рис. 3. Иллюстрация колебаний груза, возникающих при трогании каретки с места

Поскольку силы сухого и вязкого трения в точке крепления груза и в тросе в силу их малости не учитывались, то колебания носят незатухающий характер. Вместе с тем, колебания имеют негармонический характер. Из этого следует, что характеристики реального движения груза не укладываются в малые диапазоны и условия (8) линеаризации. Указанное обстоятельство также повлияло на применение в

настоящей работе полной нелинейной модели (5),(6),(7).

Анализ физического содержания задачи

Реализация синергетического подхода к нечёткому управлению предполагает предварительное проведение качественного анализа физического содержания задачи для того, чтобы формировать управляющее воздействие на объект согласованно с его собственным движением.

На рис. 4 представлены основные физические величины, характеризующие систему “каретка-груз” в первые 5 секунд после приложения постоянной силы $F = 500$ Н.

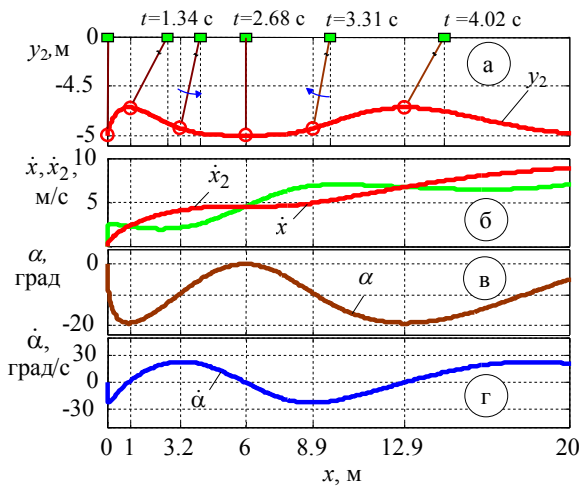


Рис. 4. Анализ физического содержания задачи

На отрезке движения $x = [0;1]$ м скорость \dot{x} каретки быстро возрастает (рис. 4б), а затем, по мере начала перемещения груза вперёд и вверх (рис. 4а), снижается.

В точке $x = 1$ м груз поднимается на максимальную высоту $y_2 = -4,7$ м и горизонтальные скорости \dot{x} , \dot{x}_2 каретки и груза становятся равными. Отклонение груза от вертикали также максимальное: $\alpha \approx -20$ град, т.е. груз получает максимальную потенциальную энергию.

После этого груз начинает вращаться против часовой стрелки относительно точки подвеса (рис. 4в), его потенциальная энергия переходит в кинетическую, и скорость груза становится больше скорости каретки (рис. 4б, отрезок $x = [1;6]$ м).

В точке $x = 6$ м горизонтальные скорости каретки и груза снова становятся равными, угловая скорость груза равно нулю. При этом он располагается вертикально точно под кареткой.

Такое положение было бы желательным для дальнейшего перемещения груза, однако под действием силы F каретка продолжает увеличивать скорость и груз снова начинает разгоняться вперёд и вверх, вновь запасая потенциальную энергию для очередного цикла колебаний.

Представленный анализ процесса трогания груза с места позволяет сделать следующие выводы:

если в момент времени, при котором угловое отклонение груза от вертикали и его угловая скорость равны нулю, снять управляющее воздействие (принять $F = 0$), то груз и каретка, имея равные скорости \dot{x}_2 и \dot{x} , сохранят своё плоскопараллельное поступательное движение без вращения груза относительно точки подвеса, т.е. без раскачивания. Отметим, что такое управление в максимальной степени использует собственную динамику объекта и не требует дополнительной энергии на его демпфирование;

для того чтобы возможность перехода к плоскопараллельному движению возникла раньше (левее точки $x = 6$ м), разгон системы целесообразно осуществлять в три этапа:

1) приложить силу F для начала движения системы;

2) при приближении груза к максимальному угловому отклонению снять управление, предоставив возможность грузу подняться на некоторую максимальную высоту $y_{2,max}$ с последующим вращением в противоположную сторону (в направлении против хода часовой стрелки на рис. 4а);

3) при приближении скорости вращения груза к максимальной (рис. 4г, $x = 3,2$ м) следует снова подать управление F для того, чтобы скорость каретки сравнялась с поступательной скоростью груза, и при наступлении этого равенства управление снять.

Можно сказать, что первый этап служит для сообщения системе некоторого количества движения, определяющего среднюю скорость переноса груза, второй – для предотвращения избыточного накопления грузом потенциальной энергии; третий – для выравнивания скорости \dot{x} каретки со скоростью \dot{x}_2 груза.

В результате следует ожидать, что при трогании с места груз однократно отклонится от вертикали, а затем вернётся в вертикальное положение с одновременным переходом к плоскопараллельному движению совместно с кареткой.

Для останова системы описанные выше операции следует повторить с обратными знаками.

Как будет показано ниже, полученных рекомендаций достаточно для синтеза алгоритма нечёткого управления.

Синтез нечёткого регулятора

Анализ физического содержания рассматриваемой задачи указывает на то, что для контроля над состоянием объекта достаточно измерять всего две его координаты: угол α отклонения груза от вертикали и скорость $\dot{\alpha}$ изменения этого угла (рис. 4). По умолчанию подразумевается, что эти величины практически доступны для прямого измерения или восстановления с помощью наблюдателей.

Таким образом, на вход регулятора будут поступать две физические величины: угловое положение α и угловая скорость $\dot{\alpha}$ груза, которым будут сопоставлены лингвистические переменные z_1 и z_2 соответственно.

Для определения необходимого количества нечётких значений этих переменных воспользуемся рис. 5, который представляет собой фрагмент рис. 4в,г для величин α и $\dot{\alpha}$ на отрезке $x = [0;6]$ м, соответствующем интервалу времени $t = [0;2,68]$ с.

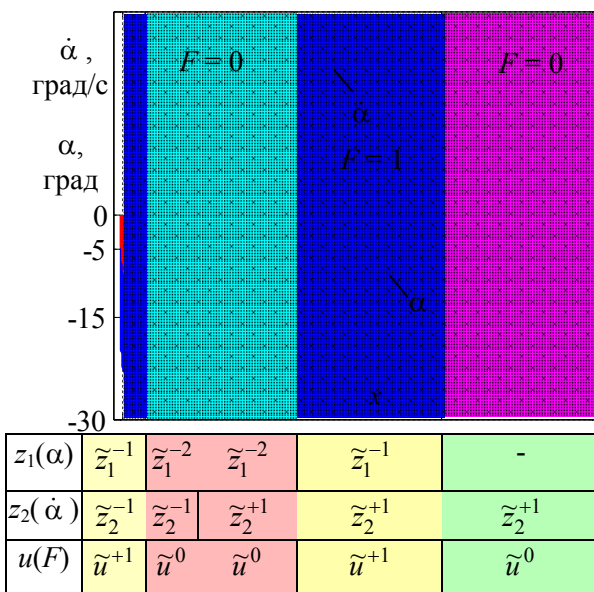


Рис. 5. Анализ областей определения нечётких переменных

На рис. 5 видно, что в соответствии с изложенным выше содержанием этапов процесса перехода системы из положения покоя в состояние плоскопараллельного движения относительно оси x (в данном случае равномерного и прямолинейного перемещения) для задания лингвистической переменной z_1 необходимы две нечёткие переменные \tilde{z}_1^{-2} и \tilde{z}_1^{-1} с областями определения $[-30;-15]$ и $[-15;-5]$ градусов соответственно.

Для режима торможения потребуются также две симметричные нечёткие переменные \tilde{z}_1^{+1} и \tilde{z}_1^{+2} с областями определения $[5;15]$ и $[15;30]$ градусов, рис. 6.

Таким образом, $z_1 = \{\tilde{z}_1^{-2}, \tilde{z}_1^{-1}, \tilde{z}_1^{+1}, \tilde{z}_1^{+2}\}$.

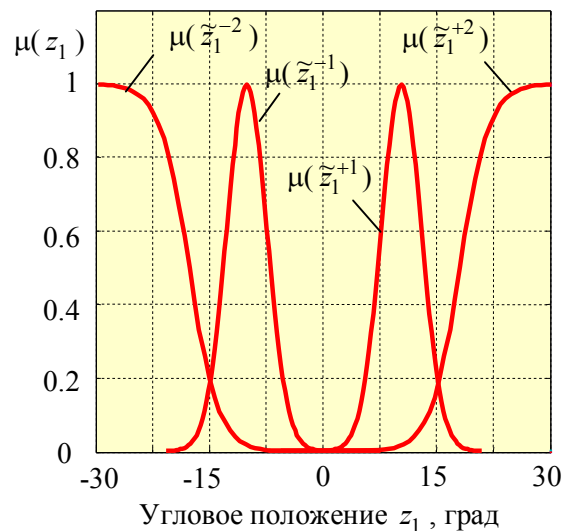


Рис. 6. Функции принадлежности $\mu(z_1)$ нечётких значений лингвистической переменной z_1 (угол отклонения груза)

Интервал $\alpha = [-5;5]$ не сопоставлен никакой нечёткой переменной с целью ускорения процесса переключения управления u (силы F) и, как следствие, улучшения быстродействия системы.

Для того чтобы различать участки движения с уменьшающимся и растущим углом отклонения α , у лингвистической переменной z_2 (угловая скорость $\dot{\alpha}$ груза) следует определить две нечётких переменных \tilde{z}_2^{-1} и \tilde{z}_2^{+1} с областями определения $[-30;0]$ и $[0;30]$ град/с, т.е. $z_2 = \{\tilde{z}_2^{-1}, \tilde{z}_2^{+1}\}$, рис. 7.

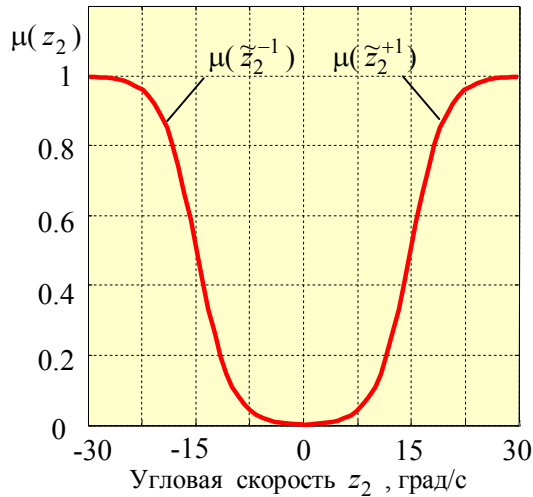


Рис. 7. Функции принадлежности $\mu(z_2)$ нечётких значений лингвистической переменной z_2 (угловая скорость груза)

Выход регулятора формируется с помощью лингвистической переменной u (сила F), заданной в нормированном диапазоне $[-1; 1]$ тремя нечёткими переменными: $u = \{\tilde{u}^{-1}, \tilde{u}^0, \tilde{u}^{+1}\}$, равномерно заполняющими указанный диапазон рис. 8. Эти переменные соответствуют трём значениям силы F : $F = -1$; $F = 0$ и $F = +1$.

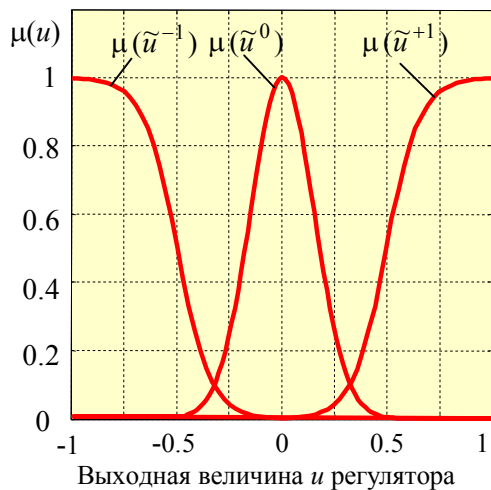


Рис. 8. Функции принадлежности $\mu(u)$ нечётких значений лингвистической переменной u (управляющее воздействие)

Решающие правила, определяющие алгоритм нечёткого управления, формируются путём выписывания нечётких переменных в столбцах таблицы на рис. 5. Например, из первого слева столбца, соответствующему режиму начала движения системы, получаем

$\tilde{z}_1^{-1} \wedge \tilde{z}_2^{-1} \rightarrow \tilde{u}^{+1}$ и т.д. с учётом симметричной смены знаков для режима торможения.

В итоге алгоритм нечёткого управления будет содержать шесть правил:

$$\begin{aligned} \tilde{z}_1^{-1} \wedge \tilde{z}_2^{-1} &\rightarrow \tilde{u}^{+1}; \\ \tilde{z}_1^{-2} &\rightarrow \tilde{u}^0; \\ \tilde{z}_1^{-1} \wedge \tilde{z}_2^{+1} &\rightarrow \tilde{u}^{+1}; \\ \tilde{z}_1^{+1} \wedge \tilde{z}_2^{+1} &\rightarrow \tilde{u}^{-1}; \\ \tilde{z}_1^{+2} &\rightarrow \tilde{u}^0; \\ \tilde{z}_1^{+1} \wedge \tilde{z}_2^{-1} &\rightarrow \tilde{u}^{-1}. \end{aligned} \tag{10}$$

Компактное описание алгоритма (10) представлено в таблице.

Алгоритм нечёткого управления

z_2	z_1			
	\tilde{z}_1^{-2}	\tilde{z}_1^{-1}	\tilde{z}_1^{+1}	\tilde{z}_1^{+2}
\tilde{z}_2^{-1}	\tilde{u}^0	\tilde{u}^{+1}	\tilde{u}^{-1}	\tilde{u}^0
\tilde{z}_2^{+1}	\tilde{u}^0	\tilde{u}^{+1}	\tilde{u}^{-1}	\tilde{u}^0

Наглядное представление правил (10) в таблице указывает на избыточность числа входных переменных: переменная z_2 не используется, т.е. для управления достаточна только информация z_1 об угловом положении груза.

Таким образом, алгоритм управления примет вид:

$$\begin{aligned} \tilde{z}_1^{-2} &\rightarrow \tilde{u}^0; \\ \tilde{z}_1^{-1} &\rightarrow \tilde{u}^{+1}; \\ \tilde{z}_1^{+1} &\rightarrow \tilde{u}^{-1}; \\ \tilde{z}_1^{+2} &\rightarrow \tilde{u}^0. \end{aligned} \tag{11}$$

Важно отметить, что результат синтеза нечёткого регулятора хорошо соответствует процессу управления оператором-человеком, который при перемещении груза визуальнo ориентируется, главным образом, на угол его отклонения от вертикали.

Вместе с решающими правилами (11) реальный процесс управления предусматривает наличие обязательных команд на трогание и останов груза.

Для реализации этих команд сохраним лингвистическую переменную z_2 (угловая скорость $\dot{\alpha}$ груза) в качестве переключателя этих режимов: при кратковременной подаче на вход регулятора значения $z_2 = \{\tilde{z}_2^{-1}\}$ (первое прави-

ло системы (10)) груз тронется с места и начнёт движение под управлением первых трёх правил системы (10); а при кратковременной подаче $z_2 = \{\tilde{z}_2^{+1}\}$ (четвёртое правило системы (10)) произойдёт переключение режима и начнётся процесс торможения груза под управлением четвёртого, пятого и шестого правил из (10).

В методологическом плане предложенное решение соответствует многоальтернативным принципам многоуровневой передачи управления и разделения функций [27,28].

Проверка результатов синтеза

Проверка результатов синтеза проводилась

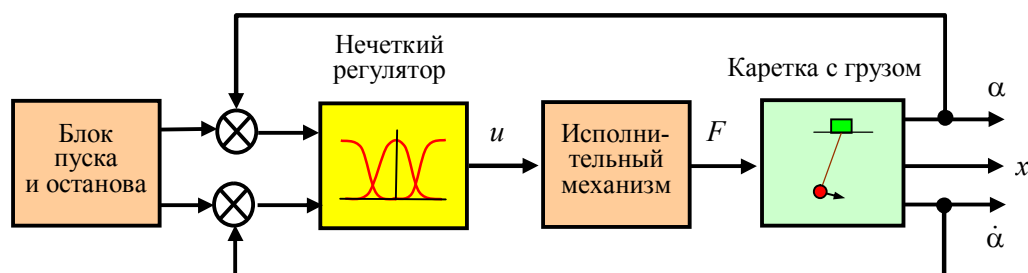


Рис. 9. Структурная схема системы нечёткого управления

Числовые параметры объекта: $m_1 = 100$ кг; $m_2 = 20 \dots 200$ кг; $L = 5$ м; $\mu = 0,0005$; $g = 9,81$ м/с², коэффициент передачи исполнительного механизма равен 1500.

Результаты проверки показаны на рис. 10, 11 для масс груза $m_2 = 200$ кг и $m_2 = 20$ кг соответственно.

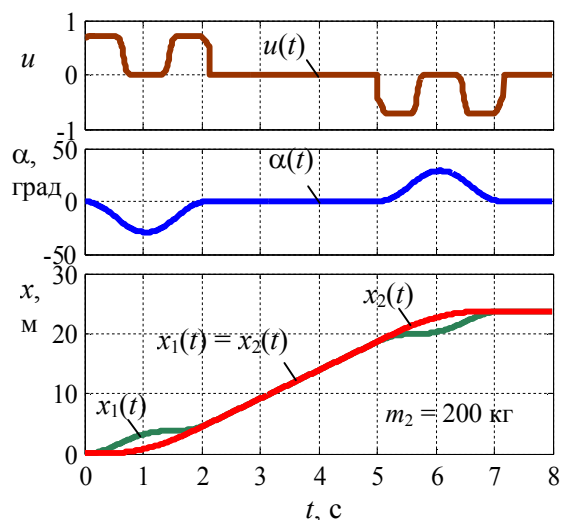


Рис. 10. Перемещение груза массой 200 кг

В начале движения груз под действием первого импульса управления однократно отклоняется от вертикальной оси ($\alpha < 0$) и отста-

ет на имитационной модели системы, структура которой представлена на рис. 9.

В качестве исполнительного механизма может быть использован электрический или гидравлический привод, создающий силовое воздействие на каретку.

Блоком пуска и останова является, по существу, пульт управления оператора-человека, дающего команды на начало перемещения и останов груза.

ёт от горизонтального положения каретки ($x_2(t) < x_1(t)$). Характер движения груза после завершения первого импульса управления совпадает с его естественным движением, показанным на рис. 4.

Скорость груза постепенно растёт и при $t > 1$ с превышает скорость каретки. Регулятор вырабатывает второй импульс управления так, чтобы скорость каретки сравнялась со скоростью груза. После выравнивания скоростей система “каретка-груз” продолжает плоскопараллельное движение относительно оси x без раскачивания.

В момент времени $t = 5$ с подана команда на останов, процесс которого полностью симметричен процессу пуска.

При уменьшении массы груза в 10 раз качественный характер его перемещения не изменился (команда на останов подана в момент времени $t = 4$ с). Это обстоятельство подтверждает ожидаемую грубость нечёткого управления.

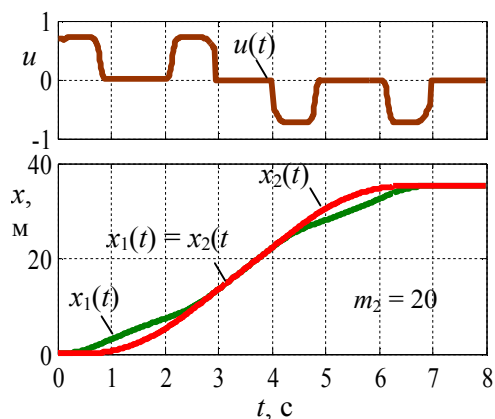


Рис. 11. Перемещение груза массой 20 кг

Скорость перемещения груза с уменьшением его массы растёт и может управляться соответствующим изменением коэффициента передачи исполнительного механизма, создающего силу F . Для случая с $m_2 = 20$ кг установлен коэффициент передачи равный 1000.

Полученная форма управляющих воздействий указывает на тесную взаимосвязь синергетического подхода с оптимальным управлением с ограничениями на основе принципа максимума.

Заключение

Представленные в работе результаты исследования и решения задачи управления перемещением подвешенного груза позволяют сделать следующие выводы:

рассматриваемый объект управления относится к объектам с несколькими степенями свободы и описывается нелинейными дифференциальными уравнениями с нестационарными коэффициентами, которые могут изменяться в процессе эксплуатации в широких пределах. Особенностью объекта является дефицит управляющих воздействий – при двух степенях свободы имеется один канал управления;

перечисленные свойства объекта указывают на необходимость отказа от детерминированного подхода к его перемещению по заранее заданной фазовой траектории и на целесообразность перехода к синергетическим принципам многоальтернативного управления. Такой переход позволяет при формировании управления в максимальной степени использовать собственные невозмущённые траектории движения объекта с текущими значениями его нестационарных параметров;

синергетический подход к поставленной задаче совместно с нечёткими процедурами принятия решений даёт возможность решить задачу синтеза управления без построения математической модели объекта, но основываясь исключительно на содержательном анализе его физических свойств;

в соответствии с идеологией синергетического подхода полученный алгоритм регулирования по своей логической простоте и физической прозрачности приближается к эмпирически обоснованному управлению оператором-человеком;

формируемый нечётким регулятором закон управления качественно близок к импульсному управлению, синтезированному на основе принципа максимума, но полученному значительно более простыми средствами.

Литература

1. Журавлев М.П., Маликов О.Б. Транспортно-грузовые системы. М.: Маршрут, 2006. 368 с.
2. Заднипренко Н.М., Костенко Е.М., Кулева Л.И. Погрузочно-разгрузочные работы. Киев: Основа, 2000. 216 с.
3. Щербаков В.С., Корытов М.С., Вольф Е.О. Система пространственного гашения колебаний груза, перемещаемого мостовым краном // Вестник СибАДИ. 2014. Вып.6(40). С. 56-61.
4. Пат. 2235054 Российской Федерации, МПК7 В 66 С 13/06. Устройство для гашения колебаний груза, подвешенного на рабочих ветвях грузового каната стрелового крана / В.С. Шкрабак, А.В. Власов, Л.А. Голдобина, В.В. Шкрабак, Р.В. Шкрабак; патентообладатель С.-Петерб. гос. аграр. ун-т. № 2002109487/11; заявл. 11.04.2002; опубл. 27.08.2004, Бюл. № 24. 3 с.
5. Герасимьяк Р.П., Лещёв В.А. Анализ и синтез крановых электромеханических систем. Одесса: СМИЛ, 2008. 192 с.
6. Герасимьяк Р.П., Мельникова Л.В., Тепляков А.Г. Управление электроприводом поворотного механизма с подвешенным грузом // Электротехника. 2004. №4. С. 63-66.
7. Толочко О.И., Бажутин Д.В. Сравнительный анализ методов гашения колебаний груза, подвешенного к механизму поступательного движения мостового крана // Электромашиностроение и электрооборудование. 2010. № 75. С. 22-28.
8. Щербаков В.С., Корытов М.С., Шершнева Е.О. Активный способ гашения колебаний груза после остановки мостового крана // Мехатроника, автоматизация, управление. 2016. Т. 17. № 6. С. 368-374.
9. Buch A. Optimale Bewegungssteuerung von schwingungsfähigen mechatronischen Systemen mit zwei Freiheitsgraden am Beispiel eines Krans mit Pendelnder Last und elastischer Mechanik. Magdeburg: University of Magdeburg, 1999. 250 s.
10. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Volf E.J. Impact sigmoidal Cargo Movement Paths on the Efficiency of Bridge Cranes // International Journal of Mechanics and Control. 2015. Vol. 16. No. 2. P. 3-8.

11. Ridout A.J. Anti-swing Control of the Overhead Crane Using Linear Feedback // *Journal of Electrical and Electronics Engineering*. 1989. Vol. 9. No. 1/2. P. 17–26.
12. Command Shaping for Nonlinear Crane Dynamics / D. Blackburn, W. Singhose, J. Kitchen, V. Patrangenaru, J. Lawrence // *Journal of Vibration and Control*. 2010. No. 16. P. 477-501.
13. Рогова Н.С., Юркевич В.Д. Разработка алгоритмов управления для перемещения груза порталным краном // *Сб. науч. тр. НГТУ*. 2015. № 3(81). С. 43–54.
14. Оптимальное управление перемещением груза мостовым краном / С.А. Кабанов, Е.Н. Никулин, Б.Э. Якушев, Д.Б. Якушева // *Изв. ВУЗов. Приборостроение*. 2011. Т. 54. № 5. С. 56-65.
15. Васильев Е.М. Система оптимального управления подвешенным грузом // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т.8. №1. С.25-30.
16. Герасимьяк Р.П., Мельникова Л.В. Оптимальное управление крановым механизмом передвижения // *Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы*. 1999. № 1. С. 87-94.
17. Щедринов А.В., Сериков С.А., Колмыков В.В. Автоматическая система успокоения колебаний груза для мостового крана // *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*. 2007. №8. С. 13-17.
18. Файзрахманов Р.А., Тютюных А.А., Полевщиков И.С. Математическое, алгоритмическое и программное обеспечение задачи расчета управляющих воздействий на основе нечеткой логики при моделировании перемещения груза в тренажере порталного крана // *Инженерный вестник Дона*. 2022. №1. 11 с.
19. Васильев Е.М., Прокофьева Д.М. Нечёткое управление структурно неустойчивыми объектами // *Вестник Воронежского государственного технического университета*. 2012. Т.8. №10.1. С. 8-13.
20. Алгоритмы подавления колебаний грузов подъемно-транспортных механизмов с использованием нечеткой логики функционирования / О.А. Шведова, А.С. Шмарловский, А.В. Марков, Т.В. Тарасевич // *Доклады БГУИР*. 2014. №1(79). С. 65-71.
21. Control of Overhead Crane Based on Lyapunov Approach to Fuzzy Controller Synthesis / A.B. Sharkawy, K.A.F. Moustafa, H. El-Awady, A. Vitko, A. Babinec, M. Dekan // *23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)*. Smolenice, Slovakia. 2014. P. 1-6.
22. Anti-sway Techniques in Feedback Control Loop of a Gantry Crane System a Comparative Assessment of PD and PD-type Fuzzy Logic Controller / M.A. Ahmad, A.N.K. Nasir, M.S. Najib, H. Ishak // *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*. Xi'an. 2009. P. 2483-2487.
23. Фрадков А.Л. Адаптивное управление в сложных системах. М.: Наука, 1990. 296 с.
24. Тюкин И.Ю., Терехов В.А. Адаптация в нелинейных динамических системах. СПб.: Издательство ЛКИ, 2008. 377 с.
25. Филимонов Н.Б. Методологический кризис "всепобеждающей математизации" современной теории управления // *Мехатроника, автоматизация, управление*. 2016. Т. 17. № 5. С. 291-301.
26. Колесников А.А. Синергетические методы управления сложными системами: теория системного синтеза. М.: КомКнига, 2006. 240 с.
27. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Концепция многоальтернативности в синергетической теории управления // *Математические методы в технике и технологиях «ММТТ-30»: сб. тр. междунар. науч. конф.* СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2017. Т. 7. С. 13-16.
28. Подвальный С.Л., Васильев Е.М. Синергетические свойства принципов многоальтернативности // *Современные методы прикладной математики, теории управления и компьютерных технологий «ПМТУКТ-2017»: сб. тр. X междунар. науч. конф.* Воронеж: Изд-во «Научная книга», 2017. С. 289-292.
29. Теория управления (дополнительные главы) / под ред. Д.А. Новикова. М.: Ленанд, 2019. 552 с.

Поступила 04.04.2022; принята к публикации 10.06.2022

Информация об авторах

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

Калтырина Анастасия Алексеевна - студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kaltyrina-nastya2000@yandex.ru, тел. (473) 243-77-20

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

SYNERGIC SYSTEM OF FUZZY CONTROL FOR SUSPENDED LOAD

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

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers the problem of moving a suspended load without swinging. On the basis of the Lagrange equations for generalized coordinates, we obtained a mathematical model of the carriage-load system, demonstrated the significant nonlinearity of the model and the nonstationarity of its parameters. We made the conclusion about the expediency of solving the problem on the basis of a synergistic approach, which will allow the formation of control with the maximum use of the object's own movement. For this purpose, we carried out an analysis of the physical content of the process of moving the

load and found that in order to implement the plane-parallel movement of the system, the start of movement must be carried out in several stages: apply an initial force effect on the carriage to move it from its place, then remove the effect and ensure the free movement of the load, and again give the carriage an acceleration in order to equalize its speed with the speed of the load, followed by a transition to motion without swaying. To stop the load without swinging, it is enough to create a symmetrical sequence of commands with the opposite sign. We proposed to build the specified control on the basis of fuzzy decision-making procedures that have proven themselves well in the conditions of non-stationary parameters of the object. We formed a set of input and output linguistic variables of the regulator and determined a list of fuzzy values necessary for the implementation of synergistic control. We proposed to divide the functions of feedback channels according to the angular position of the load and its angular velocity, defining for the first of them the main function of oscillation compensation, and for the second - the function of switching acceleration and deceleration modes. The resulting fuzzy control algorithm in its simplicity and physical content turned out to be close to informal methods of acceleration and deceleration of loads under the control of a human operator. We noted the similarity of this algorithm with the optimal control synthesized on the basis of the maximum principle with respect to the performance criterion. We checked the operability of the proposed system on a simulation model, and confirmed its effectiveness

Key words: movement of a suspended load, synergetic control, fuzzy controller

References

1. Zhuravlev M.P., Malikov O.B. "Transport and cargo systems", ("Transportno-gruzovye sistemy"), Moscow, Marshrut, 2006, 368 p.
2. Zadniprenko N.M., Kostenko E.M., Kuleva L.I. "Loading and unloading operations", ("Pogruzochno-razgruzochnye raboty"), Kiev, Osnova, 2000, 216 p.
3. Shcherbakov V.S., Korytov M.S., Volf E.O. "The system of spatial damping of vibrations of a load moved by an overhead crane", *Bulletin of SibADI (Vestnik SibADI)*, 2014, no. 6(40), pp. 56-61.
4. Shkrabak V.S., Vlasov A.V., Goldobina L.A., Shkrabak V.V., Shkrabak R.V. "Device for damping vibrations of a load suspended on the working branches of a cargo rope of a jib crane" ("Ustroystvo dlya gasheniya kolebaniy gruzha, podveshennogo na rabochnikh vetyakh gruzovogo kanata strelovogo krana"), patent 2235054 of Russia, MPK7 B 66 C 13/06, no. 2002109487/11, dec. 11.04.2002, publ. 27.08.2004, bull. 24., 3 p.
5. Gerasimyak R.P., Leshcheyev V.A. "Analysis and synthesis of crane electromechanical systems", ("Analiz i sintez krano-vykh elektromekhanicheskikh sistem"), Odessa, SMIL, 2008, 192 p.
6. Gerasimyak R.P., Mel'nikova L.V., Teplyakov A.G. "Control of the electric drive of the rotary mechanism with a suspended load", *Electrical Engineering (Elektrotehnika)*, 2004, no. 4, pp. 63-66.
7. Tolochko O.I., Bazhutin D.V. "Comparative analysis of methods for damping oscillations of a load suspended from the mechanism of translational movement of an overhead crane", *Electrical Engineering and Electrical Equipment (Elektromashinostroeniye i elektrooborudovaniye)*, 2010, no. 75, pp. 22-28.
8. Shchepbakov V.S., Kopytov M.S., Shershneva E.O. "Active method of damping load oscillations after stopping the overhead crane", *Mechatronics, Automation, Control (Mekhatronika, avtomatizatsiya, upravleniye)*, 2016, vol. 17, no. 6, pp. 368-374.
9. Buch A. "Optimale bewegungssteuerung von schwingungsfähigen mechatronischen systemen mit zwei freiheits-graden am beispiel eines krans mit pendelnder last und elas-tischer mechanik", Magdeburg, University of Magdeburg, 1999, 250 p.
10. Korytov M.S., Shcherbakov V.S., Volf E.J. "Impact sigmoidal cargo movement paths on the efficiency of bridge cranes", *International Journal of Mechanics and Control*, 2015, vol. 16, no. 2, pp. 3-8.
11. Ridout A.J. "Anti-swing control of the overhead crane using linear feedback", *Journal of Electrical and Electronics Engineering*, 1989, vol. 9, no. 1/2, pp. 17-26.
12. Blackburn D., Singhose W., Kitchen J., Patrangenaru V., Lawrence J. "Command Shaping for nonlinear crane dynamics", *Journal of Vibration and Control*, 2010, no. 16, pp. 477-501.
13. Rogova N.S., Yurkevich V.D. "Development of control algorithms for moving cargo by a portal crane", *Collection of Scientific Papers of NGTU (Sb. nauch. trudov NGTU)*, 2015, no. 3(81), pp. 43-54.
14. Kabanov S.A., Nikulin E.N., Yakushev B.E., Yakusheva D.B. "Optimal control of the movement of cargo by an overhead crane", *News of Higher Institutions. Instrumentation (Izv. VUZov. Priborostroeniye)*, 2011, vol. 54, no. 5, pp. 56-65.
15. Vasil'ev E.M. "Suspended load optimal control system", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, no. 1, pp. 25-30.
16. Gerasimyak R.P., Mel'nikova L.V. "Optimal control of the crane mechanism of movement", *Automation. Electrotechnical Complexes and Systems (Avtomatika. Avtomatizatsiya. Elektrotekhnicheskiye komplekсы i sistemy)*, 1999, no. 1, pp. 87-94.
17. Shchedrinov, A.V., Serikov S.A., Kolmykov V.V. "Automatic system for damping load oscillations for an overhead crane", *Devices and Systems. Control, Handling, Diagnostics (Pribory i sistemy. Upravleniye, kontrol', diagnostika)*, 2007, no. 8, pp. 13-17.
18. Fayzrakhmanov R.A., Tyutyunyk A.A., Polevshchikov I.S. "Mathematical, algorithmic and software support for the problem of calculating control actions based on fuzzy logic when modeling the movement of cargo in a gantry crane simulator", *Engineering Bulletin of the Don (Inzhenernyy vestnik Dona)*, 2022, no. 1, 11 p.
19. Vasil'ev E.M., Prokofeva D.M. "Fuzzy control of structurally unstable objects", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2012, no. 10.1, pp. 8-13.
20. Shvedova O.A., Shmarlovskiy A.S., Markov A.V., Tarasevich T.V. "Algorithms for suppressing fluctuations of loads of lifting and transport mechanisms using fuzzy logic of functioning", *Reports of BSUIR (Doklady BGUIR)*, 2014, no. 1(79), pp. 65-71.

21. Sharkawy A.B., Moustafa K.A.F., El-Awady H., Vitko A., Babinec A., Dekan M. "Control of overhead crane based on Lyapunov approach to fuzzy controller synthesis", *23rd International Conference on Robotics in Alpe-Adria-Danube Region (RAAD)*, Smolenice, Slovakia, 2014, pp. 1-6.
22. Ahmad M.A., Nasir A.N.K., Najib M.S., Ishak H. "Anti-sway techniques in feedback control loop of a gantry crane system a comparative assessment of PD and PD-type fuzzy logic controller", *4th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, Xi'an, 2009, pp. 2483-2487.
23. Fradkov A.L. "Adaptive control in complex systems", ("Adaptivnoe upravleniye v slozhnykh sistemakh"), Moscow, Nauka, 1990, 296 p.
24. Tyukin I.Yu., Terekhov V.A. "Adaptation in non-linear dynamic systems", ("Adaptatsiya v nelineynykh dinamicheskikh sistemakh"), St.-Petersburg, LKI, 2008, 377 p.
25. 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.
26. Kolesnikov A.A. "Synergistic methods of managing complex systems: the theory of system synthesis", ("Sinergeticheskie metody upravleniya slozhnymi sistemami: teoriya sistemnogo sinteza"), Moscow, KomKniga, 2006, 240 p.
27. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "The concept of multi-alternativeness in synergetic control theory", *Proc. of Int. Sci. Conf.: Mathematical Methods in Engineering and Technology: "MMTT-30" (Matematicheskiye metody v tekhnike i tekhnologiyakh "MMTT-30")*, St. Petersburg, Publishing house of the Polytechnic University, 2017, vol. 7, pp. 13-16.
28. Podval'nyy S.L., Vasil'ev E.M. "Synergetic properties of the principles of multi-alternativeness", *Proc. of X Int. Sci. Conf.: "PMTUKT-2017" Modern Methods of Applied Mathematics, Control Theory and Computer Technology (Sovremennyye metody prikladnoy matematiki, teorii upravleniya i komp'yuternykh tekhnologiy: sb. tr. X mezhdunar. nauch. konf. «PMTUKT-2017»)*, Voronezh, Nauchnaya kniga, 2017, pp. 289-292.
29. Ed. Novikov D.A. "Control theory (additional chapters)", ("Teoriya upravleniya (dopolnitel'nye glavy)"), Moscow, Lennand, 2019, 552 p.

Submitted 04.04.2022; revised 10.06.2022

Information about the authors

Semyen L. Podval'ny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, tel. (473) 243-77-18

Anastasiya A. Kaltyrina, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: kaltyrina-nastya2000@yandex.ru, tel. (473) 243-77-20

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

РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО ОБЕСПЕЧЕНИЯ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ УСТАНОВКИ НАНЕСЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА

А.Н. Анненков, О.В. Белоусова

Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: уровень технологий фотолитографии и оборудования для их реализации является определяющим критерием достижения требуемых проектных норм в микроэлектронике, радиоэлектронике, оптике и микроэлектромеханических системах. Работа связана с разработкой аппаратного состава системы управления автоматизированной технологической установкой нанесения фоторезиста, выполненной в кластерном конструктивном исполнении с контролируемой газовой средой, а также созданием пакета её программного обеспечения. В соответствии с разработанными алгоритмами управления, разрядными сетками обработки команд и сигналов датчиков, а также циклограммами работы на каждый модуль и установку в целом был создан пакет программного обеспечения, предназначенный для управления узлами и модулями автоматизированной установки нанесения фоторезиста УНФ -200А, логирования в базу технических характеристик узлов и модулей, а также показателей технологического процесса для мониторинга этих значений на экране. Программа состоит из нескольких главных модулей, а именно: модулей транспорта, термообработки, термостабилизации, загрузки, приёмника, нанесения, а также вспомогательных модулей: работа с базой данных, вывод показателей, логирование, взаимодействие с промышленными логическими контроллерами и обработка ошибок. Разработанное программное обеспечение обрабатывает ряд блокировок, введённых во избежание не предусмотренной регламентом обработки подложек, а также для выхода из строя модулей установки или причинения вреда здоровью обслуживающего персонала. Интерфейс программного обеспечения имеет средства вывода сообщения о срабатывании блокировок, а также способы снятия блокировок

Ключевые слова: автоматическая установка нанесения фоторезиста, кластерное конструктивное исполнение, контролируемая газовая среда, система управления, функциональные технологические модули, программное обеспечение

Актуальность и проблематика работы

Технологии фотолитографии применяются для формирования топологического рельефа на поверхности подложек из различных материалов (кремний, пьезокерамика, кварц, оптическое стекло и т.д.) при производстве элементной базы в микроэлектронике, радиоэлектронике, оптике, микроэлектромеханических системах. Оборудование, на котором они реализованы, в значительной степени определяет технический прогресс в ряде важнейших современных производств.

В целом уровень технологий фотолитографии и оборудования для их реализации является определяющим критерием достижения требуемых проектных норм. Для большинства российских производителей электронной комплектующей базы сегодня актуальным является технологическое перевооружение своего производства для работы на подложках диаметром 150 и 200 мм с критическими размерами 0,18 и 0,35 мкм. Российские предприятия с лидирующими позициями на рынке отечественной микроэлектроники в настоящее время

имеют уровень технологии $0,090 \div 0,065$ мкм.

С точки зрения окупаемости и удовлетворения ряда потребителей в современном высокотехнологичном оборудовании, сегодня актуальна задача разработки автоматизированных установок, выполненных в кластерном конструктивном исполнении с контролируемой газовой средой, состоящей из ряда технологических модулей, полностью закрывающих каждую технологическую операцию фотолитографии. В дальнейшем возможно их объединение в кластерный комплекс. Данный подход отражён в разработках конструкторского бюро технологических машин [1], входящего в инженерно – технический центр АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий» [2].

Назначение автоматизированной установки нанесения фоторезиста – формирование на полупроводниковой пластине (подложке) слоя плёнки из раствора полимера с заданными значениями толщины и разнотолщинности.

Общий вид автоматизированной установки нанесения фоторезиста приведён на рис. 1. Технические характеристики установки приведены в [1].



Рис. 1. Автоматическая установка нанесения фоторезиста

Основные модули установки: система управления установкой; транспортный модуль (робот-манипулятор); модуль центрифуги; модули приёмки и загрузки п/п пластин; модуль инструмента (дозатора); модуль термообработки; модуль термостабилизации.

В соответствии с разработанными алгоритмами управления, разрядными сетками обработки команд и сигналов датчиков, а также циклограммами работы на каждый модуль и установку в целом был создан новый пакет программного обеспечения (ПО) для блока управления автоматизированной установки фоторезиста в кластерном конструктивном исполнении с контролируемой газовой средой.

Далее рассмотрим структуру аппаратной части системы управления и примеры разрядных сеток обработки команд и сигналов датчиков, а также циклограмм работы отдельных модулей.

Описание аппаратной части системы управления

Аппаратная часть установки, с точки зрения системы управления, представляет собой ряд устройств, каждое из которых обладает набором входных и выходных сигналов определенного типа.

Состав системы управления представляется в виде трёх иерархических уровней. На верхнем уровне расположен промышленный компьютер с различными платами (устройствами) расширения под управлением операционной системы Windows. Среда разработки ПО – C++ [3]. На втором уровне размещены программируемые логические контроллеры (ПЛК) фирмы Siemens [4] или их китайские аналоги. На нижнем уровне системы управления размещены блоки управления двигателями, сервоприводами и исполнительными механизмами.

Подключение ПЛК к промышленному компьютеру осуществляется посредством COM портов. Номера портов с четвертого по шестой. Параметры COM порта: 9600 бит/сек,

8 бит данных, четность не контролируется, 1 стартовый и 1 стоповый биты. Для подключения используются преобразователи RS-232 - RS-485 фирмы Siemens [5]. Рекомендуемая среда разработки STEP7 [6, 7].

В качестве отдельных единиц в системе управления выделим покупные изделия, которые сопровождаются драйверами и алгоритмами обмена и функционирования. Такие модули подключаются к промышленному компьютеру посредством стандартных интерфейсов (RS-232, USB, Ethernet).

Таковыми модулями являются:

ПИД-регулятор TPM-101 CP фирмы ОВЕН [8]. Предназначен для задания и поддержания температуры «горячей» плиты модуля термообработки п/п подложек. Подключение к промышленному компьютеру через преобразователь USB - RS-485 AC-4 фирмы ОВЕН [9]. Параметры обмена через виртуальный COM порт: 9600 бит/сек, 8 бит данных, четность не контролируется, 1 стартовый и 1 стоповый биты. Протокол обмена фирмы ОВЕН.

Электропривод центрифуги. Подключён к промышленному компьютеру через COM порт номер 1. Параметры обмена через COM порт: 9600 бит/сек, 8 бит данных, четность не контролируется, 1 стартовый и 1 стоповый биты.

Термостат жидкостный ВТВ-1, объем 8 литров. Производитель фирма ТЕРМЕКС. Предназначен для поддержания заданной температуры фоторезиста. Подключение к промышленному компьютеру через COM порт номер 3. Параметры обмена через виртуальный COM порт: 9600 бит/сек, 8 бит данных, четность не контролируется, 1 стартовый и 1 стоповый биты. Протокол обмена фирмы ТЕРМЕКС.

Принято следующее разделение исполнительных и информационных устройств: быстродействующие электромеханические устройства и датчики, требующие импульсного или аналогового управления с высокими частотой и разрешением, и сравнительно инерционные устройства: пневматические клапаны управления пневмоцилиндрами, генераторы и датчики вакуума, которые не предъявляют высоких требований к быстродействию управляющей системы.

Структура программного обеспечения транспортного модуля

Транспортный модуль включает в свой состав как быстродействующие электромеха-

нические элементы (шаговый двигатель со встроенным драйвером), инкрементальный импульсный энкодер, оптический пролётный датчик начального положения координаты поворота и координаты выдвигания, так и сравнительно инерционный генератор вакуума и датчик вакуума. Транспортный модуль представляет собой двухкоординатный манипулятор с вакуумной присоской в качестве рабочего органа.

Манипулятор работает в полярной системе координат, т.е. положение рабочего органа (P) описывается величиной угла поворота от исходного положения (Φ) и расстоянием от центра вращения манипулятора (ρ). В качестве пояснения дан рис. 2.

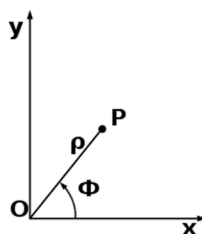


Рис. 2. Определение положения рабочего органа в полярной системе координат манипулятора

Основное назначение транспортного модуля в обеспечении позиционирования рабочего органа в ряде точек на рабочей плоскости, а также обеспечения фиксации и расфиксации полупроводниковых подложек (далее подложек) в этих точках. Эти точки связаны со следующими технологическими позициями: загрузки подложек, центрифугирования и нанесения фоторезиста или иного полимера, термообработки, термостабилизации и выгрузки подложек. Необходима процедура и элементы программного интерфейса для задания, настройки и сохранения координат рабочего органа в указанных технологических позициях, а также для проведения пусконаладочных и любых регламентных работ на установке. Необходимо контролировать наличие подложки на рабочем органе манипулятора постоянно в течение всех транспортных операций. В случае исчезновения подложки с рабочего органа в течение транспортной операции должна срабатывать блокировка «НЕТ П/П ПОДЛОЖКИ НА МАНИПУЛЯТОРЕ». Исходным положением, которое является началом отсчета координаты Φ ($\Phi = 0$), является позиция загрузки подложек, положение которой задается датчиком исходного положения координаты пово-

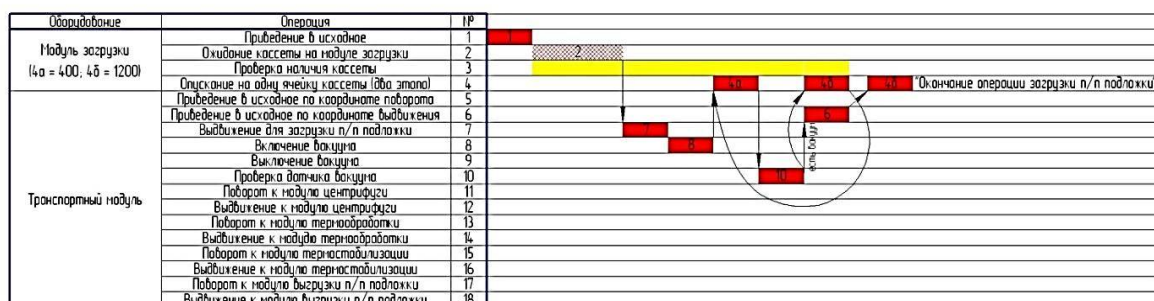
рота. Исходное положение координаты выдвигания манипулятора ρ ($\rho = 0$) задается датчиком исходного положения координаты выдвигания. Управление фиксацией и расфиксацией подложки на рабочем органе осуществляется с помощью включения и выключения генератора вакуума. Определение факта фиксации и наличия подложки на рабочем органе, а также факта расфиксации (отсутствия подложки) осуществляется с помощью датчика вакуума. Важным требованием является требование недопустимости совершения манипулятором более одного оборота ($\Phi < 360^\circ$) для избежания перекручивания проводов и выхода транспортного модуля из строя. Для обеспечения выполнения этого требования введён датчик конечного положения. В случае получения сигнала от этого датчика необходимо изменить направление вращения манипулятора на противоположное. Изменение координаты Φ осуществляется поворотом манипулятора вокруг своей оси. Поворот осуществляется с помощью шагового двигателя фирмы Festo со встроенным драйвером. Для управления шаговым двигателем используются сигналы «ТМ. ШАГ» и «ТМ. НАПРАВЛЕНИЕ». Для формирования этих сигналов, а также опроса состояния датчиков «ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ» и «ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ» назначен ПЛК фирмы Siemens. Поворот манипулятора должен быть запрещен до тех пор, пока координата выдвигания ρ не равна нулю, т.е. отсутствует сигнал с датчика «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ». Изменение координаты ρ осуществляется выдвиганием рабочего органа манипулятора вдоль прямой, проходящей через ось манипулятора. Выдвигание осуществляется с помощью мотор-редуктора. Обратная связь по положению осуществляется с помощью импульсного инкрементального энкодера, соединенного с первичным валом мотор-редуктора. Определение исходного положения осуществляется с помощью датчика «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ». Управление мотор-редуктором осуществляется с помощью блока ВМД производства фирмы «Электропривод» [10] и специально разработанным для него программным обеспечением на основе подхода, изложенного в [11]. Входными сигналами для блока ВМД являются сигналы «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ПУСК/СТОП» и «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. НАПРАВЛЕНИЕ». Формирование этих сигналов осуществляется посредством ПЛК. Сигнал с импульсного инкрементального энкодера также поступает на ПЛК.

Разрядная сетка для транспортного модуля приведена в табл. 1, а на рис. 3 приведена

циклограмма транспортного модуля.

Начальным условием для выполнения загрузки п/п подложки является расположение манипулятора в исходном по координате и по выдвигению.

Примечание: алгоритмы выполнения отдельных операций, их граничные условия описаны в разделе 1; величины шагов 4а и 4 б настраиваются; осуществлять подсчет пробуренных ячеек кассеты (не более 25)



- - Действия для обработки п/п подложки (4а = 400, 4б = 1200)
- ▨ - Процесс длительность которого определяется технологической прозрачностью
- - Опрос датчиков. Выявление! Возникновение! аварийных

Рис. 3. Циклограмма транспортного модуля

Для режима диагностики необходимо обеспечить возможность выполнения следующих команд и индикацию следующих величин:

1. Манипулятор в исходное - по этой команде необходимо сначала осуществить перемещение рабочего органа до датчика «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ», а затем осуществить поворот против часовой стрелки до датчика «ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ». Перед началом каждого перемещения по любой координате необходимо проверить наличие сигнала от датчика исходного положения для данной координаты. Алгоритм поиска датчика исходного положения по любой координате должен обеспечивать точное, устойчивое, надежное и воспроизводимое позиционирование в исходном положении.

2. Поворот в исходное - по этой команде необходимо осуществить поворот на малой скорости до получения сигнала с одного из датчиков: ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ или ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ.

В случае срабатывания датчика ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ цель достигнута. В случае срабатывания датчика ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ необходимо изменить направление движения по координате поворота на противоположное и двигаться до срабатывания датчика ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ. Первоначальное направление движения выбирается при отладке.

3. Выдвигение в исходное - по этой команде необходимо осуществить перемещение рабочего органа манипулятора до срабатывания датчика ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ.

4. Поворот - по этой команде необходимо осуществить поворот на указанное количество шагов ШД. Положительные значения означают поворот по часовой стрелке, отрицательные - против часовой стрелки.

5. Выдвигение - по этой команде необходимо осуществить перемещение рабочего органа манипулятора по координате выдвигения на указанное количество шагов (импульсов с датчика - энкодера). Положительные значения означают выдвигение от датчика исходного положения, а отрицательные - движение по направлению к датчику исходного положения по данной координате.

6. Включение/выключение вакуума. Визуальное отображение назначения элемента управления должно соответствовать действию, которое будет выполнено при активации данного элемента управления.

7. Вывод состояния датчика «ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ»

8. Вывод состояния датчика «ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ»

9. Вывод состояния датчика «ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ»

10. Вывод состояния датчика «ТМ. ВАКУУМ»

На рис. 4 приведена циклограмма работы модуля центрифугирования.

Таблица 1

Разрядная сетка для транспортного модуля

№п/п	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источник сигнала	Приемник сигнала
1	ТМ. ПОВОРОТ. ШАГ	1 импульс = 1 шаг ШД (с учетом дробления шага)	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Драйвер ШД
2	ТМ. ПОВОРОТ. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления вращения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Драйвер ШД
3	ТМ. ПОВОРОТ. ИСХОДНОЕ	Датчик исходного положения	«0»	Датчик	ПЛК
4	ТМ. ПОВОРОТ. КОНЕЧНОЕ	Датчик конечного положения	«0»	Датчик	ПЛК
5	ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ПУСК/СТОП	Пуск или стоп мотор-редуктора на выдвижение	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Блок ВМД
6	ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления выдвижения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Блок ВМД
7	ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ИСХОДНОЕ	Датчик исходного положения	«0»	Датчик	ПЛК
8	ТМ. ВЫДВИЖЕНИЕ. ЭНКОДЕР	Импульсы с энкодера на валу двигателя	Фронт импульсного сигнала	Энкодер	ПЛК
9	ТМ. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ	Включение клапана эжектора	«1»=ВКЛ. «0»=ВЫКЛ.	Плата ввода-вывода	Эжектор
10	ТМ. ВАКУУМ. ДАТЧИК	Факт наличия вакуума	«0»	Датчик вакуума	Плата ввода-вывода

Начальным условием для работы по центрифугированию и нанесению фоторезиста является наличие п/п подложки в поднятом в верхнее положение столике центрифуги, манипулятор в исходном по координате выдвижения, инструмент и централь в исходном. Параметры центрифугирования прибору заданы.

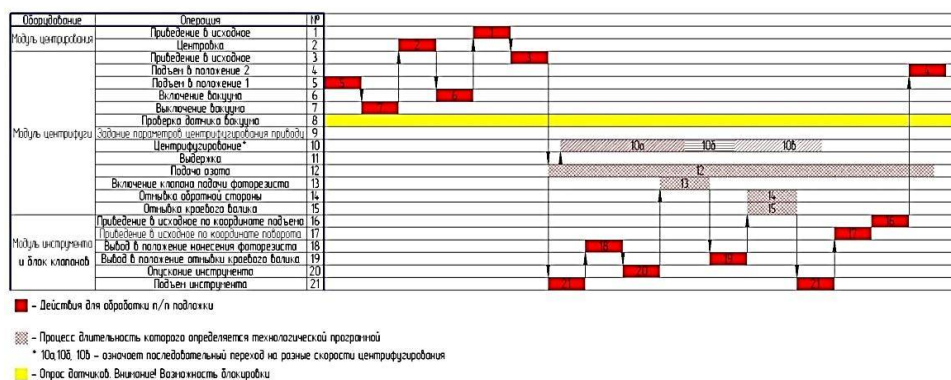


Рис. 4. Циклограмма модуля центрифугирования

Структура программного обеспечения модуля термообработки

Модуль термообработки (далее модуль ТО) предназначен для термической обработки подложки с нанесённым фоторезистом. В состав модуля входят два основных узла: устройство подъема/опускания/фиксации подложки и нагреватель.

Управление нагревателем осуществляется с помощью ПИД-регулятора TRM-101-CP фирмы ОВЕН [9]. Значение температуры и параметры регулирования для ПИД-регулятора

передаются от промышленного компьютера через преобразователь USB- RS-485.

Исполнительным устройством является линейный актуатор фирмы «Электропривод» на базе шагового двигателя. В состав входит оптический пролетный датчик начального положения «ТО. ИСХОДНОЕ», а также генератор вакуума с вакуумным датчиком.

Для управления шаговым двигателем линейного актуатора применен блок управления ШД - SMSD-1.5 фирмы «Электропривод», для которого основными сигналами управления

являются сигналы «ТО. ШАГ», «ТО. НАПРАВЛЕНИЕ», «ТО. РАЗРЕШЕНИЕ» [10].

По фронту сигнала «ТО. ШАГ» шаговый двигатель актуатора поворачивает ротор на один шаг, при изменении сигнала «ТО. НАПРАВЛЕНИЕ» направление вращения ШД линейного актуатора меняется на противоположное, при отсутствии сигнала «ТО. РАЗРЕШЕНИЕ» снимается напряжение с обмоток ШД. Таким образом, в те промежутки времени, когда устройство подъема/опускания/фиксации подложки не используется, для уменьшения нагрева ШД и экономии электроэнергии необходимо снимать сигнал «ТО. РАЗРЕШЕНИЕ». Для обеспечения фиксации подложки на модуле ТО необходимо подать сигнал «ТО. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ» на клапан генератора вакуума и прове-

рить факт надежной фиксации подложки на модуле ТО по сигналу с датчика вакуума «ТО. ВАКУУМ». Выдвижение рабочего органа транспортного модуля на позиции термообработки при наличии подложки на рабочем органе запрещено до тех пор, пока отсутствует сигнал с датчика «ТО. ИСХОДНОЕ». Недопустимо размещать подложку на горячей плите модуля термообработки до выхода на заданный температурный режим. Необходимо контролировать наличие подложки на модуле термообработки по сигналу датчика вакуума данной позиции «ТО. ВАКУУМ» в течение всего времени обработки подложки на данной позиции. Разрядная сетка для модуля термообработки приведена в табл. 2. На рис. 5 приведена циклограмма модуля термообработки.

Начальным условием для проведения термообработки является наличие п/п подложки на поднятых в рабочее положение узлах ТО, манипулятор в исходном по координате выдвигения. Модуль ТО вышел на заданный температурный режим.

Примечание: алгоритмы выполнения отдельных операций, их граничные условия описаны в разделе 1.



Рис. 5. Циклограмма модуля термообработки

Таблица 2

Разрядная сетка для модуля термообработки

№пп	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источник сигнала	Приемник сигнала
1	ТО. ПОДЪЕМ. ШАГ	1 импульс = 1 шаг ШД (с учетом дробления шага)	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Драйвер SMSD-1.5 ШД
2	ТО. ПОДЪЕМ. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления вращения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Драйвер SMSD-1.5 ШД
3	ТО. ПОДЪЕМ. РАЗРЕШЕНИЕ	Разрешение работы драйвера SMSD-1.5	«0»	Плата ввода-вывода	Драйвер IL SMSD-1.5
4	ТО. ИСХОДНОЕ	Датчик исходного положения	«0»	Датчик	ПЛК
5	ТО. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ	Включение/выключение генератора вакуума	«1» - вкл. «0» - выкл	Плата ввода-вывода	Генератор вакуума
6	ТО. ВАКУУМ	Датчик наличия вакуума (фиксация п/п подложки)	Фронт импульсного сигнала	Датчик	Плата ввода-вывода

Примечание. Направление вращения: CW – подъем, CCW – опускание.

Для режима диагностики необходимо обеспечить возможность выполнения следующих команд и индикацию следующих величин:

1. Иглы в исходное - по этой команде необходимо осуществить опускание игл до датчика «ТО. ИСХОДНОЕ». Проверить выполнение команды по состоянию соответствующего датчика.

2. Фиксация подложки - по этой команде необходимо осуществить включение генератора вакуума. Перед началом каждого перемещения по любой координате необходимо проверить наличие сигнала от датчика исходного положения для данной координаты.

3. Подъем/опускание игл - по этой команде необходимо осуществить подъем или опускание игл на заданное количество шагов.

4. Вывод состояния датчика «ТО. ИСХОДНОЕ»

5. Вывод состояния датчика «ТО. ВАКУУМ»

Структура программного обеспечения модуля термостабилизации

Модуль термостабилизации (далее модуль ТС) предназначен для охлаждения п/п подложки до заданной температуры после операции термической обработки, перед выгрузкой в приемную кассету. В состав модуля входят два основных узла: устройство подъема/опускания/фиксации подложки и устройство термостатирования. Исполнительным устройством является линейный актуатор фирмы «Электропривод» на базе шагового двигателя. В состав входит оптический пролетный датчик начального положения «ТС. ИСХОДНОЕ», а также генератор вакуума с вакуумным датчиком.

Для управления шаговым двигателем линейного актуатора применен блок управления ШД - SMSD-1.5 фирмы «Электропривод» [10], для которого основными сигналами управления являются сигналы «ТС. ШАГ», «ТС. НАПРАВЛЕНИЕ», «ТС. РАЗРЕШЕНИЕ».

По фронту сигнала «ТС. ШАГ» шаговый двигатель актуатора поворачивает ротор на один шаг, при изменении сигнала «ТС. НАПРАВЛЕНИЕ» направление вращения ШД линейного актуатора меняется на противоположное, при отсутствии сигнала «ТС. РАЗРЕШЕНИЕ» снимается напряжение с обмоток ШД.

Таким образом, в те промежутки времени, когда устройство подъема/опускания/фиксации п/п подложки не используется, для уменьшения нагрева ШД необходимо снимать сигнал «ТС. РАЗРЕШЕНИЕ».

Для обеспечения фиксации подложки на модуле ТС необходимо подать сигнал «ТС. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ» на клапан генератора вакуума и проверить факт надежной фиксации п/п подложки на модуле ТС по сигналу с датчика вакуума «ТС. ВАКУУМ».

Выдвижение рабочего органа транспортного модуля на позиции термообработки при наличии п/п подложки на рабочем органе запрещено до тех пор, пока отсутствует сигнал с датчика «ТС. ИСХОДНОЕ».

Недопустимо размещать п/п подложку на плите модуля термостабилизации до выхода термостата на заданный температурный режим.

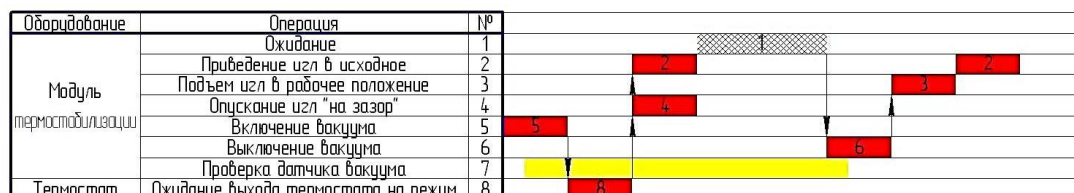
Необходимо контролировать наличие подложки на модуле термостабилизации по сигналу датчика вакуума данной позиции «ТС. ВАКУУМ» в течение всего времени обработки подложки на данной позиции.

Разрядная сетка для модуля термостабилизации приведена в табл. 3.

На рис. 6 приведена циклограмма модуля термостабилизации.

Начальным условием для проведения термостабилизации является наличие п/п подложки на поднятых в рабочее положение иглах ТС, манипулятор в исходном по координате выдвигении. Модуль ТС вышел на заданный температурный режим.

Примечание: алгоритмы выполнения отдельных операций, их граничные условия описаны в разделе 1.



- - Действия для обработки п/п подложки
- ▨ - Процесс длительность которого определяется технологической программой
- - Опрос датчиков. Внимание! Возможность блокировки

Рис. 6. Циклограмма работы модуля термостабилизации

Таблица 3

Разрядная сетка для модуля термостабилизации

№пп	Наименование сигнала	Назначение	Активный уровень	Источник сигнала	Приемник сигнала
1	ТС. ПОДЪЕМ. ШАГ	1 импульс = 1 шаг ШД (с учетом дробления шага)	Фронт импульсного сигнала	ПЛК	Драйвер ШД SMSD-1.5
2	ТС. ПОДЪЕМ. НАПРАВЛЕНИЕ	Выбор направления вращения	«1» = CCW «0» = CW	ПЛК	Драйвер ШД SMSD-1.5
3	ТС. ПОДЪЕМ. РАЗРЕШЕНИЕ	Разрешение работы драйвера SMSD-1.5	«0»	Плата ввода вывода	Драйвер ПЛ SMSD-1.5
4	ТС. ИСХОДНОЕ	Датчик исходного положения	«0»	Датчик	ПЛК
5	ТС. ВАКУУМ. ВКЛЮЧЕНИЕ	Включение/выключение генератора вакуума	«1» - вкл. «0» - выкл	Плата ввода-вывода	Генератор вакуума
6	ТС. ВАКУУМ	Датчик наличия вакуума (фиксация п/п подложки)	Фронт импульсного сигнала	Датчик	Плата ввода-вывода

Примечание. Направление вращения: CW – подъем, CCW - опускание.

Для режима диагностики необходимо обеспечить возможность выполнения следующих команд и индикацию следующих величин:

1. Иглы в исходное - по этой команде необходимо осуществить опускание игл до датчика «ТС. ИСХОДНОЕ». Проверить выполнение команды по состоянию соответствующего датчика. Перед началом каждого перемещения по любой координате необходимо проверить наличие сигнала от датчика исходного положения для данной координаты.

2. Фиксация подложки - по этой команде необходимо осуществить включение генератора вакуума.

Перед началом каждого перемещения по любой координате необходимо проверить наличие сигнала от датчика исходного положения для данной координаты.

3. Подъем/опускание игл - по этой команде необходимо осуществить подъем или опускание игл на заданное количество шагов.

4. Вывод состояния датчика «ТС. ИСХОДНОЕ»

5. Вывод состояния датчика «ТС. ВАКУУМ»

Структура библиотеки технологических программ, пользовательский интерфейс и блокировки

Разработанная библиотека технологических программ представляет собой набор макросов, обеспечивающих автоматическую обработку подложек с заданными характеристиками, а также процедуру записи макросов как в режиме выполнения диагностических команд

(режим диагностики), так и автономно в форме табличного задания.

Список команд и параметров, подлежащих записи в макрос, определялся как задание.

Процедура записи и сохранения макроса обеспечивает описание последовательных операций с переменными параметрами (параметризуемые операции), такими как:

- нанесение фоторезиста (доза, время, температура фоторезиста),
- режим нанесения фоторезиста (в центр, сканирование),
- подача азота (есть или нет, время подачи),
- центрифугирования (скорости, ускорения, времена обработки),
- отмывка краевого валика (есть или нет, время отмывки),
- отмывка обратной стороны (есть или нет, время отмывки),
- термообработка (температура, время термообработки, контактно или на зазоре),
- термостабилизация (время обработки, контактно или на зазоре),
- граничные условия, условия выполнения и временные интервалы между операциями.

Транспортные операции (загрузка, выгрузка, перенос подложек) являются жёстко детерминированными по граничным условиям и условиям выполнения, таким как:

- наличие или отсутствие кассеты на столике модуля загрузки и (или) модуля приемки,
- наличие или отсутствие пластины на технологическом модуле,
- сигналы датчиков, обеспечивающих функционирование модулей.

Структура библиотеки технологических программ обеспечивает удобный доступ, выбор, просмотр описания и характеристик, а также загрузку технологических программ.

Под термином пользовательский интерфейс понимается совокупность графических, текстовых и мультимедийных элементов для ввода параметров, задания команд, а также вывода параметров, основных и вспомогательных данных, выбора режима функционирования установки.

Пользовательский интерфейс обеспечивает удобное и интуитивно понятное управление работой установки для оператора с начальным уровнем компьютерной подготовки.

Пользовательский интерфейс структурно разделен на три основные части, представляющие собой основные режимы работы установки и программного обеспечения:

Первая часть - режим ДИАГНОСТИКА.

В режиме диагностики обеспечивается возможность индивидуальной работы с каждым технологическим модулем установки.

Доступ к режиму диагностики защищен паролем для исключения доступа к данному режиму неавторизованного персонала.

В режиме ДИАГНОСТИКА необходимо, чтобы элементы управления и отображения информации, относящиеся к конкретным модулям, были соответственно сгруппированы и визуально отделены друг от друга.

Перечень команд и данных для отображения в режиме ДИАГНОСТИКА приведен в описании технологических модулей выше.

Элементы управления и отображения информации сопровождаются всплывающими подсказками (с возможностью отключения пользователем) о назначении данного элемента.

Вторая часть - режим РАБОТА.

В режиме РАБОТА обеспечена индикация основных параметров функционирования установки (наличие необходимого уровня давления воздуха, наличия основных технологических сред и т.п.), а также обеспечено срабатывание блокировок (с отображением соответствующих сообщений) и одновременно возможность снятия блокировок.

Основными командами являются команды «ПУСК», «СТОП», а также элементы управления для выбора и загрузки технологической программы для работы установки.

Третья часть - режим формирования базы технологических параметров (БТП).

С точки зрения программного интерфейса режим формирования БТП обеспечивает удобное и однозначное создание технологических программ, а также сохранение вновь созданных программ и удобный доступ к ранее созданным программам.

Доступ к режиму формирования БТП защищен паролем для исключения доступа к данному режиму неавторизованного персонала.

Хранение файлов с технологическими программами должно осуществляться в защищенной от стирания и изменения сторонним программным обеспечением структуре (в разделе жесткого диска).

Описание всех управляющих элементов и элементов отображения данных подробно изложено в соответствующей документации на разработанную автоматизированную установку нанесения фоторезиста с тем расчётом, чтобы освоить мог их назначение и особенности

функционирования пользователь с начальной компьютерной подготовкой.

В составе установки предусмотрено наличие одной или нескольких веб-камер для отображения процесса функционирования установки (или отдельных модулей) на дисплее персонального компьютера, в том числе и с использованием удаленного доступа, а также записи соответствующей видеоинформации в файл.

Для обеспечения возможности настройки транспортной и других систем установки разработан соответствующий инструментарий, позволяющий задавать и сохранять для использования в работе программы следующие данные:

- количество шагов по координате поворота от исходного до позиции нанесения фоторезиста;
- количество шагов (импульсов с энкодера) по координате выдвигания от исходного до позиции нанесения фоторезиста;
- количество шагов по координате поворота от исходного до позиции термообработки;
- количество шагов (импульсов с энкодера) по координате выдвигания от исходного до позиции термообработки;
- количество шагов по координате поворота от исходного до позиции термостабилизации;
- количество шагов (импульсов с энкодера) по координате выдвигания от исходного до позиции термостабилизации;
- количество шагов по координате поворота от исходного до позиции приемки обработанных п/п подложек;
- количество шагов (импульсов с энкодера) по координате выдвигания от исходного до позиции приемки обработанных п/п подложек;
- количество шагов для модулей загрузки и приемки п/п подложек, для обеспечения пере-

мещения на одну ячейку кассеты (отдельно для каждого модуля);

- количество шагов для обеспечения подъема игл модулей ТО и ТС в положение от исходного до рабочего (отдельно для каждого модуля), а также количество шагов для обеспечения обработки на зазоре.

Доступ к режиму настройки параметров защищен паролем.

Разработанное программное обеспечение отрабатывает ряд блокировок, введенных во избежание не предусмотренной регламентом обработки подложек, а также для выхода из строя модулей установки или причинения вреда здоровью обслуживающего персонала.

Интерфейс программного обеспечения имеет средства вывода сообщения о срабатывании блокировок, а также способы снятия блокировок.

Разработанное руководство оператора включает в себя описание обработки блокировок и способы их снятия для продолжения работы.

В процессе отладки установки, а также в ходе пуско-наладочных работ на площадях заказчика перечень необходимых блокировок может как увеличиться, так и сократиться.

Этот факт учтён при разработке ПО, то есть, предусмотрена процедура включения или выключения блокировок, защищенная от несанкционированного применения пароля.

Необходимо учитывать, что отсутствие сигнала от любого из датчиков в то время, когда сигнал должен присутствовать, вызывает блокировку системы с выводом сообщения и диалогом для снятия блокировки и запроса дальнейших действий. Примеры блокировок приведены в табл. 4.

Таблица 4

Примеры блокировок

№пп	Название блокировки	Описание и способ снятия
1	Отсутствие подачи сжатого воздуха	Определяется по сигналу с датчика давления. Сопровождается включением красного индикатора состояния установки. Полностью блокирует работу установки в режиме РАБОТА. Снятие блокировки должно осуществляться в диалоге сообщения о срабатывании блокировки.
2	Отсутствие п/п пластины на рабочем органе транспортного модуля	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ТМ. ВАКУУМ. ДАТЧИК по истечении времени 1с после включения генератора вакуума на ТМ.
3	Отсутствие п/п пластины на столике центрифуги	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ЦЕНТРИФУГА. ВАКУУМ. ДАТЧИК по истечении времени 1с после включения генератора вакуума на ТМ.
4	Отсутствие п/п пластины на позиции ТО	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ТО. ВАКУУМ. ДАТЧИК по истечении времени 1с после включения генератора вакуума на ТМ.

5	Отсутствие п/п пластины на позиции ТС	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ТС. ВАКУУМ. ДАТЧИК по истечении времени 1с после включения генератора вакуума на ТМ.
6	Отсутствие загрузочной кассеты на столике модуля загрузки	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ЗАГРУЗЧИК. КАССЕТА
7	Отсутствие приемной кассеты на столике модуля приемки	Определяется по отсутствию сигнала с датчика ПРИЕМНИК. КАССЕТА
8	Невыполнение команды на этапе приведения в исходное состояние	Определяется по отсутствию сигнала с любого из датчиков исходного положения

Заключение

В соответствии с разработанными алгоритмами был создан новый эффективный пакет программного обеспечения, предназначенный для управления узлами и модулями автоматизированной установки нанесения фоторезиста УНФ-200А, логирования в базу технических характеристик узлов и модулей, а также показателей технологического процесса для мониторинга этих значений на экране. Программа состоит из нескольких главных модулей, а именно модулей транспорта, термообработки, термостабилизации, загрузчика, приемника, нанесения и вспомогательных модулей: работа с базой данных, вывод показателей, логирование, взаимодействие с ПЛК, обработка ошибок.

На основании госконтрактов и прямых НИОКР в период 2011 – 2020 гг. они были поставлены предприятиям РФ, нуждающимся в современном высокотехнологичном оборудовании, среди которых можно назвать такие, как ОАО «Лианозовский электромеханический завод» [12] (Лианозовские радары), г. Москва; Ордена Трудового Красного Знамени «Институт химии силикатов» имени И.В. Гребенщикова» [13], г. Санкт-Петербург; АО «Государственный оптический институт им. Вавилова» [14], г. Санкт-Петербург; АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица [15], г. Тамбов и др.

Литература

1. Конструкторское бюро технологических машин (КБТМ) [сайт]. URL: <http://vkbtm.ru>. (Дата обращения: 16.02.2022)
2. АНОО ВО «Международный институт компьютерных технологий» [сайт]. URL: <http://iict.ru/наука>. (Дата обращения: 16.02.2022)
3. С++ (язык программирования) [Электронный ресурс]. URL: <https://ru.bmstu.wiki/C%2B%2B> (Дата обращения: 15.02.2022).
4. Компания Сименс. Каталог. Микроконтроллер [сайт]. URL: <https://www.siemens-pro.ru/s7-1200/6AG1214-1BD23-2XB0.html> (Дата обращения: 16.02.2022).
5. Siemens. Каталог. Преобразователи RS-232 - RS-485. [сайт]. URL: <https://search.dc.siemens.com/en?q=converter> (дата обращения: 16.02.2022).
6. Программное обеспечение STEP7 [сайт]. URL: https://www.elinc.ru/Downloads/Siemens/step7_in_manual_ru.pdf (Дата обращения: 16.02.2022).
7. PLC Programming with SIMATIC STEP7. Siemens [Электронный ресурс]. URL: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal/software/step7-tia-portal.html>. (Дата обращения: 16.02.2022).
8. Компания ОВЕН. Оборудование для автоматизации. Каталог. Регуляторы [сайт]. URL: <https://owen.ru/product/trm101> (Дата обращения: 16.02.2022).
9. Компания ОВЕН. Оборудование для автоматизации. Каталог. Usb-преобразователь [сайт]. URL: https://owen.ru/product/owen_as4 (Дата обращения: 16.02.2022).
10. ООО «Электропривод». Каталог. Блоки управления двигателями BMD [сайт]. URL: <https://electroprivod.ru/bmd> (Дата обращения: 16.02.2022).
11. Белоусова О.В., Беляков П.Ю. Разработка шагового электропривода общепромышленного назначения с электронной коммутацией// Электроэнергетика и электротехника: сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. / отв. ред. д-р техн. наук, проф., зав. каф. электроэнергетики Анненков А.Н. Воронеж: АНОО ВО «Международ. ин-т компьют. технологий», 2019. С. 132 - 135
12. ОАО «Лианозовский электромеханический завод» [сайт]. URL: <https://lemz.ru> (Дата обращения: 15.02.2022)
13. ФГБУН Ордена Трудового Красного Знамени Институт химии силикатов им. И.В. Гребенщикова РАН (ИХС РАН) [сайт]. URL: <https://www.iscras.ru> (Дата обращения: 15.02.2022)
14. АО «НПО Государственный оптический институт им. С. И. Вавилова» [сайт]. URL: <http://goi.ru> (Дата обращения: 15.02.2022)
15. АО «ТАГАТ» им. С.И. Лившица [сайт]. URL: <https://tagat.ru> (Дата обращения: 15.02.2022).

Поступила 20.04.2022; принята к публикации 10.06.2022

Информация об авторах

Анненков Андрей Николаевич - д-р техн. наук, доцент, проректор по научной работе, Международный институт компьютерных технологий (394026, г. Воронеж, ул. Солнечная, 29 б), e-mail: annenkovandray@yandex.ru, тел.: +7(473) 233-11-93; 8951-870-37-77, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1914-8075>

Белусова Олеся Владимировна - старший преподаватель кафедры «Электроэнергетика», Международный институт компьютерных технологий (394026, г. Воронеж, ул. Солнечная, 29 б), e-mail: sova.ol@mail.ru, тел.: +7(473)239-25-96; 89081328759

DEVELOPMENT OF SOFTWARE FOR AUTOMATED PHOTORESIST APPLICATION UNIT

A.N. Annenkov, O.V. Belousova

International Institute of Computer Technology, Voronezh, Russia

Abstract: the level of photolithography technologies and equipment for their implementation is a determining criterion for achieving the required design standards in microelectronics, radioelectronics, optics and microelectromechanical systems. The work is related to the development of the hardware composition of the control system of the automated technological installation for applying photoresist, made in a cluster design with a controlled gas medium, as well as the creation of a package of its software. In accordance with the developed control algorithms, command and sensor signal processing bit grids, as well as operation cyclograms for each module and installation as a whole, a software package was created to control the units and modules of the automated installation of application of the UNF photoresist -200A, logic to the database of technical characteristics of units and modules, as well as process indicators for monitoring these values on the screen. The program consists of several main modules, namely: transport, heat treatment, thermal stabilization, loader, receiver, application, as well as auxiliary modules: database operation, indicator output, logic, interaction with industrial logic controllers and error processing. The developed software works out a number of interlocks introduced to avoid non-scheduled processing of substrates, as well as to fail the installation modules or harm the health of maintenance personnel. The software interface has means of displaying a message about the interlock actuation, as well as methods of unlocking

Key words: automatic installation of photoresist application, cluster design, controlled gas medium, control system, functional process modules, software.

References

1. Design Bureau of Process Machines, available at: <http://vkbtm.ru> (date of access: 16.02.2022)
2. International Institute of Computer Technologies, available at: <http://iict.ru/наука> (date of access: 16.02.2022)
3. C++ (programming language), available at: <https://ru.bmstu.wiki/C%2B%2B> (date of access: 15.02.2022).
4. Siemens. Directory. Microcontroller, available at: <https://www.siemens-pro.ru/s7-1200/6AG1214-1BD23-2XB0.html> (date of access: 16.02.2022).
5. Siemens. Directory. Converters RS-232 - RS-485, available at: <https://search.dc.siemens.com/en?q=converter> (date of access: 16.02.2022).
6. Software STEP7, available at: https://www.elinc.ru/Downloads/Siemens/step7_in_manual_ru.pdf (date of access: 16.02.2022).
7. "PLC Programming with SIMATIC STEP7", Siemens, available at: <https://new.siemens.com/global/en/products/automation/industry-software/automation-software/tia-portal/software/step7-tia-portal.html> (date of access: 16.02.2022).
8. ARIES Company. Automation equipment. Directory. Regulators, available at: <https://owen.ru/product/trm101> (date of access: 16.02.2022).
9. ARIES Company. Automation equipment. Directory. USB converter, available at: <https://owen.ru/product/owenas4> (date of access: 16.02.2022).
10. LLC "Electric Drive." Directory. BMD motor control units, available at: <https://electroprivod.ru/bmd> (date of access: 16.02.2022).
11. Belousova O.V., Belyakov P.Yu. "Development of a step electric drive for general industrial purposes with electronic switching", *Proc. of the Int. Sci. and Tech.I Conf.: Electric Power and Electrical Engineering (Elektroenergetika i elektrotehnika)*, Voronezh, 2019, pp. 132-135.
12. Lianozovskiy Electromechanical Plant, available at: <https://lemz.ru> (date of access: 15.02.2022)
13. FSBUN of the Order of the Red Banner of Labor Institute of Silicate Chemistry named after I.V. Greshchikov RAS, available at: <https://www.iscras.ru> (date of access: 15.02.2022)
14. State Optical Institute named after S. I. Vavilov, available at: <http://goi.ru> (date of access: 15.02.2022)
15. TAGAT named after S.I. Livshits, available at: <https://tagat.ru> (date of access: 15.02.2022).

Submitted 20.04.2022; revised 10.06.2022

Information about the authors

Andrey N. Annenkov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Deputy Rector for Scientific Work, International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: annenkovandray@yandex.ru, tel.: +7951-870-37-77, +7(473)233-11-93, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1914-8075>

Olesya V. Belousova, Assistant Professor, International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechnaya str., Voronezh 394026, Russia), e-mail: sova.ol@mail.ru, tel.: +7 (473)239-25-96, +7908-132-87-59

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ТЕПЛООБМЕНА ОДИНОЧНОЙ КАПЛИ ДОМЕННОГО ШЛАКА ПРИ НЕУСТАНОВИВШЕМСЯ ДВИЖЕНИИ ВО ВСТРЕЧНОМ ПОТОКЕ ГАЗА

Н.Н. Сеницын^{1,2}, Н.В. Запатрина², Ю.В. Донцова¹

¹Череповецкий государственный университет, г. Череповец, Россия

²Военный ордена Жукова университет радиозлектроники, г. Череповец, Россия

Аннотация: сухая грануляция доменного шлака, в отличие от мокрой грануляции, позволяет утилизировать физическую теплоту жидкого доменного шлака, выход которого составляет 0,3 ... 0,35 т на т чугуна, а также исключить образование вредных газообразных сернистых соединений. При проектировании опытно-промышленных установок сухой грануляции доменного шлака необходимы инженерные методики, позволяющие рассчитывать характерные размеры грануляционной камеры, а именно: диаметр и высоту, позволяющие исключить налипание капель жидкого доменного шлака на стенки камеры. До столкновения со стенкой капли доменного шлака должны затвердеть. Разработана математическая модель охлаждения одиночной капли жидкого доменного шлака при неустановившемся движении во встречном потоке газа с учетом фазового перехода доменного шлака. Решение дифференциального уравнения теплопроводности осуществлено методом конечных разностей по явной схеме аппроксимации производных. Фазовый переход учитывается с помощью эффективной теплоемкости. При этом температура фазового перехода размазывается в некотором интервале температур. Граница перехода шлака из жидкого состояния в твердое определяется по температуре фазового перехода доменного шлака. При тестировании алгоритма определяются настроечные параметры модели: число узлов расчетной сетки и температурный интервал фазового перехода доменного шлака. Скорость движения капли доменного шлака во встречном потоке газа описывается системой обыкновенных дифференциальных уравнений, решение которых осуществлялось численным методом Рунге-Кутты, с последующим определением относительной скорости капли и коэффициента теплоотдачи в каждый момент времени. Представлены траектории движения капли доменного шлака до момента полной остановки в горизонтальном направлении и температурные поля по сечению капли в момент остановки. Разработан алгоритм расчета теплообмена капли при ее движении во встречном газовом потоке. Математическая модель теплообмена капли доменного шлака при ее движении во встречном охлаждающем газовом потоке позволяет прогнозировать поведение капель в грануляционной камере и спрогнозировать характерные ее размеры

Ключевые слова: сухая грануляция, доменный шлак, температурное поле, фазовый переход, неустановившееся движение, траектории движения

Введение

Сухая грануляция доменного шлака, выход которого составляет 0,3...0,6 т на 1 т чугуна [1, 2, 7,8,9,10,11], позволяет утилизировать физическую теплоту шлака. При этом полностью исключаются вредные газообразные выбросы в окружающую среду [6, 10] и получается качественное сырье – сухой гранулированный доменный шлак в стекловидном состоянии, который используется при производстве изоляционных и строительных материалов, в том числе и цемента [5]. Количество физической теплоты доменного шлака при температуре 1400...1500°С составляет 1,6...1,8 МДж/кг [3, 4]. При проектировании грануляционной камеры необходимо оценить основной размер камеры - ее диаметр и высоту, чтобы не было налипания шлака на стенки камеры, потому что до

столкновения со стенкой капли доменного шлака должны затвердеть. Минимальная температура полного затвердевания шлака составляет примерно 1200°С и соответствует концентрации SiO₂ ≈35% [12].

Целью представленной работы являются исследование температурного поля одиночной капли огненно-жидкого доменного шлака при ее движении с переменной скоростью в потоке охлаждающего газа, определение времени полного затвердевания частицы в условиях неустановившегося движения и определение траектории движения капли доменного шлака в грануляционной камере.

Постановка задачи

Принципиальная схема грануляционной камеры установки показана на рис. 1. В установку жидкий шлак с температурой 1400...1500°С по каналу 1 подается на вращающуюся с большой скоростью чашу 2, получа-

ющиеся капли попадают во встречный поток газа 6, до столкновения со стенкой 3 капли шлака в грануляционной камере 4 должны затвердеть, т.е. охладиться до температуры ниже температуры плавления. Выделение теплоты затвердевания шлака не происходит, поскольку шлак сразу из жидкого состояния переходит в аморфное стекловидное состояние [6]. Небольшая часть холодного воздуха по каналу 7 идет на охлаждение вращающейся чаши.

Охлаждение капли жидкого доменного шлака сферической формы радиусом r_0 осуществляется в потоке газа с температурой T_r и описывается сквозным уравнением теплопроводности с переменными граничными условиями третьего рода, учитывающим теплообмен конвекцией и тепловым излучением.

Расчетная схема определения температурного поля в капле жидкого доменного шлака с учетом фазового перехода представлена на рис. 2.

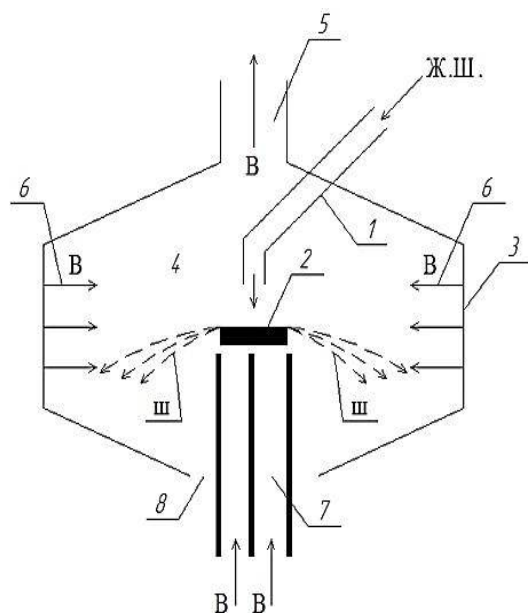


Рис. 1. Схема грануляционной камеры установки: 1 - канал подачи жидкого шлака; 2 - вращающаяся чаша; 3 - стенка грануляционной камеры; 4 - грануляционная камера; 5 - патрубок выхода горячего воздуха; 6 - подача холодного воздуха; 7 - подача холодного воздуха на охлаждение чаши 2; 8 - канал удаления затвердевшего шлака; В - воздух; Ж. Ш. - жидкий шлак; Ш - капли шлака

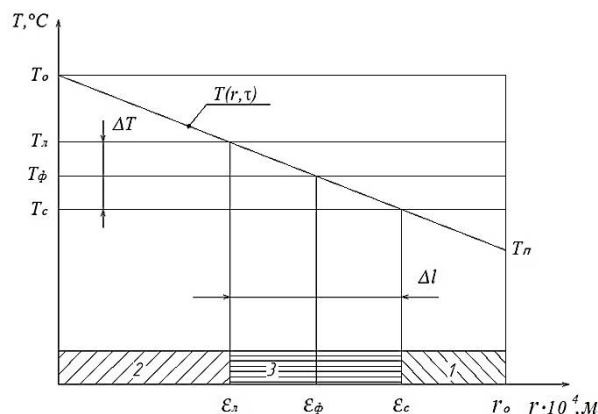


Рис. 2. Схема расчетной области:

1 - твердая фаза; 2 - жидкая фаза; 3 - двухфазная зона, содержащая твердую и жидкую фазы; $\epsilon_s, \epsilon_\phi, \epsilon_c$ - координаты температур начала и окончания фазового перехода и координата фазового перехода доменного шлака; $\Delta l, \Delta T$ - интервал фазового перехода доменного шлака по координате и температуре.

Задача о температурном поле формулируется следующим образом:

$$C_{эф}(T) \cdot \rho(T) \frac{dT(r,\tau)}{dt} = \frac{d}{dr} \left[\lambda(T) \frac{dT(r,\tau)}{dr} \right] + \frac{2\lambda(T)}{r} \cdot \frac{dT(r,\tau)}{dr}, \quad (1)$$

интегрируемое в области: $0 \leq r \leq r_0; 0 \leq \tau \leq \tau_k$;

- начальное условие: $T(r, 0) = T^0, \quad (2)$

- граничное условие:

при $r = 0$: $\lambda(T) \frac{dT(0,\tau)}{dr} = 0, \quad (3)$

при $r = r_0$: $-\lambda(T) \frac{dT(r_0,\tau)}{dr} = \alpha [T_r - T(r_0, \tau)], \quad (4)$

где $\rho(T), \lambda(T)$ - плотность и коэффициент теплопроводности доменного шлака; $\alpha = \alpha_k + \alpha_l$ - коэффициент теплоотдачи; α_k - конвективный коэффициент теплоотдачи; α_l - лучистый коэффициент теплоотдачи; T_r - температура охлаждающего газа; T^0 - начальная температура материала; r_0 - начальный радиус капли шлака; r - текущий радиус капли; τ - время; $T(r, \tau)$ - текущая температура материала; τ_k - конечное время прогрева; $C_{эф}(T)$ - эффективная теплоемкость материала капли.

Фазовый переход в уравнение (1) учитывают с помощью эффективной теплоемкости, задаваемой выражением:

$$c_{эф}(T) = \begin{cases} c_1(T), T < T_c; \\ c_1(T) \cdot \psi + c_2(T) \cdot (1 - \psi) + \frac{L}{\Delta T}, T_l \geq T \geq T_c; \\ c_2(T), T > T_l \end{cases}$$

Коэффициент теплопроводности и плотность определяют по выражениям:

$$\lambda(T) = \begin{cases} \lambda_1(T), T < T_c; \\ \lambda_1(T) \cdot \psi + \lambda_2(T) \cdot (1 - \psi), T_c \leq T \leq T_l; \\ \lambda_2(T), T > T_l, \end{cases}$$

$$\rho(T) = \begin{cases} \rho_1(T), T < T_c; \\ \rho_2(T) \cdot \psi + \rho_2(T) \cdot (1 - \psi), T_c \leq T \leq T_l; \\ \rho_2(T), T > T_l, \end{cases}$$

где $T_c = T_\phi - \Delta T/2$ и $T_l = T_\phi + \Delta T/2$ - температуры начала и окончания фазового перехода доменного шлака; $c_1(T)$, $c_2(T)$ - удельные теплоемкости шлака в твердом и жидком состояниях; $\lambda_1(T)$ и $\lambda_2(T)$ - коэффициенты теплопроводности доменного шлака в твердом и жидком состояниях; $\rho_1(T)$ и $\rho_2(T)$ - плотности шлака в твердом и жидком состояниях; ψ - доля жидкого материала, содержащегося в шлаке в двухфазной зоне; T_ϕ - температура фазового перехода шлака; ΔT - интервал размазывания температуры фазового перехода в двухфазной зоне; L - теплота фазового перехода шлака из жидкого состояния в твердое.

Величина ψ определяется по формуле:

$$\psi = \begin{cases} 0, T < T_c; \\ \frac{T_l - T}{T_l - T_c}, T_c < T < T_l; \\ 1, T > T_l. \end{cases}$$

Условный коэффициент теплоотдачи излучением α_l между поверхностью капли шлака и газом определяется выражением:

$$\alpha_l = \frac{q_l}{T_n - T_r};$$

$$q_l = \left[\left(\frac{T_n}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_r}{100} \right)^4 \right] \cdot \varepsilon_{пов} \cdot c_0;$$

где $T_n = (T_N + T_{N+1})/2$ - температура поверхности капли шлака; $\varepsilon_{пов}$ - степень черноты поверхности капли, c_0 - излучательная способность абсолютно черного тела; T_N и T_{N+1} - температуры во внутреннем и фиктивном узлах расчетной сетки; N - число узлов расчетной сетки.

Коэффициент теплоотдачи конвекцией α_k определяется по формуле [14, стр. 175]

$$\alpha_k = Nu \cdot d / \lambda_r,$$

где $\overline{Nu} = 2 + 0,03Re^{0,54} \cdot Pr^{0,33} + 0,35Re^{0,58} \cdot Pr^{0,36}$; d - диаметр капли, λ_r - коэффициент теплопроводности газа; $Re = w_{отн} \cdot d / \nu_r$ - критерий Рейнольдса; $w_{отн}$ - относительная скорость капли доменного шлака и газа; ν_r - коэффициент кинетической вязкости газа; Pr - число Прандтля. Для воздуха при $t = 30^\circ C$ $\lambda_r = 0,0267$ Вт/(м·К), $\nu_r = 16,04 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $Pr = 0,701$ [13].

Для доменных шлаков принимаем: плотность доменного шлака твердого $\rho_1 = 2800$ кг/м³ и жидкого $\rho_2 = 3000$ кг/м³, удельная теплоемкость твердого доменного шлака определяется по формуле с учетом данных [15], $c_1 = 0,85 + 15,6 \cdot 10^{-6} \cdot (T - 373) + 19,5 \cdot 10^{-8} \cdot (T - 373)^2$, кДж/(кг·К), T - температуры в градусах Кельвина. Теплоемкость жидкого шлака $c_2 = 1,269$ кДж/(кг·К). Коэффициент теплопроводности жидкого доменного шлака $\lambda_2 = 2$ Вт/(м·К) [15]. Температура окончания затвердевания $T_c = 1165^\circ C$. Температура начала затвердевания $T_l = 1350^\circ C$. Температура фазового перехода $T_\phi = 1275^\circ C$.

Решение сквозного уравнения (1) с граничными условиями (2)-(4) осуществляется методом конечных разностей по явной схеме аппроксимации производных. Температуры в фиктивных узлах в момент времени $\tau + \Delta\tau$ определяются по формулам:

$$T_{N+1} = \frac{(1 - \varepsilon) \cdot T_N + 2\varepsilon \cdot T_r}{1 + \varepsilon}; \quad \varepsilon = \frac{\alpha \cdot \Delta r}{2\lambda_\pi};$$

$$T_0 = T_1,$$

где λ_π - коэффициент теплопроводности доменного шлака при температуре поверхности.

Границы перехода шлака из жидкого состояния в твердое определяются по температуре фазового перехода доменного шлака в цикле по $i = 2 \dots N$ из условия:

$$\text{Если } T_{i-1} \geq T_\phi \geq T_i;$$

$$\text{то } \varepsilon = \Delta r \left(i - \frac{3}{2} \right) + \Delta r \cdot \frac{T_{i-1} - T_\phi}{T_{i-1} - T_i}.$$

Здесь i - номер узла расчетной сети; Δr - приращение аргумента по координате.

Приращение независимого аргумента по времени определяют по формуле:

$$\Delta\tau = \Delta r^2 / (k_y \cdot \alpha),$$

где $k_y \geq 6$ – настроечный параметр; a – коэффициент температуропроводности.

Тестирование численного решения задачи для выбора настроечных параметров алгоритма k_y , ΔT и N выполнили путем оценки погрешности баланса теплоты в теле, для этого составили уравнение баланса в момент времени τ :

$$Q_o = Q_y + Q_T,$$

где Q_o , Q_y и Q_T – количество теплоты в теле в начальный момент, Q_y и Q_T – количество теплоты, ушедшее из тела и оставшееся в теле к моменту времени τ . Относительную погрешность моделирования определили по формуле:

$$\delta = \frac{|Q_o - Q_y - Q_T|}{Q_o} \cdot 100\%.$$

При варьировании количества узлов расчетной сетки погрешность будет изменяться. Формула для определения Q_o , Q_y и Q_T в конечно-разностной форме имеет вид:

$$Q_o = c_2 \cdot \rho_2 \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot r_o^3 (T^o - T_r);$$

$$Q_y = \frac{\Delta \tau}{\Delta r} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r_o^2 \cdot \sum_{n=0}^{n^*} \lambda \left(\frac{T_{N+1} + T_N}{2} \right) \cdot (T_N - T_{N+1});$$

$$Q_T = c(T_i) \cdot \rho(T_i) \cdot \frac{4}{3} \cdot \pi \cdot \left[(i \cdot \Delta r)^3 - ((i-1) \cdot \Delta r)^3 \right] \cdot (T_i - T_r),$$

где n^* – индекс, соответствующий текущему моменту времени.

Минимальная относительная погрешность при максимальном радиусе капли доменного шлака равном $3 \cdot 10^{-3}$ м и максимальной относительной скорости $W_{\text{отн}} = 80$ м/с составляет 1,36% при числе узлов расчетной сетки $N=9$ и $\Delta T = 25$ К.

Расчет траекторий движения капли

На жидкую каплю доменного шлака, движущуюся в газовом потоке, действуют силы инерции $\vec{F}_и$, силы аэродинамического сопротивления \vec{P}_C и сила тяжести \vec{P}_B :

$$\vec{F}_и = m \cdot d\vec{V}/d\tau, \quad (5)$$

$$\vec{P}_C = \frac{1}{2} c f \rho_r (\vec{W} - \vec{V}) \cdot |\vec{W} - \vec{V}|, \quad \vec{P}_B = m\vec{g},$$

где c – коэффициент аэродинамического сопротивления капли потоку газа; $f = \pi \cdot d^2/4$ – пло-

щадь миделева сечения капли доменного шлака, ρ_r – плотность газового потока; \vec{W} , \vec{V} – скорость движения газового потока и капли шлака; \vec{g} – вектор ускорения свободного падения.

Решения обыкновенных дифференциальных уравнений осуществлялись численным методом Рунге-Кутты [16].

Координаты траектории движения капли доменного шлака рассчитываются по формулам за расчетный шаг по времени:

$$x(\tau + \Delta\tau) = x(\tau) + V_x \cdot \Delta\tau;$$

$$y(\tau + \Delta\tau) = y(\tau) + V_y \cdot \Delta\tau;$$

$$z(\tau + \Delta\tau) = z(\tau) + V_z \cdot \Delta\tau.$$

Здесь $V_x \cdot \Delta\tau$ – приращение координаты траектории движения по оси Ox ; $V_y \cdot \Delta\tau$ – приращение координаты траектории движения по оси Oy ; $V_z \cdot \Delta\tau$ – приращение координаты траектории движения по оси Oz ; $x(\tau)$, $y(\tau)$, $z(\tau)$ – значение координаты в момент времени τ ; $x(\tau + \Delta\tau)$, $y(\tau + \Delta\tau)$, $z(\tau + \Delta\tau)$ – значение координаты в момент времени $\tau + \Delta\tau$. Оси Ox и Oy расположены горизонтально, ось Oz направлена вниз. На рис. 3 представлены траектории движения каплей шлака при неустановившемся движении во встречном потоке газа. Из рисунка видно, что уменьшение скорости капли радиусом 0.0015 м с 40 до 10 м/с проекция траектории на горизонтальную ось уменьшается с 3.86 м до 0.44 м, а проекция на вертикальную ось уменьшается с 0.299 м до 0.055 м. Продолжительность движения уменьшается с 0.26 с до 0.057 с до торможения капли в горизонтальном направлении.

Из рис. 3 видно, что, изменяя начальную скорость капли, можно оценить характерные размеры грануляционной камеры, диаметр и высоту.

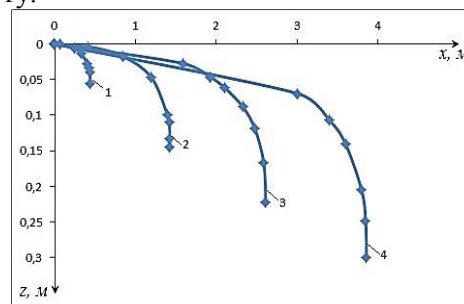


Рис. 3. Траектории движения каплей шлака при неустановившемся движении:

1 – при $\tau = 0,097$ с, $V=10$ м/с, $W=10$ м/с; 2 – при $\tau = 0,17$ с, $V=20$ м/с, $W=40$ м/с; 3 – при $\tau = 0,219$ с, $V=30$ м/с, $W=40$ м/с; 4 – при $\tau = 0,26$ с, $V=40$ м/с, $W=40$ м/с

Расчет температурных полей в капле

Результаты расчета температурных полей в капле доменного шлака диаметром 0.002 м, полученные с помощью протестированной модели, в различные моменты времени при неустановившемся движении представлены на рис. 4. Начальная температура шлака 1500°С, начальная скорость движения капли шлака в горизонтальном направлении $V=40$ м/с, встречная скорость газового потока $W=40$ м/с. Температурное поле соответствует моменту времени полного торможения движения капли в горизонтальном направлении (рис. 4, линия 3). Проекция траектории капли на горизонтальную ось равна 2,64 м, на вертикальную ось 0,127 м. С уменьшением начальной скорости капли до 10 м/с проекция траектории на горизонтальную ось уменьшается до 0,3 м, а на вертикальную увеличивается до 2,5 м (рис. 4, линия 6). Продолжительность движения уменьшается с 0,173 с до 0,0686 с. Уменьшение скорости газового потока до 10 м/с приводит к уменьшению проекции траектории движения в горизонтальном направлении до 0,3 м, в вертикальном направлении к увеличению до 2,5 м (рис. 4, линия 6), продолжительность движения равна 0,0686 с.

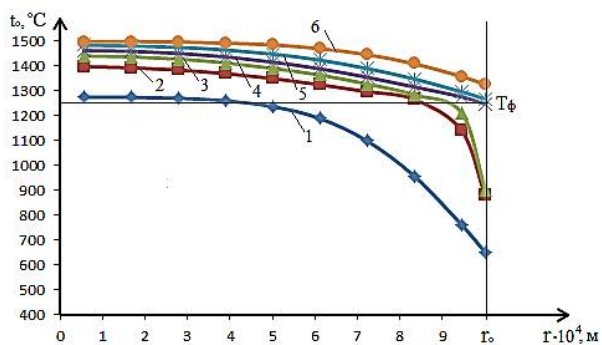


Рис. 4. Температурное поле по сечению капли шлака диаметром 2 мм при неустановившемся движении в момент торможения:

1 – при $\tau = 0,888$ с, $V=40$ м/с, $W=10$ м/с; 2 – при $\tau = 0,234$ с, $V=30$ м/с, $W=30$ м/с; 3 – при $\tau = 0,173$ с, $V=40$ м/с, $W=40$ м/с; 4 – при $\tau = 0,148$ с, $V=30$ м/с, $W=40$ м/с; 5 – при $\tau = 0,115$ с, $V=20$ м/с, $W=40$ м/с; 6 – при $\tau = 0,0686$ с, $V=10$ м/с, $W=40$ м/с.

Из рис. 4 видно, что, изменяя начальные скорости капли и газового потока при встречном движении, можно прогнозировать состояния капли доменного шлака, при которых в момент торможения в горизонтальном направлении температура поверхности будет меньше температуры фазового перехода T_ϕ .

На рис. 5 представлены температурные поля по сечению доменного шлака диаметром 3 мм при неустановившемся движении в момент торможения в горизонтальном направлении. При начальной температуре капли T_0 , скорости встречного потока газа $W=40$ м/с и начальной скорости капли $V=40$ м/с температура поверхности капли меньше T_ϕ (рис. 5, линия 1). Проекция траектории капли равна в горизонтальном направлении 3,86 м, в вертикальном направлении 0,296 м. При уменьшении начальной скорости капли от 40 м/с до 10 м/с проекции траектории движения уменьшаются с 3.86 м до 0.445 м на горизонтальную плоскость и с 0.296 м до 0.055 м на вертикальную плоскость. Температура поверхности капли до значений больше T_ϕ (рис. 5, линия 2). Из рис. 5 видно, что для диаметра капли доменного шлака 3 мм можно подобрать начальные скорости капли и газового потока, для которых температура поверхности капли будет меньше T_ϕ .

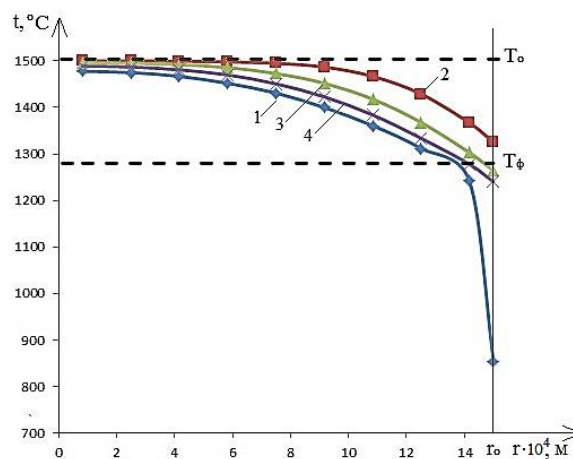


Рис. 5. Температурное поле по сечению капли диаметром 3 мм при неустановившемся движении в момент торможения капли в горизонтальном направлении:

1 – при $\tau = 0,26$ с, $V=40$ м/с, $W=40$ м/с; 2 – при $\tau = 0,097$ с, $V=10$ м/с, $W=40$ м/с; 3 – при $\tau = 0,176$ с, $V=20$ м/с, $W=40$ м/с; 4 – при $\tau = 0,217$ с, $V=30$ м/с, $W=40$ м/с.

Алгоритм расчета теплообмена капли в потоке газа

На рис. 6 представлена блок-схема алгоритма расчета теплообмена капли доменного шлака в потоке охлаждающего газа.

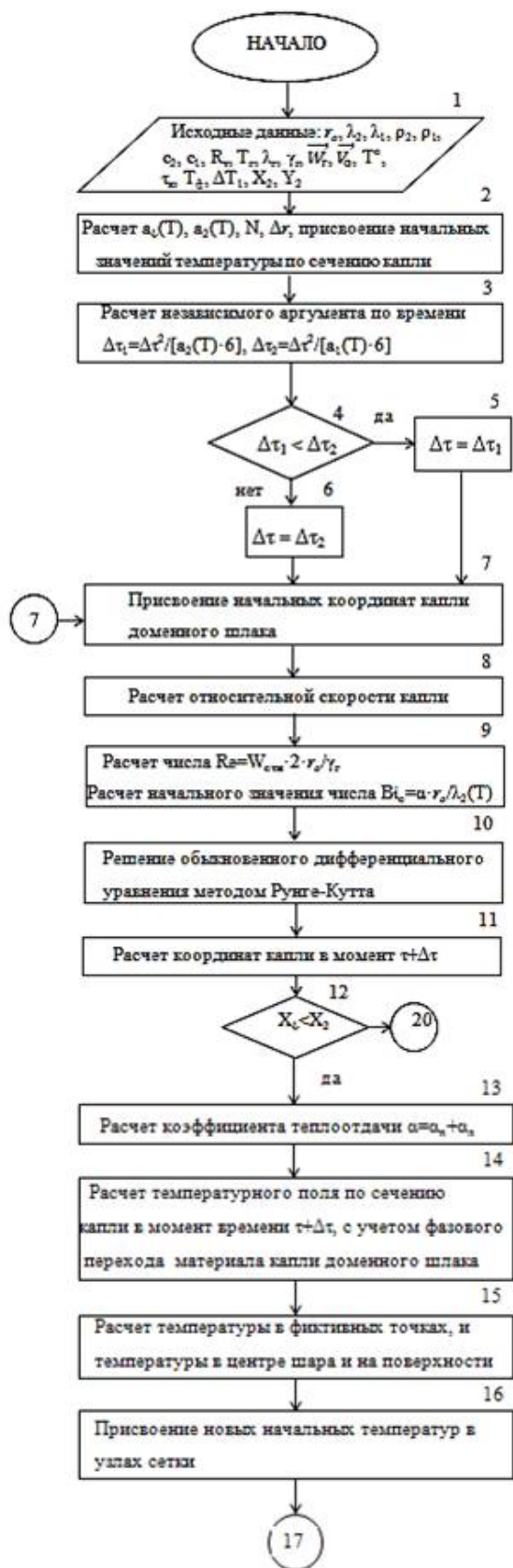


Рис. 6. Алгоритм прогнозирования теплообмена при охлаждении капли доменного шлака в потоке газа



Рис. 6. Алгоритм прогнозирования теплообмена при охлаждении капли доменного шлака в потоке газа (продолжение)

В блоке №1 задаются исходные данные, в блоке №2 задается число узлов сетки, рассчитывается шаг по координате, присвоение начальных температур в узлах сетки.

В блоке №3 рассчитывается допустимый шаг по времени. В блоках №4,5,6 осуществляется выбор наименьшего шага по времени.

В блоках №7, 8, 9 осуществляется присвоение начальных координат траектории движения капли доменного шлака, расчет относительной скорости капли, числа Рейнольдса, числа Био. В блоках №10, 11 осуществляется решение обыкновенного дифференциального уравнения методом Рунге-Кутты и расчет координат капли в момент времени $\tau + \Delta\tau$.

В блоке №12 сравнивается следующая координата по оси X: больше предыдущей или нет.

В блоках №13, 14, 15, 16 осуществляется расчет температурного поля по сечению капли по явной схеме аппроксимации производных с учётом фазового перехода материала доменного шлака. В блоке №17 производится расчет координаты фронта фазового перехода материала доменного шлака.

В блоках №18, 19 сравниваются координаты траектории движения доменного шлака при охлаждении в газовом потоке с заданными. В блоке №20 осуществляется вывод на печать координат траектории движения капли, температуры в узлах сетки, числа F_0 , Vi_0 , продолжительность движения, координаты фронта испарения, проекции скорости движения капли.

Заключение

Для исследования траекторий движения жидкой капли доменного шлака в потоке холодного воздуха при неустановившемся режиме движения создана математическая модель теплообмена жидкой капли доменного шлака с учетом фазового перехода материала капли. В результате моделирования охлаждения капли доменного шлака при неустановившемся её движении в потоке холодного воздуха представлены температурные поля по сечению капли с учетом фазового перехода от продолжительности охлаждения, размеров капли и относительной скорости в момент торможения капли при движении в горизонтальном направлении. Показаны траектории движения капель во встречном потоке газа в зависимости от начальных скоростей капли и потока газа до момента торможения капли в горизонтальном направлении.

Система уравнений (1) – (5) охлаждения одиночной капли жидкого доменного шлака при её неустановившемся движении во встречном потоке газа до момента торможения капли в горизонтальном направлении позволяет прогнозировать появление твердой фазы, определить траекторию капли доменного шлака в процессе неустановившегося движения во встречном потоке газа и оценить характерные размеры грануляционной камеры, диаметр и высоту активной зоны. Предложен алгоритм расчета тепломассообмена капли доменного шлака в потоке газа.

Литература

1. Анализ работы доменных печей при высокой интенсивности плавки/ С.В. Филатов, А.В. Лозович, В.Н.

Титов, С.А. Загайнов, И.Ф. Курунов // *Металлург.* 2017. №10. С. 18-21.

2. Внедрение энергоэффективных решений при выплавке чугуна в ПАО «НЛМК»/ С.В. Филатов, И.Ф. Курунов, В.Н. Титов, С.А. Загайнов // *Металлург.* 2019. №4. С. 25-28.

3. О возможности использования теплового баланса доменной плавки для контроля тепловых потерь/ О.П. Онорин, А.А. Полинов, А.В. Павлов, Н.А. Спирин, И.А. Гурин // *Металлург.* 2018. №3. С. 30-34.

4. Потери тепла с жидкими доменными шлаками и технические решения по их сокращению/ Г.И. Урбанович, Е.Г. Урбанович, В.А. Панов, В.Ф. Воропаев, В.И. Басов // *Известия вузов. Черная металлургия.* 2008. №7 (1303). С. 51-56.

5. Схемы переработки металлургических шлаков/ А.И. Гамей, В.В. Наумкин, Н.В. Сукинова, З.Н. Мурзина // *Сталь.* 2007. № 2. С. 144-145.

6. New process for dry granulation and heat recovery from molten blast-furnace slag/ S.J. Pickering, N. Hay, T.F. Roylance, G.H. Thomas // *Ironmaking and Steelmaking.* 1985. Vol.12. No.1. P. 14-21.

7. Barati M., Esfahani S., Utigard T.A. Energy recovery from high temperature slags // *Energy.* 2011. Vol. 36(9). P.5440-5449.

8. Xie D., Jahanshahi S., Norgate T. Dry granulation to provide a sustainable solution for slag treatment // *Sustainable Mining Conference.* 2010. Kalgoorlie, WA, Australia. P. 22-28.

9. Каппес Х., Мичелс Д. Сухая грануляция шлака с утилизацией энергии — от рождения идеи до пилотной установки // *Черные металлы.* 2015. №5 (1001). С. 46-52.

10. A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry/ H. Zhang, H. Wang, X. Zhu, Y. Qiu, K. Li, R. Chen, Q. Liao // *Applied Energy.* 2013. Vol. 112. P. 956-966.

11. A Review of Granulation Process for Blast Furnace Slag/P. Yu, S. Wang, Y. Li, G. Xu // *MATEC Web of Conferences: the 3rd International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2016).* Hong Kong. 2016. Vol. 68. P. 6-10.

12. Лукин С.В., Шестаков Н.И., Ильичева Е.М. Теплообмен в грануляционной камере установки сухой грануляции шлака // *Металлург.* 2019. № 8. С. 36 – 41.

13. Казанцев Е.И. Промышленные печи. Справочник. М.: Металлургия, 1975. 368 с.

14. Тепло- и массообмен. Теплотехнический эксперимент: Справочник / Е.В. Аметистов, В.А. Григорьев, Б.Т. Емцев и др.; под общ. ред. В.А. Григорьева и В.М. Зорина. М.: Энергоиздат, 1982. 512 с.

15. Юрьев Б.П. Изучение теплофизических свойств доменных шлаков в процессе их термической обработки // *Известия вузов. Черная металлургия.* 2014. № 11. С. 5-10.

16. Калиткин Н.Н. Численные методы: учеб. пособие для вузов / под ред. А.А. Самарского. М.: Наука, 1978. 512 с.

Поступила 25.04.2022; принята к публикации 31.05.2022

Информация об авторах

Синицын Николай Николаевич - д-р техн. наук, профессор, Череповецкий государственный университет (162600, Россия, г. Череповец, пр. Луначарского, 5); профессор, Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники (162622, Россия, г.

Череповец, Советский проспект, д. 126), e-mail: nnsinitcyn@chsu.ru, тел. 8 (8202) 51-78-29, 8-921-259-12-77, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>

Запатрина Наталия Владимировна - канд. техн. наук, зав. кафедрой, Военный ордена Жукова университет радиоэлектроники (162622, Россия, г. Череповец, Советский проспект, д. 126), тел. 8-921-055-69-77

Донцова Юлия Викторовна - аспирант, Череповецкий государственный университет (162600, Россия, г. Череповец, пр. Луначарского, 5), e-mail: iuvdontcova@chsu.ru, тел. 8 (8202) 51-78-29, 8-921-718-70-81.

MATHEMATICAL MODEL FOR PREDICTING HEAT EXCHANGE OF A SINGLE BLAST OF FURNACE SLAG DROPLET IN UNSTEADY MOTION IN A COUNTER GAS FLOW

N.N. Sinitsyn^{1,2}, N.V. Zapatrina², Yu.V. Dontsova¹

¹Cherepovets State University, Cherepovets, Russia

²Military Order of Zhukov University of Radio Electronics, Cherepovets, Russia

Abstract: dry granulation of blast furnace slag, unlike wet granulation, makes it possible to utilize the physical heat of liquid blast furnace slag, the yield of which is 0.3 ... 0.35 t per t of iron, as well as to exclude the formation of harmful gaseous sulfur compounds. When designing pilot plants for dry granulation of blast-furnace slag, engineering methods are needed to calculate the characteristic dimensions of the granulation chamber, namely the diameter and height to exclude the adhesion of liquid blast-furnace slag droplets to the chamber walls. Before colliding with the wall, the blast furnace slag droplets must solidify. In this paper, we developed a mathematical model for cooling a single drop of liquid blast furnace slag in unsteady motion in a counter gas flow with consideration of the phase transition of blast furnace slag. The differential equation of heat conduction is solved by the finite difference method, according to the explicit derivative approximation scheme. The phase transition is taken into account by means of effective heat capacity. In this case, the phase transition temperature is smeared out in some temperature interval. The slag transition boundary from liquid to solid state is determined by the blast furnace slag phase transition temperature. When testing the algorithm, we determined the model settings: the number of calculation grid nodes and the blast furnace slag phase transition temperature interval. The velocity of blast-furnace slag droplet in the counter gas flow is described by the system of ordinary differential equations, solved by numerical Runge-Kutta method, followed by determination of the droplet relative velocity and heat transfer coefficient at each moment of time. We presented the trajectories of blast furnace slag droplet motion up to the moment of complete stop in the horizontal direction and temperature fields along the droplet cross section at the moment of stop. We developed an algorithm for calculating the heat exchange of the droplet as it moves in the counter gas flow. Mathematical model of heat exchange of blast furnace slag droplet during its movement in the counter cooling gas flow makes it possible to predict the droplet behavior in the pelletizing chamber and to predict its characteristic sizes

Key words: dry granulation, blast furnace slag, temperature field, phase transition, unsteady motion, motion trajectories

References

1. Filatov S.V., Lozovich A.V., Titov V.N., Zagaynov S.A., Kurunov I.F. "Analysis of blast furnaces at high melting intensity", *Metallurgist*, 2017, no. 10, pp. 18-21.
2. Filatov S.V., Kurunov I.F., Titov V.N., Zagaynov S.A. "The introduction of energy efficient solutions in melting pig iron at NLMK", *Metallurgist*, 2019, no. 4, pp. 25-28.
3. Onorin O.P., Polinov A.A., Pavlov A.V., Spirin N.A., Gurin I.A. "On the possibility of using the heat balance of blast furnace smelting to control heat losses", *Metallurgist*, 2018, no. 3, pp. 30-34.
4. Urbanovich G.I., Urbanovich E.G., Panov V.A., Voropaev V.F., Basov V.I. "Heat losses with liquid blast furnace slag and technical solutions to reduce them", *News of Universities. Ferrous Metallurgy (Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya)*, 2008, no. 7 (1303), pp. 51-56.
5. Gamey A.I., Naumkin V.V., Sukinova N.V., Murzina Z.N. "Processing schemes of metallurgical slags", *Steel*, 2007, no. 2, pp. 144-145.
6. Pickering S.J., Hay N., Roylance T.F., Thomas G.H. "New process for dry granulation and heat recovery from molten blast-furnace slag", *Ironmaking and Steelmaking*, 1985, vol.12, no.1, pp. 14-21.
7. Barati M., Esfahani S., Utigard T.A. "Energy recovery from high temperature slags", *Energy*, 2011, vol. 36(9), pp. 5440-5449.
8. Xie D., Jahanshahi S., Norgate T. "Dry granulation to provide a sustainable solution for slag treatment", *Sustainable Mining Conf.*, 17-19 August 2010, Kalgoorlie, WA, Australia, pp. 22-28.
9. Kappes H., Michels D. "Dry granulation of slag with energy recovery - from the birth of an idea to a pilot plant", *Ferrous Metals*, 2015, no. 5 (1001), pp. 46-52.
10. Zhang H., Wang H., Zhu X., Qiu Y., Li K., Chen R., Liao Q. "A review of waste heat recovery technologies towards molten slag in steel industry", *Applied Energy*, 2013, vol. 112, pp. 956-966.

11. Yu P., Wang S., Li Y., Xu G. "A review of granulation process for blast furnace slag", *MATEC Web of Conferences. The 3rd International Conference on Industrial Engineering and Applications (ICIEA 2016)*, 28-30 April 2016, Hong Kong, vol. 68, pp. 6-10.
12. Lukin S.V., Shestakov N.I., Il'icheva E.M. "Heat exchange in the granulation chamber of dry slag granulation unit", *Metallurgist*, 2019, no. 8, pp. 36-41.
13. Kazantsev E.I. "Industrial furnaces" ("Promyshlennyye pechi"), reference book, Moscow: Metallurgiya, 1975, 368 p.
14. Ametistov E.V., Grigoriev V.A., Emtsev B.T., et al., ed. by Grigoriev V.A. and Zorin V.M. "Heat and mass exchange. Experiments in heat and mass transfer" ("Teplo- i massoobmen. Teplotekhnicheskyy eksperiment"), reference book, Moscow: Energoizdat, 1982, 512 p.
15. Yur'ev B.P. "Research of thermal properties of blast furnace slag during thermal processing", *News of Universities. Ferrous Metallurgy (Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya)*, 2014, no. 11, pp. 5-10.
16. Kalitkin N.N., ed. by A.A. Samarskiy "Numerical methods" ("Chislennyye metody"), textbook for universities, Moscow: Nauka, 1978, 512 p.

Submitted 25.04.2022; revised 31.05.2022

Information about the authors

Nikolay N. Sinitcyn, Dr. Sc. (Technical), Professor, Cherepovets State University (5 Lunacharskogo pr. Cherepovets 162600, Russia), Military Order of Zhukov University of Radio Electronics (126 Sovetskiy prospect, Cherepovets 162622, Russia), e-mail: nnsinitcyn@chsu.ru, tel.: +7 (8202) 51-78-29, +7-921-259-12-77, <https://orcid.org/0000-0001-8919-0573>

Natal'ya V. Zapatrina, Cand. Sc. (Technical), Head of Department, Military Order of Zhukov University of Radio Electronics (126 Sovetskiy prospect, Cherepovets 162622, Russia), tel.: +7-921-055-69-77.

Yuliya V. Dontsova, graduate student, Cherepovets State University (5 Lunacharskogo pr. Cherepovets 162600, Russia), e-mail: iuvdontcova@chsu.ru, tel.: +7 (8202) 51-78-29, +7-921-718-70-81.

IT-АРХИТЕКТУРА ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНОГО СТЕНДА

А.В. Бредихин, В.В. Сокольников, Д.А. Зиновкина

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описана IT-архитектура программно-аппаратного комплекса интеллектуального стенда в концепции бережливого производства. Система предназначена для предприятий с контролем ценного инструмента вручную. Эту задачу выполняет заведующий инструментальным складом и прочие ответственные. Данная разработка ускорит и облегчит процесс получения и выдачи необходимого оборудования, сокращая время на рутинное заполнение журнала учета. Интеллектуальный стенд представляет собой масштабную систему, которая автоматизирует долгий процесс выдачи инструмента. Стеллаж с хранимым инструментом, который по пропуску выдает необходимое. Параллельно в мобильное приложение идет распознаваемая искусственным интеллектом информация от камеры. По получаемому изображению проводится интеллектуальное определение взятого инструмента. Мобильный клиент предназначен для рабочих предприятия. Приложение дает возможность персонально получать задание на смену и удобно отслеживать статистические данные, касающиеся состояния, наличия инструмента, а также историю пользования. Считывающий микроконтроллер определяет по уникальному ID конкретного пользователя системы. Web-приложение ориентировано на применение ответственными за инструмент. Привилегированные возможности добавления новых пользователей и инструмента в базу доступны только компетентным сотрудникам. Предварительные оценки современных производств показывают высокие перспективы внедрения

Ключевые слова: интеллектуальный стенд, искусственный интеллект, автоматизация, нейросеть

Введение

На сегодняшний день, с учетом развития технологий, существуют новые возможности в цифровизации предприятий. Существуют проблемы на производствах, которые требуют тщательной проработки. Некоторые предприятия не готовы к происходящим изменениям. Тем не менее, цифровизация ставит новые задачи развития технологий производства. Остро встает необходимость автоматизации процессов с целью сокращения трудозатрат по технологической подготовке производства.

Предприятия, откладывающие модернизацию производства и цифровизацию взаимодействий, в перспективе проигрывают экономическую гонку более развитым конкурентам. Внедрение современных решений устремлено в будущее. Пассивность предприятий к внедрению современных технологий с каждым днем сокращается.

Снижение сроков и трудоемкости предоставляет преимущества для машиностроительных предприятий. В частности, за счет оптимизации работы инструментального хозяйства складами, контроля выдаваемого инструмента.

Потеря инструмента и небрежное отношение ведут к значительным убыткам. Однако нельзя отрицать, что резкая смена принципа

выдачи инструмента будет психологически тяжела для людей, привыкших к традиционной организации процесса. Важно предложить удобный для большинства продукт, позволяющий перестроиться с минимальными потерями. В большинстве мелкосерийных производств в настоящее время инструмент хранится в маркированных шкафах или комодах, а их учет ведется вручную в журнале или специализированной программе. Автоматизация регистрации способна обеспечить производство эффективным распределением труда.

1. Выбор средств разработки IT-архитектуры

Сложный проект требует подробной детализации на начальных этапах разработки. Хорошая основа — залог качественной работы. Такой основой проекта является архитектура, сложная и многослойная. Архитектура IT — это организация системы, состоящей из различных компонентов, описывающая их взаимодействие между собой, с внешней средой, определяющая конструкцию потоков данных. Разнообразные описания процессов и элементов для удобства восприятия можно объединить в общую структуру. Использование подобных методов логически разделяет проект на разделы по конкретным темам. Это помогает лучше понять процессы в проекте с разных точек зрения, вместе с тем охватывая все одно-

временно. Объективная критическая оценка важна для грамотного перераспределения ресурсов.

Условно любая архитектура делится на логические уровни. В случае интеллектуального стенда необходимо учитывать пять слоев: организационный слой, слой бизнес-логики, слой данных, программный слой и технологический. Последовательность подчеркивает углубление в процесс. Так в бизнес слое представлена логика процесса инструментального обеспечения технологического процесса изготовления, а в более низших слоях описана работа сервера и потоков данных. Архитектура проекта будет выполнена с применением языка ArchiMate. В отличие от других языков схожей направленности, ArchiMate резко выделяется лаконичностью и простотой в освоении. Поскольку он позволяет описать большинство стандартных производственных ситуаций, освоение более простого сервиса наиболее целесообразно.

2. Разработка IT-архитектуры

2.1. Организационный слой. Организационный слой описывает ключевые роли участ-

ников процесса. В случае данного проекта необходимо рассматривать лишь целевых пользователей — рабочий и ответственный за инструмент (заведующий инструментальным складом, кладовщик) (рис. 1).

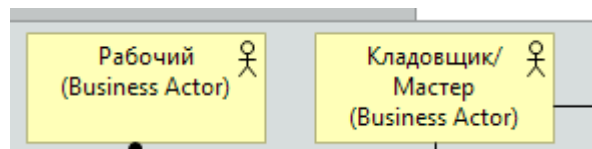


Рис. 1

2.2. Слой бизнес-логики. Слой бизнес-логики описывает деятельность предприятия и его развитие, а также методы физического доступа к информации. Важной частью проекта можно назвать мобильное приложение, рассматриваемое в этом слое (рис. 2). Поскольку аппаратно-программный комплекс предназначен для управления инструментальным хозяйством, необходимо рассмотреть процесс инструментального обеспечения технологического процесса изготовления.

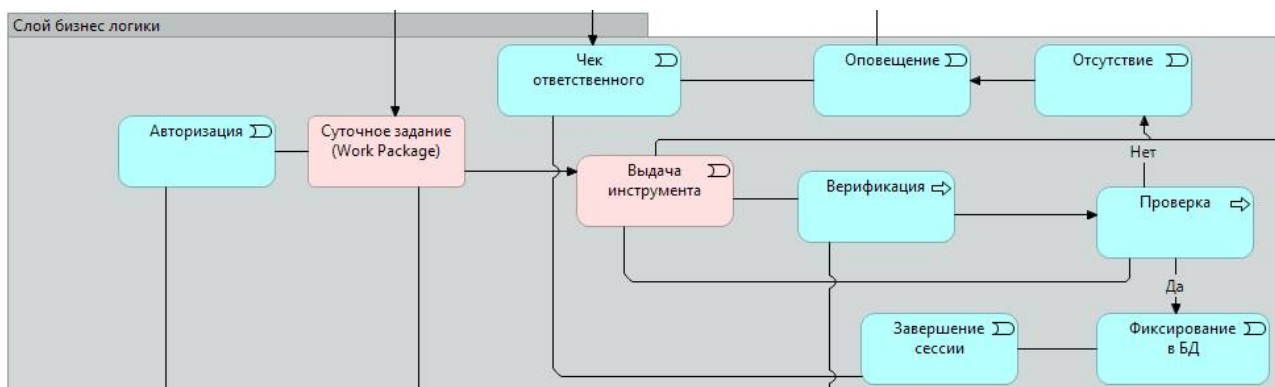


Рис. 2

Авторизация нужна для подтверждения личности рабочего. Пройдя авторизацию при помощи регистрационных данных или уникального ID, пользователь попадает на первую страницу приложения — список задач на смену. Суточное задание определяет набор инструмента, необходимый для выполнения операции.

Верификация инструмента с изображения камеры при помощи нейросети меняет статус инструмента на «взят/не взят». Проверка продолжается до тех пор, пока не будет собран полный набор необходимых приспособлений.

В случае отсутствия ошибок в процессе получения или выдачи происходит фиксация

информации в базе данных. Заносятся такие параметры, как фамилия, имя, отчество рабочего, его ID, время начала и завершения сессии, список взятого оборудования. В дальнейшем это будет использовано для контроля инструмента.

Однако в процессе могут возникнуть следующие ситуации: отсутствие необходимого инструмента, поломка, ненадлежащее качество. В таком случае работник отправляет запрос ответственному о необходимости решить проблему. Результат обработки ситуации будет производиться вручную в порядке исключения.

2.3. Слой данных. Слой данных включает в себя входные и выходные данные (рис. 3). Это

связующая часть между всеми частями проекта. Без входных данных работа каждой из частей

системы невозможна.



Рис. 3

Составляющая пакета данных для модуля авторизации — логин, пароль и ID. Данные вводятся при запуске приложения и сверяются с заранее занесёнными значениями в базу данных. При успешной авторизации пользователь допускается к работе.

Основой суточного задания является техпроцесс. Каждый из технических процессов, доступный к выполнению на день, связан со списком необходимого для его выполнения технологического оборудования и инструмента.

Наличие видеопотока обуславливает выполнение верификации. Идентификация инструмента происходит в режиме реального

времени. Трансляция при хорошем уровне освещенности стенда способна обеспечить высокий процент корректности распознавания. Следует заметить, что под верификацией инструмента и его идентификацией следует понимать разные понятия. Верификация в случае этого проекта — определение корректности выбора инструмента в соответствии с технологическим процессом. Идентификация же — это процесс распознавания конкретного инструмента из полного их набора на стенде.

Мобильное приложение — посредник общения пользователя с сервером (рис. 4).



Рис. 4

2.4. Слой приложений. Включает в себя два сервиса обновления данных: сервис смены суточного задания и сервис верификации.

Сервис верификации снабжает приложение актуальным списком инструментов в наличии. Это позволяет производить эффективную фильтрацию технических процессов в приложении по доступности. Задание, которое невозможно выполнить ввиду отсутствия инструмента, отображаться в списке задач не будет.

Сервис сменно-суточного задания будет пополнять общий список задач. Независимо от наличия оборудования, список задач на смену будет пополняться при помощи данного сервиса, если ответственный за инструмент будет изначально их вносить в базу данных.

Общая часть для сервисов — ID инструмента. Поиск данных в базе осуществляется через уникальный код, присваиваемый каждо-

му инструменту. Система или сверяет наличие определенного инструмента, или добавляет инструмент в текущую суточную задачу. ID используется для удобной взаимосвязи сервисов, мобильного приложения и баз данных между собой.

Серверная часть включает в себя важную часть проекта — базу данных, содержащую данные о пользователях (ФИО, уникальный номер, фото, статистика работы), данные об инструментах (уникальный номер, название, дата регистрации, дата предстоящего списания, частота использования), данные о событиях (кто, когда и какой инструмент взял, когда вернул). Подобные данные дают возможность оперативно отслеживать актуальную информацию. Статистика пользователя поможет отслеживать риски выполнения задачи в срок, риск утери или кражи инструмента. Статистика инстру-

мента поможет следить за его состоянием и качеством, напомнит о предстоящем списании вследствие износа.

Тесно связаны с базой данных модули авторизации и завершения сессии. Они определяют начало и окончание подключения к базе. При авторизации пользователя запускается мобильное приложение, которое не может работать без входящих и включенных данных. Начинается сессия пользования системой. При ее завершении надобность в использовании базовой информации прекращается.

Организация предприятия должна быть эффективной и иметь резерв информационного ресурса на будущее. Современным средством является система планирования ресурсов предприятия. ERP-система — это программное обеспечение, позволяющее распределять ресурсы, вести отчетность. Она связывает разрозненные процессы проекта в единое целое. В случае интеллектуального стенда данная система будет формировать сменно-суточное задание. Это источник данных для производства.

2.5. Технологический слой.

Технологический слой отражает разработку в физическом смысле (рис. 5) — то, с чем пользователи бизнес слоя будут взаимодействовать. Слой описывает взаимосвязь мобильного устройства со стендом, а также оборудование внутри установки.

Мобильное устройство (смартфон или планшет) подключается к установке через сеть Wi-Fi — стандартная технология беспроводной связи. Приложение на мобильном устройстве получает действительные данные об имеющемся инструменте на интеллектуальном стенде.

Установка включает в себя сам интеллектуальный стенд, RaspberryPi, видеокамеру, RFID.

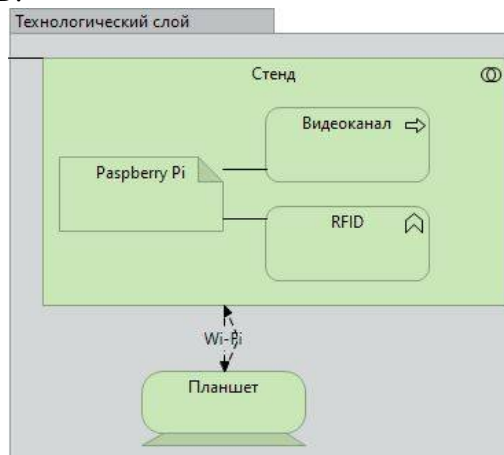


Рис. 5

В реалиях современного производства для упрощения внедрения стенд имеет вид стеллажа с выдвижными ящиками с прикрепленной сверху видеокамерой.

RaspberryPi — одноплатный встроенный компьютер. Используется в качестве сервера. Решение применения этой технологии разумно, поскольку дешевизна платы и ее малый размер позволяют установить сервер напрямую на сам стенд. При малых производственных задачах такое построение будет более выгодно, чем создание сервера на базе более дорогостоящих и мощных устройств.

RFID — радиочастотная идентификация (РЧИ). В проектировании интеллектуального стенда подразумеваются один RFID-меток — пассивные метки. У них нет источника питания, работа возможна при контакте со считывающим устройством. Пластиковую карту с нанесенной меткой рабочий прикладывает к встроенному в стенд считывателю для совершения авторизации.

Заключение

Результатом работы стала верхнеуровневая модель архитектуры системы интеллектуального стенда (рис. 6).

Интеллектуальный стенд позволяет автоматизировано получать и сдавать использованный за смену инструмент. Снижение участия человека в рутинном процессе обеспечит производство свободным работником, который будет вызван к инструменту лишь в критических ситуациях. Поломка и утеря инструмента с подобным стендом будут происходить значительно реже. Значит, ответственный за инструмент будет вызываться к стенду пропорционально реже.

Повышение экономической эффективности также обусловлено возможностью более точно отслеживать нахождение инструмента и контролировать негативные происшествия.

Разработка архитектуры задает ось развития проекта.

Создание грамотной архитектуры — сложный процесс, однако незаменимый в мире конкуренции при ограниченности ресурсов. Любая абстрактная идея раскладывается на составляющие перед реализацией. Это позволяет увидеть слабые места системы, оценить реальность и рентабельность ее создания.

Для разных целей существуют разные подходы визуализации архитектуры. Подходы варьируются объемом работы и их наполнением.

ем. Многообразие вариантов построения архитектуры дает простор для выбора подходящей

структуры для людей, создающих будущее.

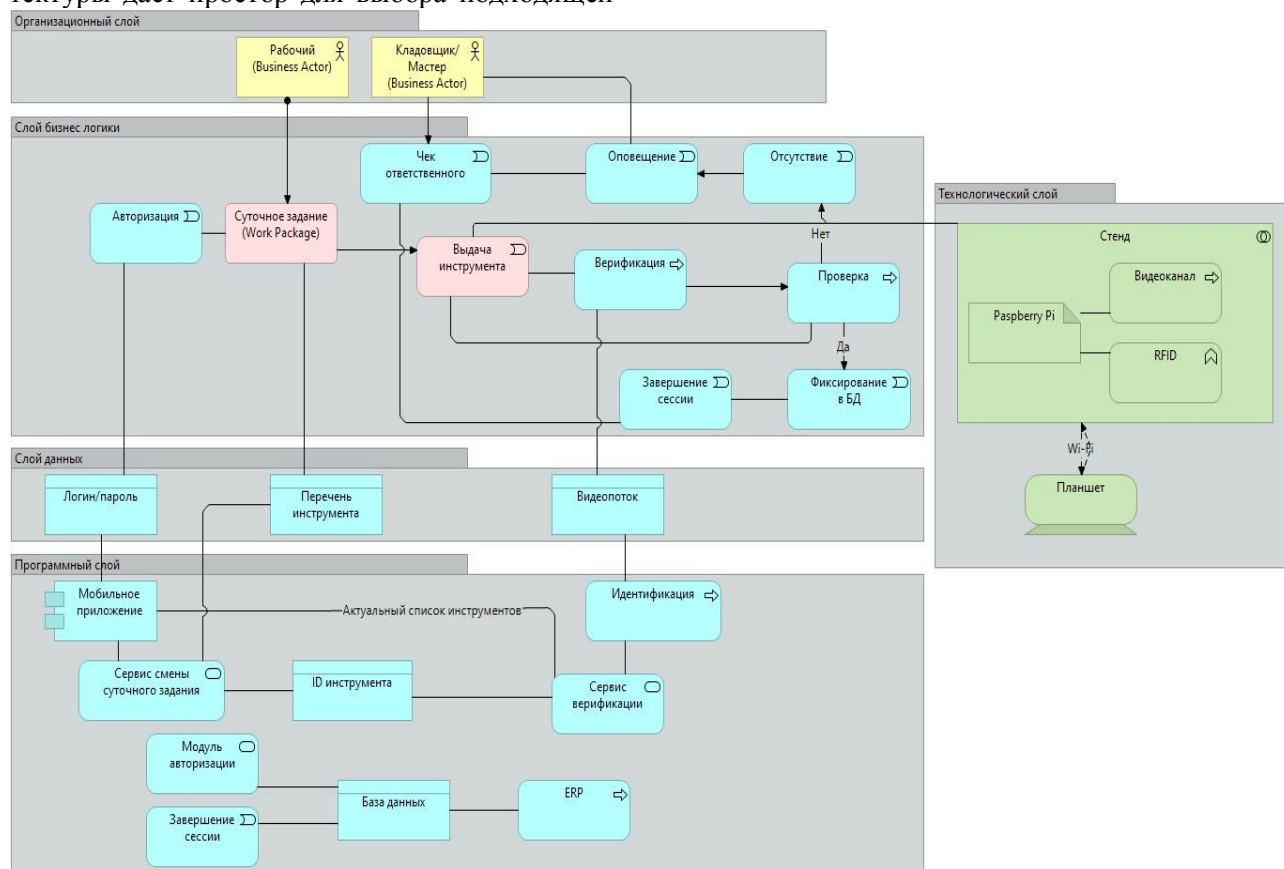


Рис. 6

Литература

1. Декало М.А., Кольцов А.С., Гусев П.Ю. Перспективные технологии нейросетевой видеоаналитики в системах безопасности // Техника и безопасность объектов уголовно-исполнительной системы: сб. материалов Междунар. науч.-практ. конф. В 2 т. Воронеж: Издательско-полиграфический центр "Научная книга", 2020. С. 25-29.
2. Neural network training for automated defect detection in additive production / P.V. Komarov, V.V. Sokolnikov, V.V. Vetohin, O.V. Sobenina // AIP Conference Proceedings, Krasnoyarsk. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Melville, New York, United States of America: AIP Publishing, 2021. P. 50030. DOI 10.1063/5.0071543. EDN RKKSIZ.
3. Сокольников В.В., Пачевский Д.Е., Собенина О.В. Применение дополненной реальности на машинострои-

4. Бредихин А.В., Тютин С.В., Школьник Ю.М. Автоматизация инструментального хозяйства в концепции интернет-вещей // Информатика: проблемы, методология, технологии: материалы XVI Междунар. науч.-метод. конф. / Под ред. Тюкачева Н.А. Воронеж: Научно-исследовательские публикации, 2016. С. 286-289.
5. Афанасьев В. "Умный" склад, или Новый подход к хранению компонентов // Компоненты и технологии. 2011. № 6(119). С. 164-166

Поступила 18.04.2022; принята к публикации 10.06.2022

Информация об авторах

Бредихин Алексей Вячеславович – канд. техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: maurochta@yandex.ru
Сокольников Виктор Владимирович – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(904)213-59-44
Зиновкина Дарья Алексеевна – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kitp@vorstu.ru, тел. +7(920)456-97-15

IT-ARCHITECTURE OF AN INTELLIGENT STAND

A.V. Bredikhin, V.V. Sokol'nikov, D.A. Zinovkina

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article describes the IT-architecture of the software and hardware complex of an intelligent stand in the concept of lean manufacturing. The system is designed for enterprises with manual control of a valuable tool. This task is performed by the head of the tool warehouse and other responsible persons. This development will speed up and facilitate the process of obtaining and issuing the necessary equipment, reducing the time for routine filling in the accounting log. The intelligent stand is a large-scale system that automates the previously long process of issuing a tool. A rack with a stored tool, which gives out what is needed by a pass. In parallel, information from the camera, recognized by artificial intelligence, goes to the mobile application. According to the resulting image, an intelligent definition of the taken tool is carried out. The mobile client is intended for enterprise workers. The application makes it possible to personally receive a shift assignment and conveniently track statistics regarding the condition, availability of the tool, as well as the history of use. The reading microcontroller determines by the unique ID of a specific user of the system. The web application is focused on application by those responsible for the tool. Privileged opportunities to add new users and tools to the database are available only to competent employees. Preliminary estimates of modern production facilities show high prospects for implementation.

Key words: smart stand, artificial intelligence, automation, neural network

References

1. Dekalo M.A., Kol'tsov A.S., Gusev P.Yu. "Promising technologies of neural network video analytics in security systems", *Proc. of the Int. Sci. and Prac. Conf.: Technique and Safety of Objects of the Penal System (Tekhnika i bezopasnost' ob'ektov ugolovno-ispolnitel'noy sistemy)*, Voronezh, 2020 May 20-21, Voronezh: Nauchnaya kniga, 2020, pp. 25-29.
2. Komarov P.V., Sokolnikov V.V., Vetohin V.V., Sobenina O.V. "Neural network training for automated defect detection in additive production", *AIP Conference Proceedings*, Krasnodar, April 29-30, 2021, Krasnodar Scientific Center of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Melville, New York, United States of America: AIP Publishing, 2021, pp. 50030, DOI 10.1063/5.0071543
3. Sokol'nikov V.V., Pachevskiy D.E., Sobenina O.V. "Application of augmented reality at machine-building enterprises", *Proc. of the Int. Sci. and Tech. Conf. dedicated to the memory of Doctor of Technical Sciences, Professor Aleksandr Ivanovich Zaitsev: New Technologies in Scientific Research, Design, Management, Production (Novye tekhnologii v nauchnykh issledovaniyakh, proektirovani, upravlenii, proizvodstve)*, Voronezh, November 21-23 2019, Voronezh: GUSEV SCIENTIFIC PUBLISHING HOUSE, 2019, pp. 53-59.
4. Bredikhin A.V., Tyutin S.V., Shkol'nik Yu.M. "Automation of tool economy in the concept of Internet things", *Proc. of the XVI Int. Sci. and Methodological Conf.: Informatics: Problems, methodology, Technologies (Informatika: problemy, metodologiya, tekhnologii)*, Voronezh, February 11-12, 2016, Edited by N.A. Tyukachev, Voronezh: Scientific Research Publications, 2016, pp. 286-289.
5. Afanas'ev V. "'Smart" warehouse, or a new approach to the storage of components", *Components and Technologies (Komponenty i tekhnologii)*, 2011, no. 6(119), pp. 164-166.

Submitted 18.04.2022; revised 10.06.2022

Information about the authors

Aleksey V. Bredikhin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: maypochta@yandex.ru
Viktor V. Sokolnikov, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel.: +7(904)213-59-44
Dar'ya A. Zinovkina, BA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kitp@vorstu.ru, tel.: +7(920)456-97-15

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕКУРРЕНТНЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПОТРЕБЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

С.Л. Подвальный, М.А. Лихотин, А.В. Михайлулов, А.К. Донских

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: продемонстрирована возможность предсказания почасового потребления электроэнергии по данным независимого системного оператора региона PJM Interconnection LLC с применением рекуррентных нейронных сетей. Представлено краткое описание коэффициента детерминации, который является разновидностью версии среднеквадратичной ошибки. Продемонстрирована структура исходных данных, устранён ошибочный порядок следования записей и проведена нормализация для последующего обучения моделей, а также весь набор имеющихся данных был разделён на тестовую и обучающую выборки. Кратко описаны используемые архитектуры рекуррентных нейронных сетей: рекуррентная нейронная сеть (recurrent neural network) и долгая краткосрочная память (long short-term memory). Представлены основные параметры архитектур для нейронных сетей, значения одной части которых приняты по умолчанию, так как подбирались экспериментально в ходе исследования, а прочие подбирались для получения оптимальной модели. Производится сравнительный анализ качества работы моделей в зависимости от различных оптимизаторов обучения и активационных функций в нейронных слоях и представлен результат этого анализа. Получены оптимальные параметры для рекуррентной нейронной сети и долгой краткосрочной памяти моделей, которые давали максимальные значения коэффициента детерминации

Ключевые слова: рекуррентная нейронная сеть, долгая краткосрочная память, прогнозирование, временной ряд, коэффициент детерминации

Введение

Бурное развитие машинного обучения связано с широким спектром областей применения в различных сферах человеческой деятельности, таких как автоматика, управление, экономика, социология, медицина, геология, астрономия, ядерная физика и т.д. Сами методы машинного обучения подразумевают способы обработки и анализа данных, что позволяет решать следующие задачи:

- задачи регрессии;
- задачи классификации и кластеризации;
- задачи уменьшения размерности;
- задачи выявления аномалий.

В данной работе продемонстрировано решение задачи регрессии на основе данных по почасовому потреблению электроэнергии. Они были получены с веб-сайта PJM Interconnection LLC (региональная передающая организация в США) и указаны в мегаваттах (МВт).

1. Постановка задачи

Необходимо построить модель искусственной нейронной сети (ИНС), которая при подаче определённой эталонной последовательности

на свой вход выдаст на выходе значение, максимально приближенное к следующему часу эталонного потребления электроэнергии. Для лучшей интерпретации эффективности модели было решено использовать коэффициент детерминации R^2 , который является разновидностью версии среднеквадратичной ошибки. Он представляет собой долю дисперсии ответа, которая захватывается моделью [1]. Формула для расчёта коэффициента детерминации R^2 представлена ниже.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2}, \quad (1)$$

где y_i – эталонное значение, \hat{y}_i – значение, предсказанное моделью, \bar{y} – среднее арифметическое эталонной последовательности.

Коэффициент детерминации R^2 ограничивается диапазоном от 0 до 1. Если $R^2 = 1$, то модель обучилась с наивысшей точностью, что соответствует среднеквадратичной ошибки равной 0. Но на реальных данных это может означать, что модель с большой долей вероятности была переобучена и не сможет показать такой же результат на других исходных данных.

Соответственно, для оценки точности разрабатываемых моделей необходимо, чтобы R^2 был максимально приближен к единице.

2. Предварительная обработка данных

После того как данные были загружены, оказалось, что имеющаяся выборка имеет 2 основных набора данных: дату со временем и значение в МВт. Было замечено, что время располагается не в нужном порядке, например, если рассматривать выборку, то можно заметить, что между 23 и 24 декабря 2005 года есть запись за 25 число, что приведено на рис. 1.

Datetime		
2005-12-24 13:00:00	9775.0	
2005-12-24 14:00:00	9303.0	
2005-12-24 15:00:00	9068.0	
2005-12-24 16:00:00	8931.0	
2005-12-24 17:00:00	9240.0	
2005-12-24 18:00:00	10312.0	
2005-12-24 19:00:00	10491.0	
2005-12-24 20:00:00	10444.0	
2005-12-24 21:00:00	10472.0	
2005-12-24 22:00:00	10448.0	
2005-12-24 23:00:00	10182.0	
2005-12-25 00:00:00	9722.0	
2005-12-23 01:00:00	11152.0	
2005-12-23 02:00:00	10842.0	
2005-12-23 03:00:00	10827.0	
2005-12-23 04:00:00	10897.0	
2005-12-23 05:00:00	11231.0	
2005-12-23 06:00:00	11884.0	
2005-12-23 07:00:00	12871.0	
2005-12-23 08:00:00	13393.0	
2005-12-23 09:00:00	13353.0	
2005-12-23 10:00:00	12762.0	
2005-12-23 11:00:00	12022.0	

Рис. 1. Пример необработанных данных

Следовательно, нужно отсортировать полученный набор и удостовериться, что нет пропущенных данных. После этого необходимо провести нормализацию значений. Для этого было выбрано стандартное масштабирование от 0 до 1. Далее необходимо разбить загруженные данные на выборки: обучающие наборы и тестовые. Первый из них будет содержать около 110000 значений (часов) для обучения, а второй 6,5 тысяч. На рис. 2 приведён пример 1000 значений (часов) на графике.

Предполагается, что в модель будет поступать определённое количество входных значений, а результатом её работы будет являться будущее значение, которое должно соответствовать следующему часу потребления электроэнергии. Для того чтобы проанализировать обучаемые модели, необходимо условиться, что размер входного набора данных будет состоять из 20 значений.

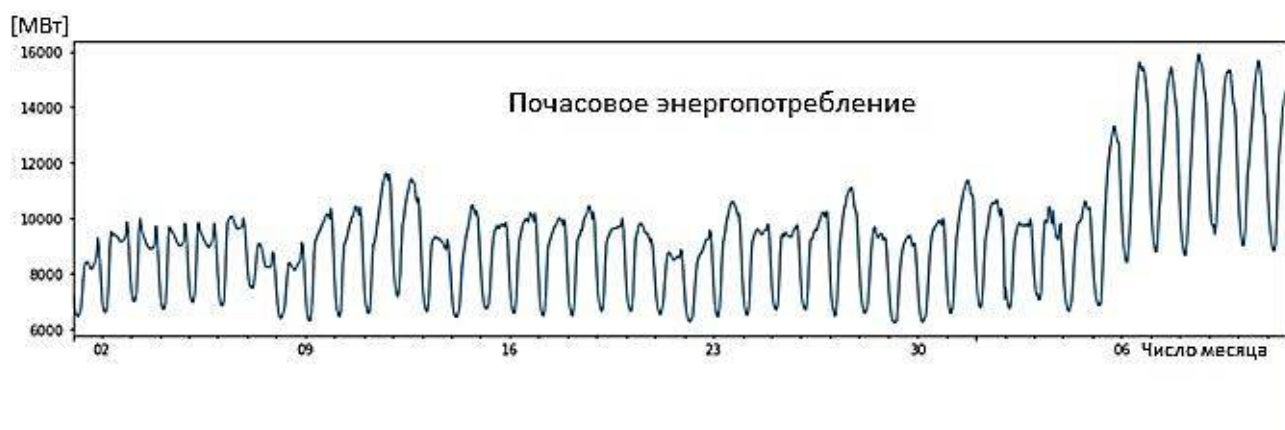


Рис. 2. Пример исходных данных

3. Обзор и выбор архитектуры моделей прогнозирования

В сфере прогнозирования временных рядов существует большое количество моделей, которые позволяют решать эту задачу, но в каждом конкретном случае требуется осуществить выбор наиболее подходящих, так как различные исходные данные требуют разных подходов к прогнозированию.

Существует много подходов, основанных как на нейронных сетях, так и на классических детерминированных алгоритмах.

Но из всего спектра базовых моделей были выбраны рекуррентные нейронные сети (RNN - Recurrent neural network) и модель с названием «Долгая краткосрочная память» (LSTM - Long short-term memory).

Рекуррентные нейронные сети одна из разновидностей ИНС (ввести термин), в которых линии соединения элементов сети создают

направленную последовательность [2]. Это дает возможность заниматься прогнозированием временных рядов или последовательных пространственных цепочек. За счет того, что RNN позволяют использовать свою внутреннюю память для обработки последовательностей данных любой длины, сети такого типа получают значительное преимущество перед многослойными перцептронами.

LSTM, в свою очередь, является частным случаем рекуррентных нейронных сетей. Если сравнивать типовые RNN- и LSTM-сети, последние имеют преимущество, так как они хорошо приспособлены для решения разнообразных задач прогнозирования серий событий во времени, задач классификации и обработки данных в ситуациях, когда данные исходного временного ряда имеют промежутки с неопределёнными границами и продолжительностью.

Меньшая восприимчивость к неоднородным временным пробелам даёт LSTM значительный выигрыш по отношению к скрытым марковским моделям, прочим типам RNN-сетей и другим подходам прогнозирования временных рядов в самых разных прикладных сферах [3].

После выбора конкретных моделей следующим шагом является настройка их архитектуры. Это не менее важная задача, так как от настройки полностью зависит последующее качество прогнозирования.

У моделей существует большое количество параметров, поэтому имеет смысл перечислить только самые важные.

В список основных параметров архитектур для нейронных сетей входят следующие пункты:

- активационная функция;
- оптимизатор;
- функция оценки результатов обучения;
- количество эпох.

В качестве активационной функции для обеих архитектур были выбраны следующие функции: tanh, sigmoid, relu.

При обучении сетей были использованы различные оптимизаторы: adam, rmsprop, sgd и adagrad.

Зачастую Adam дает более высокое качество обучения при малом количестве эпох, но SGD имеет меньшую ошибку прогнозирования при большом количестве эпох [4].

Для оценки качества работы модели в процессе обучения была использована среднеквадратичная ошибка (MSE), так как она является стандартной для подобного рода задач.

Количество эпох подбиралось экспериментально по результатам обучения. При этом избыточное количество эпох может привести к переобучению и, как следствие, к снижению обобщающей способности, а при недостаточном количестве эпох сеть может недообучиться и качество прогнозирования будет слишком низким.

Опуская промежуточные результаты исследования обеих моделей, можно заключить, что оптимальной архитектурой является трехслойная нейронная сеть, и обучение на десяти эпохах оказалось наиболее эффективным.

4. Анализ работы выбранных моделей

4.1. RNN

Для более полного исследования возможностей RNN-сетей было решено произвести обучение на различных активационных функциях и оптимизаторах. Остальные параметры обучения были статические, такие как количество эпох, функция потерь и т.д. В данном исследовании больше интересует проанализировать качество обучаемых моделей на различных оптимизаторах в зависимости от активационных функций. Результаты сведены в табл. 1.

Таблица 1
Обучение RNN-сети, используя различные оптимизаторы и активационные функции

	tanh	sigmoid	relu
adam	0.96083	-0.1329	0.9292
rmsprop	0.9511	0.7164	0.9083
sgd	0.8511	-0.1074	0.7604
adagrad	0.946	-0.1421	0.8448

Обучая рекуррентную нейронную сеть на десяти эпохах, используя оптимизатор SGD и relu активационную функцию, коэффициент детерминации R^2 составил 0.76. Пример предсказания в сравнении с исходными данными можно увидеть на рис. 3.

Отрицательное значение R^2 означает, что модели совсем не удалось обучиться и, соответственно, показать приемлемый результат.

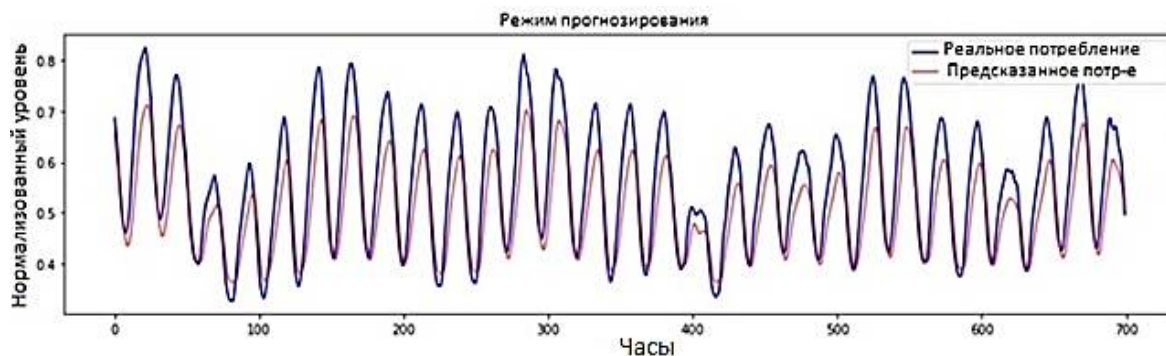


Рис. 3. RNN предсказания с оптимизатором SGD

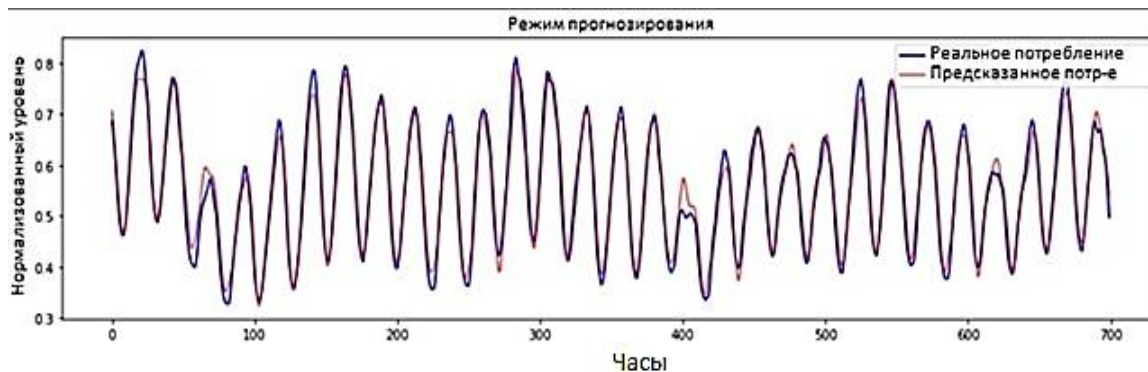


Рис. 4. RNN предсказания с оптимизатором Adam

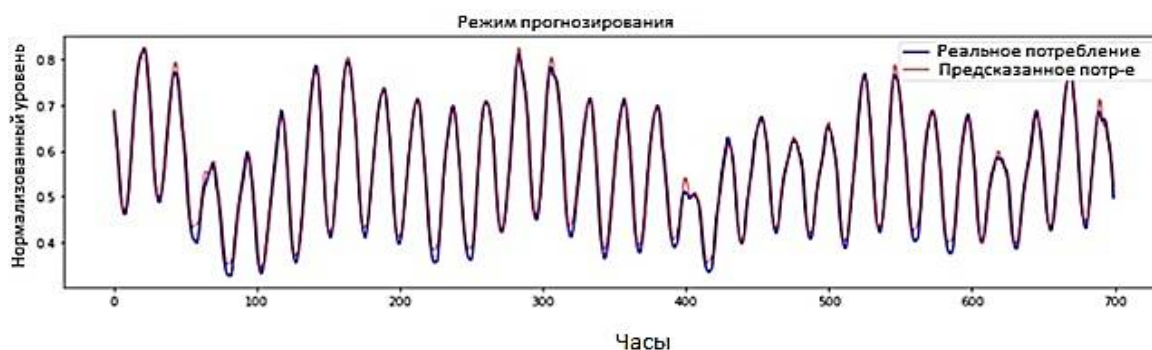


Рис. 5. LSTM предсказания с оптимизатором Adam

Но при обучении с оптимизатором Adam, и используя тангенциальную активационную функцию, результаты были лучше. $R^2 = 0.96$. Для сравнения результатов приведем график прогнозирования на рис. 4. Как можно заметить, второй вариант визуально намного ближе к эталонному графику.

4.2. LSTM

Были проведены аналогичные эксперименты с моделью LSTM. При использовании оптимизатора Adam (рис. 5) и тангенциальной активационной функции $R^2 = 0.97$. Эта комби-

нация параметров обучения дала лучший результат. Остальные результаты экспериментов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Обучение LSTM сети, используя различные оптимизаторы и активационные функции

	tanh	sigmoid	relu
adam	0.9737	-0.1269	0.9259
rmsprop	0.9521	0.6321	0.8316
sgd	0.1128	-0.1198	0.2566
adagrad	0.7923	-0.1439	0.9035

Заключение

В представленной работе проводилось исследование возможности предсказания почасового потребления электроэнергии на протяжении всего года на основе данных предыдущих лет.

Был проведён анализ качества предсказания двух типов нейронных сетей: RNN и LSTM. В каждой модели применялись различные активационные функции и оптимизаторы при обучении для поиска максимально эффективной их комбинации.

Лучшим показателем у RNN-сети было обучение с оптимизатором adam и тангенциальной активационной функцией с $R^2 = 0.9608$, а у LSTM-сети лучший результат дало применение тех же параметров и максимальное R^2 при этом составило 0.9737.

По результатам исследования можно сделать вывод, что для решения поставленной задачи максимально эффективным оказалось

применение LSTM-модели с оптимизатором Adam и тангенциальной активационной функцией.

Работу модели можно считать успешной, так как она обеспечивает $R^2 > 0.8$ на различных выборках после обучения.

Литература

1. Рашка С., Мирджалили В. Python и машинное обучение. 3-е изд. СПб.: ООО "Диалектика", 2020. С. 294–297
2. Miljanovic M. Comparative analysis of Recurrent and Finite Impulse Response Neural Networks in Time Series Predictions// Indian Journal of Computer Science and Engineering. 2012. Vol. 3. No. 1. pp. 180-191
3. Rue H., Held L. Gaussian Markov Random Fields. 1st ed. New York: Taylor & Francis Group, 2005. 280 p.
4. Быстро сходящиеся современные алгоритмы обучения нейронных сетей совсем не гарантируют достижения наилучшей обобщающей способности [Электронный ресурс]: Режим доступа: World Wide Web. URL: <http://neuropro.ru/memo346.shtml>

Поступила 15.04.2022; принята к публикации 10.06.2022

Информация об авторах

Подвальный Семён Леонидович – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

Лихотин Максим Андреевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: maximus-lihotin@mail.ru

Михайлузов Алексей Вячеславович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: swampdok@gmail.com

Донских Андрей Константинович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: ak_donskikh@mail.ru

USING RECURRENT NETWORKS TO PREDICT ELECTRICITY CONSUMPTION

S.L. Podval'ny, M.A. Likhotin, A.V. Mikhaylusov, A.K. Donskikh

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper demonstrates the possibility of predicting hourly electricity consumption according to the independent system operator of the PJM Interconnection LLC region using recurrent neural networks. We present a brief description of the coefficient of determination, which is a version of the root mean square error. We demonstrated the structure of the initial data, eliminated the erroneous order of the records and carried out normalization for the subsequent training of the models, and divided the entire set of available data into test and training samples. We briefly described the used architectures of recurrent neural networks: recurrent neural network (RNN) and long short-term memory (LSTM). We present the main parameters of architectures for neural networks, the values of one part of which are taken by default, as they were selected experimentally during the study, and the rest were selected to obtain the optimal model. We carried out a comparative analysis of the performance quality of the models depending on various learning optimizers and activation functions in neural layers, and presented the result of this analysis. We obtained optimal parameters for a recurrent neural network and long short-term memory of models, which gave the maximum values of the coefficient of determination

Key words: recurrent neural network, long short-term memory, prediction, time series, coefficient of determination

References

1. Raschka S., Mirjalili V. “Python and machine learning” (“Python i mashinnoe obuchenie”), St. Petersburg: Dialektika, 2020, pp. 294–297.
2. Miljanovic M. “Comparative analysis of recurrent and finite impulse response neural networks in time series predictions”, paper, *Indian Journal of Computer Science and Engineering*, Feb-Mar 2012, vol. 3, no. 1, pp. 180-191.
3. Rue H., Held L. “Gaussian markov random fields”, February 2005, 280 p.
4. “Rapidly converging modern learning algorithms for neural networks do not guarantee the achievement of the best generalizing ability”, available at: <http://neuropro.ru/memo346.shtml>.

Submitted 15.04.2022; revised 10.06.2022

Information about the authors

Semyen L. Podval'ny, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: spodvalny@yandex.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1260-4883>

Maksim A. Likhotin, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: maximus-lihotin@mail.ru

Aleksey V. Mikhailusov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: swampdok@gmail.com

Andrey K. Donskikh, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya, Voronezh 394006, Russia), e-mail: ak_donskikh@mail.ru

Радиотехника и связь

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.006

УДК 621.396.67

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МОДИФИЦИРОВАННЫХ МИКРОПОЛОСКОВЫХ ШЛЕЙФОВ, ЭКВИВАЛЕНТНЫХ ЧЕТВЕРТЬВОЛНОВЫМ ОТРЕЗКАМ

А.В. Останков¹, Н.Н. Щетинин², С.Ю. Дашян³

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²Воронежский институт ФСИИ России, г. Воронеж, Россия

³Университет Лилля, Вильнёв-д'Аск, Франция

Аннотация: классические четвертьволновые отрезки микрополосковых линий передачи на УВЧ характеризуются значительными габаритными размерами. Для их снижения отрезки заменяют модифицированными шлейфами, реализуемыми на основе типовых топологий. Целью работы является сравнение частотных характеристик и их показателей ряда топологий, используемых в модифицированных шлейфах, с одинаковыми волновыми сопротивлениями и подложками при условии работы на одной и той же частоте. С использованием электродинамического моделирования оптимизированы и исследованы частотные свойства микрополосковых модифицированных шлейфов на основе Т- и П-образных секций. Оптимизация заключалась в обеспечении 50-омного волнового сопротивления и минимума коэффициента отражения на рабочей частоте. Указано на особенности формирования Т- и П-образных секций шлейфов с целостными и встречно-штыревыми реализациями вертикальных частей. Приведены размеры оптимизированных модифицированных шлейфов. Представлены и сопоставлены амплитудно- и фазочастотные характеристики сформированных шлейфов. Подтверждено, что требования широкополосности и наибольшей минимизации размеров являются противоречивыми. Установлено, что оптимизированные шлейфы могут обладать длиной, на 23-42 % меньшей по сравнению с четвертьволновым отрезком. При этом относительная полоса пропускания шлейфа сужается до 30-90 %. Полученные результаты свидетельствуют о возможности использования подобных шлейфов для минимизации габаритов ряда микроволновых устройств и позволяют выполнять обоснованный выбор конкретной топологии

Ключевые слова: микрополосковый шлейф, топология, модификация, Т-секция, П-секция, минимизация, полоса пропускания

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

Введение

Микрополосковые устройства диапазона УВЧ, реализуемые на четвертьволновых отрезках, характеризуются значительными габаритными размерами [1-2]. Возникает необходимость модификации четвертьволновых отрезков в сторону уменьшения их габаритных параметров при сохранении их функциональности. На практике для этих целей используются разнообразные подходы, но весьма часто шлейфы реализуются на основе Т- и П-образных секций [3-4]. Благодаря использованию модифицированных шлейфных структур достигается существенное снижение площади, занимаемой микрополосковой топологией, однако полоса рабочих частот микрополоскового устройства при этом значительно уменьшается [1-2]. Сокращение полосы рабочих частот является своеобразной платой за уменьшение габаритных размеров топологии.

В научной литературе крайне мало информации, касаемой сопоставления на одних и тех же частотах для одних и тех же волновых сопротивлений и материалов подложек показателей частотных характеристик микрополосковых устройств, шлейфы которых реализованы на основе Т- и П-образных секций.

Цель настоящей работы заключается в сравнительном анализе частотных характеристик типовых топологий шлейфных микрополосковых устройств на основе Т- и П-образных секций и их ключевых показателей.

Методы исследования, частота и реализация топологий четвертьволновых шлейфов

Для сравнительного анализа модифицированных микрополосковых шлейфов взята частота 1 ГГц, а в качестве экранированного диэлектрического основания выбрана подложка FR-4 толщиной 1 мм с заявленной диэлектрической проницаемостью 4.37 и тангенсом угла потерь 0.022 [5].

Для исследования отобраны три типовые микрополосковые топологии на основе Т-образных секций: с классической и симметричной секциями, на основе встречно-штыревых конденсаторов, а также П-образная несимметричная топология. Заметим, что применение шлейфов на основе Т- и П-образных секций, эквивалентных четвертьволновым отрезкам, наиболее оправдано в случае, если внутреннее пространство топологии устройства, сформированного шлейфами, не используется, как, например, в шлейфных направленных ответвителях [4,6]. В связи с этим предполагается, что размер вертикальных частей секций также ограничен из соображений их использования в мостовых топологиях.

Электродинамическое моделирование и параметрическая оптимизация выполнены в ознакомительной версии системы автоматизированного проектирования Advanced Design System [7].

Геометрия каждого из выбранных топологий предварительно просчитывалась на основе известных аналитических и эмпирических соотношений, а затем дополнительно оптимизировалась. Ее размеры подбирались таким образом, чтобы при волновом сопротивлении 50 Ом шлейф характеризовался бы коэффициентом отражения на рабочей частоте не более «минус» 25 дБ.

Габаритные размеры оптимизированных модифицированных шлейфов сопоставлялись с классическим четвертьволновым отрезком, который на частоте 1 ГГц имеет длину 41.5 мм.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 представлена оптимизированная топология шлейфа, эквивалентного четвертьволновому отрезку и реализованного на основе классической Т-образной секции с вертикальной частью в виде целостного отрезка микрополосковой линии.

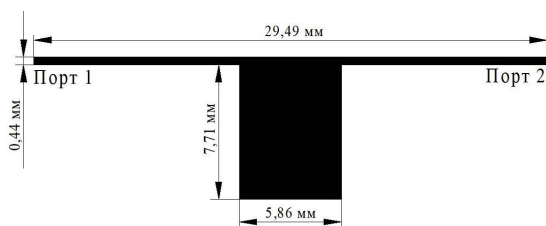


Рис. 1. Оптимизированная топология микрополоскового шлейфа на основе классической Т-образной секции

Результаты электродинамического моделирования свидетельствуют о том, что шлейф на

частоте 1 ГГц обладает волновым сопротивлением 50 Ом и набегом фазы сигнала между портами – «минус» 90° (рис. 2, а). Относительная полоса частот, определяемая по коэффициенту отражения и уровню «минус» 20 дБ, составляет 40 %. На рис. 2, б указанная полоса частот выделена в виде заштрихованного прямоугольника. На центральной частоте 1 ГГц полосы пропускания коэффициент отражения S_{11} микрополоскового шлейфа равен «минус» 36 дБ (рис. 2, б).

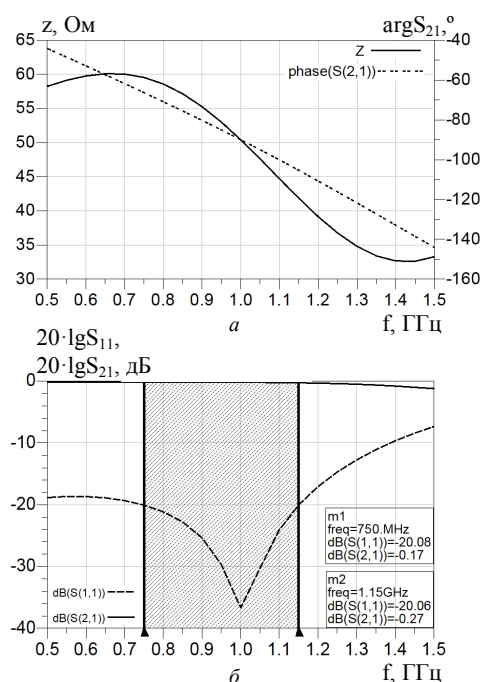


Рис. 2. Частотные характеристики шлейфа на основе классической Т-образной секции: а – волновое сопротивление, фазовый сдвиг; б – коэффициенты отражения и передачи

Таким образом, замена четвертьволнового отрезка шлейфом на основе классической Т-образной секции позволяет уменьшить длину шлейфа на 29 %, полоса пропускания при этом сужается до 40 %.

Сходными характеристиками и показателями обладает шлейфная микрополосковая конфигурация Т-образной формы, симметричная не только в горизонтальной, но и в вертикальной плоскости. Методика расчета геометрии симметричной Т-секции представлена в работе [8], в соответствии с которой рассчитываются требуемые значения емкости и индуктивности на центральной частоте, что затем даёт возможность выполнить переход к планарному исполнению на основе формул преобразования [9]. Итоговая геометрия устройства корректируется посредством оптимизации в САПР, что позволяет учитывать вклад разного

типа паразитных емкостей, имеющих в подобных структурах [10].

На рис. 3 показана оптимизированная топология такого шлейфа применительно к минимальному коэффициенту отражения на частоте 1 ГГц и волновому сопротивлению 50 Ом.

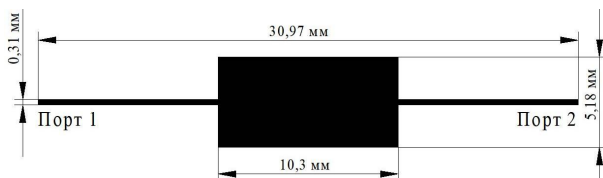


Рис. 3. Оптимизированная топология микрополоскового шлейфа на основе симметричной Т-образной секции

Рис. 4, а демонстрирует полученное на основе моделирования изменение в полосе частот 0.5-1.5 ГГц волнового сопротивления и фазочастотной характеристики коэффициента передачи. На частоте 1 ГГц данные величины близки к идеальным значениям. Относительная полоса частот по уровню 20 дБ коэффициента отражения достигает 39 % (рис. 4, б), что сопоставимо с частотными показателями классической топологии на рис. 1. Коэффициент отражения S_{11} на частоте 1 ГГц также равен «минус» 36 дБ.

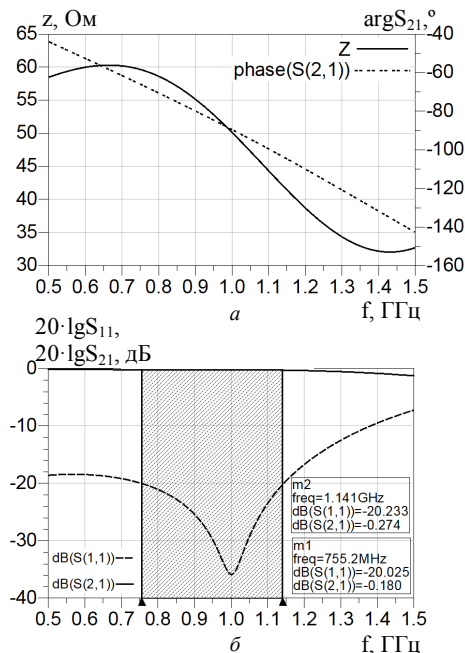


Рис. 4. Частотные характеристики шлейфа в виде симметричной Т-образной секции

Использование симметричной Т-секции для реализации 50-омного шлейфа позволяет снизить габаритный размер микрополоскового четвертьволнового отрезка на 25 %. При этом полоса пропускания составляет 39 %.

Особенностью шлейфа на основе Т-образной секции с представленной на рис. 5 топологией является реализация вертикальной части с помощью встречно-штыревого конденсатора [11,12].

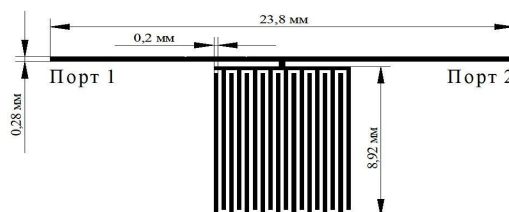


Рис. 5. Оптимизированная топология микрополоскового шлейфа на основе Т-секции с вертикальной частью в виде встречно-штыревого конденсатора

В [13] описывается методика проектирования встречно-штыревых структур на основе эмпирического выражения, предложенного в [14] и позволяющего рассчитать искомые размеры многосекционной штыревой топологии.

Изменение величины волнового сопротивления по частоте и фазовой характеристики коэффициента передачи оптимизированного шлейфа на основе Т-секции с вертикальной частью в виде встречно-штыревой структуры представлены на рис. 6, а. На рис. 6, б приведены амплитудно-частотные характеристики коэффициентов отражения S_{11} и передачи S_{21} .

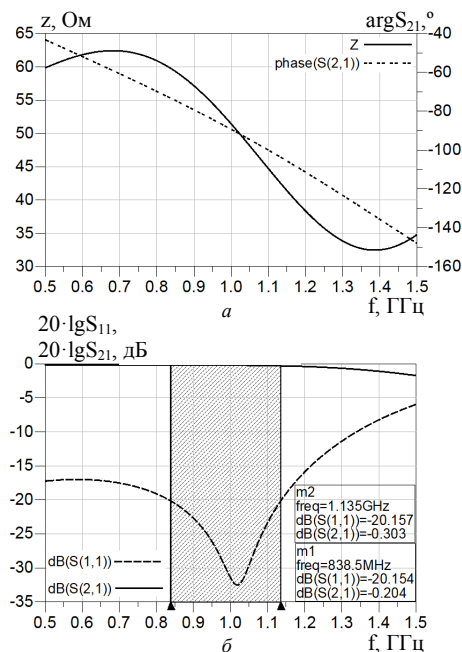


Рис. 6. Частотные характеристики шлейфа на основе Т-секции с вертикальной частью в виде встречно-штыревой структуры

Полоса рабочих частот шлейфа на основе Т-секции с вертикальной частью в виде встреч-

но-штыревого конденсатора, оцениваемая по уровню коэффициента отражения, равному «минус» 20 дБ, составляет около 30 % (рис. 6, б). Коэффициент отражения S_{11} на центральной частоте полосы пропускания 1 ГГц равен «минус» 31.5 дБ.

Оптимизированная Т-образная топология шлейфа с вертикальной частью в виде встречно-штыревой структуры, обладающая относительной полосой пропускания 30 %, обеспечивает меньший на 42 % габаритный размер по сравнению с четвертьволновым отрезком.

На рис. 7. изображена одна из разновидностей шлейфа на основе П-образной секции, оптимизированная для частоты 1 ГГц.

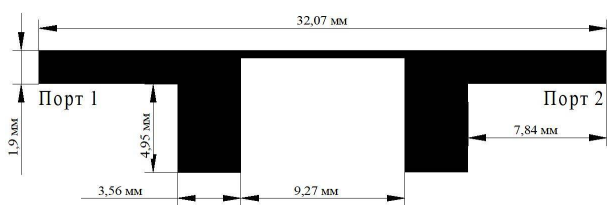


Рис. 7. Оптимизированная топология микрополоскового шлейфа на основе П-образной секции с двумя высокоомными отрезками

Следует отметить незначительное увеличение габаритных размеров оптимизированного шлейфа по сравнению с топологиями, показанными на рис. 1, 3. Кроме того, в некоторых случаях подобная конфигурация шлейфа может оказаться неприемлемой, так как не позволит использовать внутреннюю площадь, заключенную между четвертьволновыми отрезками микрополоскового мостового устройства.

Оптимизированная топология микрополоскового шлейфа на основе П-образной секции с двумя высокоомными отрезками представлена на рис. 8. Заметное расширение полосы рабочих частот по отношению к уже рассмотренным вариантам модифицированных шлейфов обусловлено лучшим согласованием (рис. 8, а). Относительная полоса частот по уровню 20 дБ коэффициента отражения достигает величины 90 % (рис. 8, б). Коэффициент отражения S_{11} на центральной частоте полосы пропускания 1 ГГц равен «минус» 41.5 дБ.

Применение при реализации шлейфа оптимизированной П-образной топологии с двумя высокоомными отрезками позволяет уменьшить габаритные размеры эквивалентного четвертьволнового отрезка на 23 %, при этом относительная полоса рабочих частот составляет 90 %.

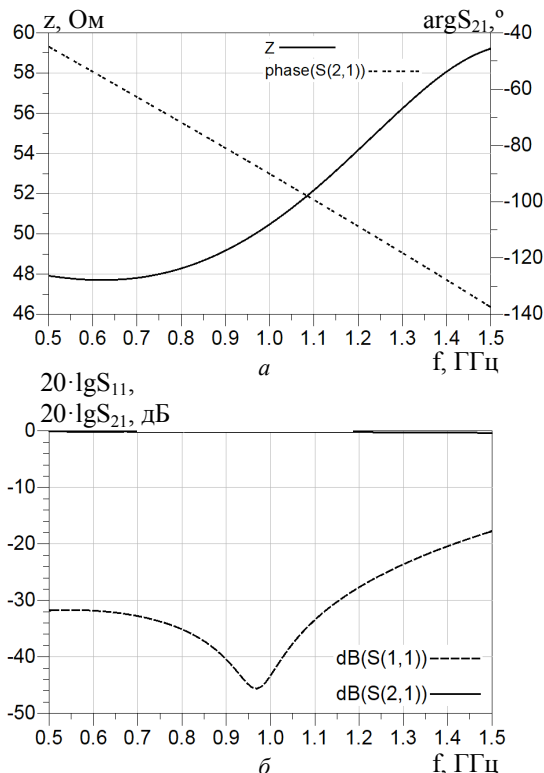


Рис. 8. Частотные характеристики шлейфа на основе П-образной секции с двумя высокоомными отрезками

Заключение

Выполнен сравнительный анализ частотных характеристик типовых топологий шлейфных микрополосковых устройств на основе Т- и П-образных секций и их ключевых показателей. Подтверждено, что оптимизированные по критерию минимума коэффициента отражения на рабочей частоте топологии на основе Т- и П-образных секций позволяют уменьшить длину шлейфов на 23-42 % по сравнению с четвертьволновым отрезком. При этом относительная полоса пропускания модифицированного шлейфа сужается до 30-90 %. Наибольшей полосой частот при сокращении габаритов на 23 % обладает шлейф на основе П-образной секции с двумя высокоомными отрезками. Показано, что подобная топология имеет конструктивные ограничения при реализации мостовых устройств. Наилучшими габаритами характеризуется Т-образная топология шлейфа с вертикальной частью в виде встречно-штыревой структуры (42 %) с относительной полосой пропускания в 30 %.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что рассмотренные шлейфные структуры могут быть использованы для минимизации ряда микроволновых устройств, реализуемых на базе четвертьволновых отрезков.

Литература

1. Методика структурного синтеза шлейфных мостов УВЧ диапазона с уменьшенными габаритными размерами: дис. ... канд. техн. наук: 05.12.07 / Летавин Д.А. Екатеринбург, 2021. 127 с.
2. Микрополосковые направленные ответвители с модифицированной топологией и диаграммообразующие схемы на их основе: диссертация ... канд. техн. наук: 05.12.07 / Щетинин Н.Н. Воронеж, 2019. 154 с.
3. Летавин Д.А. Миниатюрные конструкции микрополосковых мостовых устройств // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2. С. 917-921.
4. Останков А.В., Щетинин Н.Н. Микрополосковые направленные ответвители УВЧ и СВЧ диапазонов // Радиостроение. 2017. № 5. С. 1-37.
5. <https://www.rezonit.ru/upload/fr4/base/DE104.pdf> (дата обращения: 15.03.2022 г.).
6. Летавин Д.А. Миниатюризация квадратурных шлейфных направленных ответвителей // Журнал радиоэлектроники. 2021. № 2. С. 1-22.
7. ADS 2021 Product Release [Electronic resource] // <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html> (Accessed 10 March 2022).
8. Pozar D.M. Microwave Engineering. New Jersey: Wiley, 2004. 720 с.
9. Фуско В. СВЧ цепи. Анализ и автоматическое проектирование. М.: Радио и связь, 1990. 288 с.
10. Электродинамические модели резонансных гребенчатых структур для анализа и синтеза высокоэффективных дифракционных антенн: диссертация ... д-ра техн. наук / Останков А.В. Воронеж, 2011. 421 с.
11. A new design of a miniature filter on microstrip resonators with an interdigital structure of conductors / B.A. Belyaev, A.M. Serzhantov, Y.F. Bal'va [et al.] // Technical Physics Letters. 2015. Vol. 41. № 5. P. 504-507.
12. Модификация направленных ответвителей с малоразмерными шлейфами нестандартной конфигурации / А.В. Останков, В.Н. Кострова, Н.Н. Щетинин, К.А. Разинкин // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 6(12). С. 49-57.
13. Останков А.В., Щетинин Н.Н., Дашян С.Ю. Методика проектирования микрополосковых направленных ответвителей на встречно-штыревых структурах // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 4. С. 70-75.
14. Щетинин Н.Н., Останков А.В., Мельник В.А. Реализация планарного элемента топологии микрополоскового устройства по заданной емкости в схеме замещения // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXV Междунар. науч.-техн. конф. Воронеж, 2019. С. 50-55.

Поступила 25.04.2022; принята к публикации 15.06.2022

Информация об авторах

Останков Александр Витальевич – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: avostankov@mail.ru
Щетинин Никита Николаевич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры основ радиотехники и электроники, Воронежский институт ФСИН России (394072, г. Воронеж, ул. Иркутская 1-а), e-mail: nikita.shetinin@mail.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

FREQUENCY CHARACTERISTICS OF MODIFIED MICROSTRIP SUB LINES EQUIVALENT TO QUARTER-WAVE SEGMENTS

A.V. Ostankov¹, N.N. Shchetinin², S.Yu. Dachian³

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

² Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service, Voronezh, Russia

³University of Lille, Villeneuve-d'Ascq, France

Abstract: classical quarter-wave segments of UHF microstrip transmission lines are characterized by considerable overall dimensions. To reduce them, the segments are replaced with modified sub lines implemented on the basis of standard topologies. The aim of the work is to compare the frequency characteristics of a range of topologies used in modified sub lines with the same wave impedances and substrates, provided that they operate at the same frequency. Using electrodynamic modeling, we optimized and studied the frequency properties of modified microstrip stub lines based on T- and П-shaped sections. The optimization was to provide a 50-Ohm impedance and a minimum reflection coefficient at the operating frequency. We pointed out the features of the formation of T- and П-shaped sections of sub lines with integral and interdigital realizations of vertical parts. We give the dimensions of the optimized modified sub lines. We present and compare the amplitude and phase-frequency characteristics of the formed sub lines. We confirmed that the requirements of broadband and the greatest minimization of dimensions are contradictory. We established that optimized sub lines can have a length that is 23-42 % less than a quarter-wave segment. In this case, the relative bandwidth of the sub line narrows to 30-90 %. The results obtained indicate the possibility of using these sub lines to minimize the dimensions of a number of microwave devices and allows making a reasonable choice of a specific topology

Key words: microstrip sub line, topology, modification, T-section, П-section, minimization, bandwidth

Acknowledgments: the reported study was funded by RFBR and CNRS, project number 20-51-15001

References

1. Letavin D.A. "Method of structural synthesis of UHF stub bridges with reduced overall dimensions" ("Metodika strukturnogo sinteza shleifnykh mostov UVCh diapazona s umen'shennymi gabaritnymi razmerami"), Cand. of Tech. Sci. diss., 05.12.07, Ekaterinburg, 2021, 127 p.
2. Shchetinin N.N. "Microstrip directional couplers with modified topology and beam-forming circuits based on them" ("Mikropoloskovye napravlennye otvetviteli s modifitsirovannoi topologiei i diagrammoobrazuyushchie skhemy na ikh osnove"): Cand. Tech. of Sci. diss., 05.12.07, Voronezh, 2019, 154 p.
3. Letavin D.A. "Miniature constructions of microstrip couplers", *News of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk)*, 2016, vol. 18, no. 2, pp. 917-921.
4. Ostankov A.V., Shchetinin N.N. "UHF and SHF micro-strip directional couplers", *Radio Engineering (Radiostroenie)*, 2017, no. 5, pp. 1-37.
5. <https://www.rezonit.ru/upload/fr4/base/DE104.pdf> (data of access: 15.03.2022)
6. Letavin D.A. "Miniaturization of quadrature stub directional couplers", *Journal of Radio Electronics (Zhurnal radioelektroniki)*, 2021, no. 2, pp. 1-22.
7. "ADS 2021 Product Release", available at: <https://www.keysight.com/ru/ru/products/software/pathwave-design-software/pathwave-advanced-design-system.html> (date of access: 10.03.2022)
8. Pozar D.M. "Microwave Engineering", New Jersey: Wiley, 2004, 720 p.
9. Fusko V. "Microwave circuits. Analysis and automated design" ("SVCh tsepi. Analiz i avtomaticheskoe proektirovanie"), Moscow: Radio i svyaz', 1990, 288 p.
10. Ostankov A.V. "Electrodynamic models of resonant comb structures for the analysis and synthesis of high-performance diffractive antennas" ("Elektrodinamicheskie modeli rezonansnykh grebenchatykh struktur dlya analiza i sinteza vysokoeffektivnykh difraktsionnykh antenn"): Dr. of Tech. Sci. diss., 05.12.07, Voronezh, 2011, 421 p.
11. Belyaev B.A., Serzhantov A.M., Bal'va Y.F. et al. "A new design of a miniature filter on microstrip resonators with an interdigital structure of conductors", *Technical Physics Letters*, 2015, vol. 41, no 5, pp. 504-507.
12. Ostankov A.V., Kostrova V.N., Shchetinin N.N., Razinkin K.A. "Modifications of directional couplers with small-sized circuits of non-standard configuration", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2020, vol. 84, no. 6(12), pp. 49-57.
13. Ostankov A.V., Shchetinin N.N., Dachian S.Yu. "Methodology of designing micro-strip directional couplers on interdigitated structures", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 4, pp. 70-75.
14. Shchetinin N.N., Ostankov A.V., Mel'nik V.A. "Planar element implementation of a microstrip topology on spacificed capacity in the equivalent circuit", *Proc. of the XXV Int. Sci. and Tech. Conf.: Radio Location, Navigation, Communications (Radiolokatsiya, Navigatsiya, Svyaz')*, 2019, pp. 50-55.

Submitted 25.04.2022; revised 15.06.2022

Information about the authors

Aleksandr V. Ostankov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: avostankov@mail.ru
Nikita N. Shchetinin, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh Institute of the Russian Federal Penitentiary Service (1a Irkutskaya str., Voronezh 394072, Russia), e-mail: nikita.shetinin@mail.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: sergeui.dachian@univ-lille1.fr

АКТИВНЫЙ ВОЛНОВОДНЫЙ ПОЛОСОВОЙ ФИЛЬТР НА ОСНОВЕ МЕТАМАТЕРИАЛА

Е.А. Ищенко¹, Ю.Г. Пастернак¹, В.А. Пендюрин², С.М. Фёдоров^{1,3},
И.А. Черноиваненко¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи»,
г. Воронеж, Россия

³Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается конструкция волновода типа WR75, в нее интегрирован активный метаматериал, который выступает в роли устройства, которое формирует волноводный полосовой фильтр с перестраиваемыми характеристиками. Благодаря возможности коммутации в слоях активного метаматериала становится возможным формирование прозрачного режима работы, который позволяет пропускать электромагнитные волны с сохранением основных показателей для прямоугольного волновода, при этом при выполнении коммутаций в слоях метаматериала с использованием рип-диодов возникает структура, которая формирует один из двух полосовых волноводных фильтров – с диапазоном рабочих частот от 10 до 11 ГГц или от 11 до 12 ГГц. Причем благодаря высоким качественным характеристикам активного метаматериала удается достичь малых потерь в диапазонах работы фильтра, высокой изоляции и подавления вне рабочего диапазона электромагнитных волн. Благодаря возможности масштабируемости метаматериала возможно формирование подобной конструкции и для других диапазонов рабочих частот. Предложенная конструкция активного волноводного полосового фильтра позволяет объединить в одной конструкции несколько СВЧ-устройств, что положительно сказывается на оптимизации пространства, которое занимают СВЧ-устройства, а также снизить потери для протекающих электромагнитных волн

Ключевые слова: волноводный фильтр, метаматериал, реконфигурируемый волновод

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-57.2020.9

Введение

Волноводные фильтры позволяют осуществить селекцию электромагнитных волн в процессе протекания через структуру. Волноводные фильтры позволяют выделить и пропустить на выход практически без потерь как диапазон частот в определенной полосе (ПФ), так и область частот ниже определенного уровня среза (ФНЧ).

Пример конструкции фильтра нижних частот на основе прямоугольного волновода приводится в [1]. В конструкции такого фильтра благодаря сформированной внутри волноводного канала системе из перегородок происходит блокировка прохождения электромагнитных волн выше определенной частоты, а снизу рабочий диапазон при этом будет ограничен лишь частотой среза фильтра. Благодаря такой конструкции удается выделить требуемый диапазон частот, что повышает качество приема и обработки сигналов.

Примеры конструкций же наиболее популярных – полосовых фильтров приводятся в [2–4]. Полосовые волноводные фильтры позволяют выделить определенный диапазон рабочих частот, что позволяет повысить согласование электромагнитных волн в антеннах, при этом такие фильтры могут быть сформированы как для микрополосковых структур [2], так и для SIW прямоугольных волноводов [3]. Наиболее же частыми является формирование фильтрующих структур в прямоугольных волноводах [4]. Именно такие полосовые фильтры могут быть построены на основе активного метаматериала. Благодаря применению такого метаматериала возможно обеспечить прохождение электромагнитных волн как с фильтрацией, так и без нее. Именно анализу такой конструкции и посвящена данная работа.

Конструкция волновода с активным полосовым фильтром

Для формирования конструкции активного волноводного фильтра был выбран прямоугольный волновод WR75, который имеет сечение 19.05x9.525 мм. Частота среза для такого

волновода составляет 7.869 ГГц, а рекомендуемый диапазон рабочих частот 10-15 ГГц. На основании этого волновода предлагается сформировать конструкцию, которая обладает тремя режимами работы: прозрачный, когда стенки фильтра не формируются и характеристики структуры максимально приближены к волноводу; режим полосового фильтра на частоту 10-11 ГГц, в таком режиме производится коммутация тех ячеек, которые отвечают за эту часть фильтра; режим полосового фильтра 11-12 ГГц. Таким образом, в единой конструкции удастся соединить три режима работы благодаря использованию активного метаматериала, так полученная конструкция приводится на рис. 1.

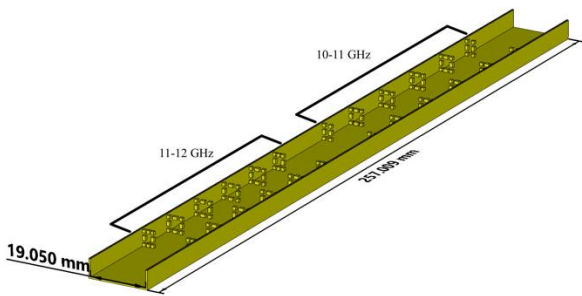


Рис. 1. Волновод с активным фильтром на основе метаматериала, выделены блоки, отвечающие за формирование фильтров (длина ячейки метаматериала 1.5 мм (1/16 длины волны для 12.5 ГГц))

Для коммутации ячеек метаматериала применялись модели рin-диодов, которые в активном режиме заменялись SPICE моделями, а в разомкнутом режиме заменялись эквивалентными схемами.

На основании полученной конструкции возможно провести электродинамическое моделирование, которое позволит определить режимы работы устройства.

Моделирование режимов работы устройства

Рассмотрим результаты электродинамического моделирования для предложенной конструкции на основе графиков возвратных потерь (S_{11}) и коэффициентов передачи (S_{21}). Полученные графики приводятся на рис. 2.

По полученным графикам видно, что удастся реализовать три режима работы устройства, которые обеспечивают как прохождение электромагнитных волн без потерь, так и выделение требуемого диапазона частот. Однако стоит отметить, что формирование третьей структуры фильтра для выделения третьего диапазона частот приводит к резкому увеличе-

нию потерь и отражений, что вызвано резонансами даже между структурами не коммутированного метаматериала, так как даже в выключенном режиме рin-диоды имеют не бесконечное сопротивление, а сопротивление порядка 70-100 кОм.

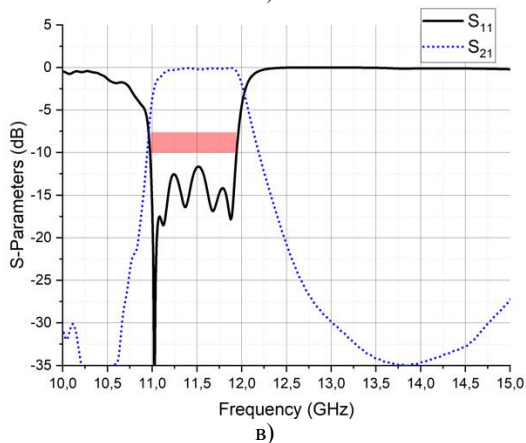
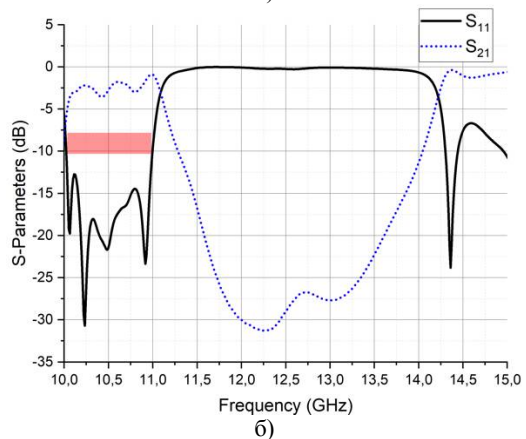
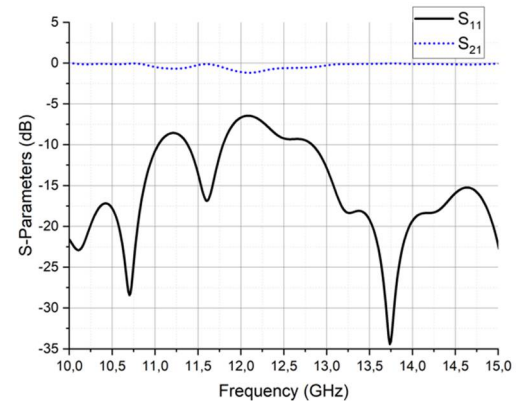


Рис. 2. Режимы работы разработанного устройства на основе активного метаматериала:
а) прозрачный режим (нет коммутаций);
б) коммутация одного фильтра на частоту 10-11 ГГц;
в) коммутация фильтра на 11-12 ГГц

Для анализа характеристик более подробно воспользуемся таблицей, причем диапазон

рабочих частот фильтра будем определять по уровню -3 дБ для S_{21} -параметров.

Полученные результаты отчетливо показывают высокие качественные характеристики разработанной конструкции фильтра, причем помимо малых потерь в диапазоне рабочих частот удается достичь высокого подавления не рабочего диапазона частот, так для ПФ изоляция составляет более 27 дБ на 1 ГГц.

Характеристики активного фильтра
во всех режимах

Режим	Диапазон частот ($S_{21}=-3$ дБ), ГГц	Вносимые потери в полосе пропускания (max), дБ	Возвратные потери (S_{11} max), дБ
Прозрачный	10-15	1.18	-6.9
ПФ 10-11 ГГц	10.1-11.1	2.5	-13
ПФ 11-12 ГГц	11.0-12.0	0.2	-12.5

Таким образом, полученные результаты показывают, что использование предложенной конструкции позволяет обеспечить формирование перестраиваемого волноводного полосового фильтра на основе метаматериала. Разработанная конструкция обеспечивает прохождение электромагнитных волн с малыми потерями в прозрачном режиме, когда нет коммутаций, а также высокое качество выделения полосы частот в режиме формирования полосового фильтра.

Поступила 09.03.2022; принята к публикации 16.06.2022

Информация об авторах

Ищенко Евгений Алексеевич – инженер, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Пастернак Юрий Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: pasternakug@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 (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Чернованенко Игорь Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

Заключение

Как показывает проведенное исследование, применение активного метаматериала позволяет значительно расширить функциональные возможности СВЧ-устройств. Полученные в процессе исследования результаты подтвердили, что разработанная конструкция перестраиваемого волноводного полосового фильтра на основе метаматериала позволяет реализовать три режима работы волновода, при этом сохраняются высокие качественные показатели.

Литература

1. Synthesis Approach for Compact Ku-Band Waveguide Lowpass Filters with Wide Rejection Bandwidth / M. Cetin, G. Boyacioglu, B. Alicioglu, N. Yildirim // 2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS). 2018. Pp. 221-224.
2. Vosough A., Brazález A.A., Kildal P.A. V-Band Inverted Microstrip Gap Waveguide End-Coupled Bandpass Filter // in IEEE Microwave and Wireless Components Letters. 2016. Vol. 26. No. 4. Pp. 261-263.
3. Güvenli K., Yenikaya S., Seçmen M. Design and Implementation of Substrate Integrated Waveguide Filter to Work on X-Band and Ku-Band // 2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS). 2018. Pp. 198-200.
4. A two-step synthesis of broadband ridged waveguide bandpass filters with improved performances / J.-C. Nanan, J.W. Tao, H. Baudrand, B. Theron, S. Vigneron // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. 1991. Vol. 2. Pp. 547-550.

ACTIVE RECTANGULAR WAVEGUIDE BANDPASS FILTER BASED ON THE METAMATERIAL

E.A. Ishchenko¹, Yu.G. Pasternak¹, V.A. Pendyurin², S.M. Fyedorov^{1,3},
I.A. Chernoiivanenko¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Research and Production Enterprise "Automated Communication Systems", Voronezh, Russia

³International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the paper considers the design of a waveguide of the WR75 type, in which an active metamaterial is integrated, which acts as a device that forms a waveguide bandpass filter with tunable characteristics. Due to the possibility of switching in the layers of the active metamaterial, it becomes possible to form a transparent mode of operation, which allows one to transmit electromagnetic waves while maintaining the main indicators for a rectangular waveguide, while switching in the salts of the metamaterial using pin diodes, a structure arises those forms one of two bandpass waveguide filters - with an operating frequency range of 10 to 11 GHz or 11 to 12 GHz. Moreover, due to the high-quality characteristics of the active metamaterial, it is possible to achieve low losses in the operating ranges of the filter, high isolation and suppression outside the operating range of electromagnetic waves. Due to the scalability of the metamaterial, it is possible to form a similar design for other operating frequency ranges. The proposed design of an active waveguide bandpass filter makes it possible to deplete several microwave devices in one design, which has a positive effect on optimizing the space occupied by microwave devices, as well as reducing losses for flowing electromagnetic waves

Key words: waveguide filter, metamaterial, reconfigurable waveguide

Acknowledgments: this research was funded by the grant of the President of the Russian Federation for Young Scientists, the grant no. MK-57.2020.9

References

1. Cetin M., Boyacioglu G., Alicioglu B., Yildirim N. "Synthesis approach for compact Ku-band waveguide lowpass filters with wide rejection bandwidth", *2018 18th Mediterranean Microwave Symposium (MMS)*, 2018, pp. 221-224.
2. Vosough A., Brazález A. A., Kildal P. "A V-band inverted microstrip gap waveguide end-coupled bandpass filter", *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, vol. 26, no. 4, pp. 261-263.
3. Güvenli K., Yenikaya S., Seçmen M. "Design and implementation of substrate integrated waveguide filter to work on X-band and Ku-band", *2018 9th International Conference on Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals (UWBUSIS)*, 2018, pp. 198-200.
4. Nanan J.-C., Tao J.W., Baudrand H., Theron B., Vigneron S. "A two-step synthesis of broadband ridged waveguide bandpass filters with improved performances", *1991 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 1991, vol. 2, pp. 547-550.

Submitted 09.03.2022; revised 16.06.2022

Information about the authors

Evgeniy A. Ishchenko, engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

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-Streletskaaya 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), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 39026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Igor' A. Chernoiivanenko, student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: chernoivanenko2000@mail.ru

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ УСТРОЙСТВ

А.С. Костюков, С.А. Проценко, Г.И. Мурачёв, А.В. Бугаев, А.А. Затонский

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: для конструирования радиоэлектронных устройств (РЭУ) одной из главнейших задач в процессе их проектирования является определение критической тепловой нагрузки. На основе данных, полученных при анализе тепловых воздействий, будет происходить подбор наиболее актуального и экономически выгодного материала для будущего устройства и его конструкции. Также ещё на стадии проектирования устройства можно выявить уязвимые места, что позволяет сэкономить как финансовые, так и временные ресурсы. Для реализации поставленной выше цели используются различные специализированные программные комплексы. К таким программным продуктам можно отнести Creo, SolidWorks, T-FLEX, АСОНИКА и Nastran. В данной статье речь пойдет о перечисленных ПО, а именно об их основных параметрах и функционале, их достоинствах и недостатках. Представленные программные комплексы сравниваются по способу проведения теплового анализа на конструкции РЭУ. Для этих целей был проведён сравнительный эксперимент, тепловой анализ печатной платы, благодаря которому были выявлены особенности каждого из перечисленных ПО и их конструктивные отличия. Все результаты проведенного эксперимента занесены в таблицу для сравнения.

Ключевые слова: Creo, SolidWorks, АСОНИКА, T-FLEX, Nastran, конечно-элементная сетка, тепловой анализ

Введение

Неисправности РЭУ чаще всего связаны с тепловыми нагрузками, примером данных дефектов может служить перегрев элементов платы или же отдельных участков конструкции, также критическим параметром может выступать время, которое необходимо для достижения контрольной температуры. Для того чтобы избежать этого, необходимо проводить анализ тепловых режимов РЭУ.

Анализ тепловых режимов – это определение температурных полей во всех точках изучаемого пространства, подробнее об этом можно узнать из [1].

Для исследований температурных полей на РЭУ обычно используют различное специализированное ПО. Лидерами рынка данной сферы являются Creo, SolidWorks, АСОНИКА, T-FLEX и Nastran.

Все перечисленные выше программные комплексы используют для моделирования различные математические методы [2], самым распространенным из которых является численный метод моделирования, он же метод конечных элементов. Представленный математический анализ использует в своей основе конечно-разностную трехмерную аппроксимацию и является одним из распространённых

вариантов решений дифференциальных уравнений с частными условиями. Более подробно о численном методе можно узнать из [3].

Далее рассмотрим каждый из перечисленных программных продуктов более подробно.

Creo

Одним из часто используемых программных продуктов для моделирования тепловых полей является программа PTC Creo, которую разработала фирма PTC, основываясь на продуктах для двухмерного и трехмерного проектирования, а конкретнее - на Pro/ENGINEER и CoCreate.

Пакет Creo состоит из ряда независимых друг от друга подпрограмм, к таковым относятся CreoParametric, CreoDirect, CreoView, CreoSimulate, CreoSketch и т.п. Основным программным модулем считается Creo Parametric.

Для проведения теплового анализа устройства существует специальная подпрограмма Creo Simulate, расчёт данных в которой основан на методе конечных элементов [4].

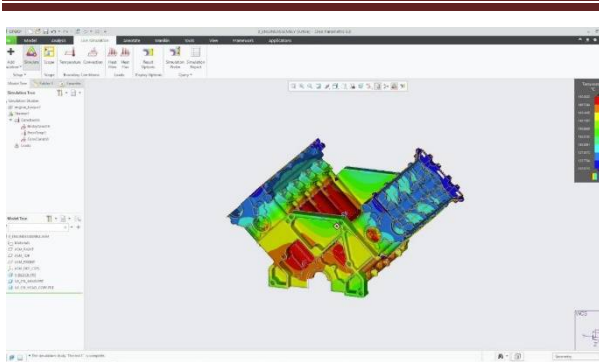


Рис. 1. Рабочее поле CreoSimulate

Для проведения анализа в представленном модуле необходимо указать путь распространения тепловой нагрузки внутри конструкции устройства. Для этих целей задаётся начальная температура и выбираются поверхности, по которым будет распространяться тепловая энергия [5].

SolidWorks

Продуктом компании SolidWorks Corporation является одноименное ПО SolidWorks, которое входит в число самых востребованных CAD-систем современности.

Для определения нагрузки температурных полей на устройство применяется подпрограмма SolidWorks Simulation, в которой моделирование строится на методе конечных точек [6].

SolidWorks имеет обычное стандартное меню, которое состоит из:

- раздела исследований;
- главного поля;
- инструментов [6].

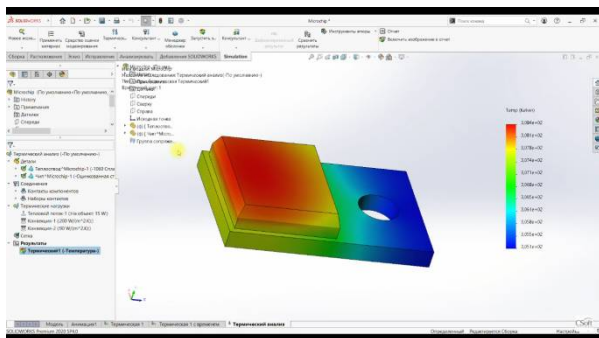


Рис. 2. Рабочее окно SolidWorks Simulate

В функционал подпрограммы Simulation включено взаимодействие со всеми составляющими устройства. Также на составляющие части моделируемого объекта могут влиять

разные факторы: граничные условия, заданные силы и перемещение тепла.

Тепловое моделирование в модуле Simulation происходит следующим образом: в панели инструментов выбирается материал анализируемого объекта. Все физические данные (плотность, теплопроводность и т.п.) уже внесены в базу программы и присвоены соответствующему материалу. Далее указывается начальная температура нагревателя (или мощность элемента, если происходит анализ компонента радиоэлектроники). После указываются сопротивление теплопроводности и коэффициент теплоотдачи для внешних граней. При проведении анализа сетка строится автоматически [7].

АСОНИКА

Компания НИИ «АСОНИКА» разработала проект АСОНИКА – программное обеспечение, которое включает в себя функции оптимизации конструкции и проверки РЭУ на влияние температурных полей. При создании ПС весь функционал подбирался в ориентации на разработчика РЭУ. В состав ПО входят 22 модуля подпрограмм, направленных на анализ механических, электрических, тепловых и т.п. параметров. Кроме того, встроена функция интеграции файлов различных форматов из других CAD и CAE систем [8].

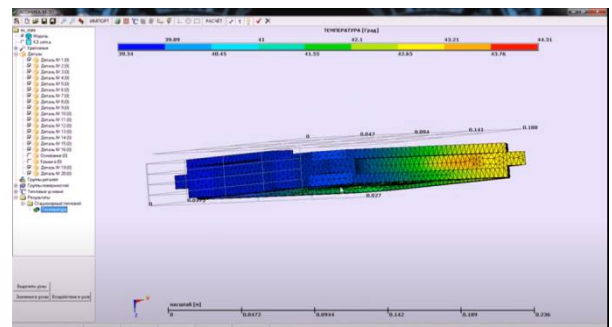


Рис. 3. Рабочее окно АСОНИКА

Если взять для сравнения такие программы, как ANSYS, NASTRAN, COMSOL, то функциональный спектр этих программ выполняет только часть того, что может система АСОНИКА [9].

Измерение тепловых характеристик происходит в программном модуле АСОНИКА-Т. Тепловой анализ в данном пакете происходит следующим образом: для начала выбирается алгоритм разбиения сетки. Данный алгоритм зависит от геометрических особенностей объ-

екта. Далее происходит генерация сетки, в панели инструментов указывается только теплопроводность. После указываются тепловые ограничения для внешней группы поверхностей, а также тепловые условия и способ передачи тепловой энергии. Далее выбирается источник тепла (он же источник мощности) и происходит моделирование температурных напряжений [10].

T-FLEX

Профессиональное ПО, которое включает в себя функции 2D и 3D-моделирования с возможностью построения и оформления конструкторской документации по стандартам ЕСКД.

В состав комплекса программы входят такие модули, как T-FLEX CAD/CAM/CAE/CAPP/PDM/CRM.

Для температурного анализа устройства существует своя подпрограмма, ориентированная на исследование поведения источника тепла в изделии. Тепловые характеристики могут применяться для определения влияния на температурное поле прибора, а также для выявления дефектов, вызванных этим фактором [11].

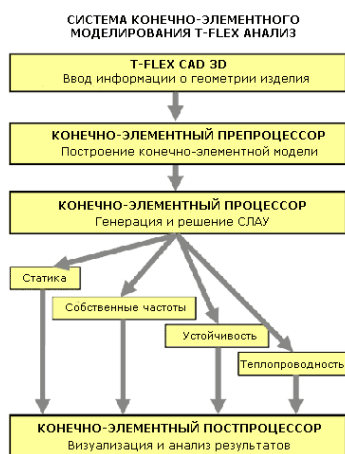


Рис. 4. Схема анализа теплового поля

Тепловой анализ происходит следующим образом: для начала выбирается геометрия разбиения сетки, а также её размерность. Далее происходит генерация сетки. После выбираются способ распространения тепла, а также мощность и участок начального нагрева. При анализе учитываются конвекция и материал объекта [11].

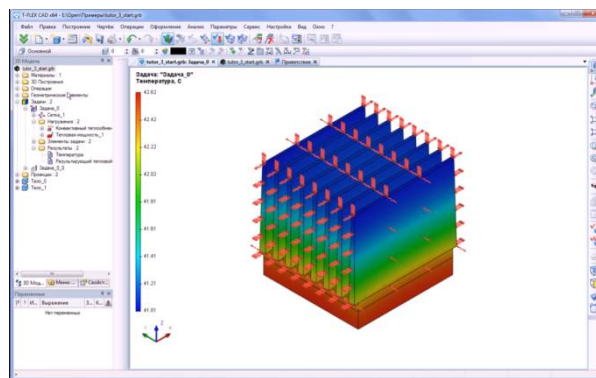


Рис. 5. Рабочее окно T-FLEX

Nastran

Данное ПО было разработано компанией SimensPLM Software. Программа Nastran, как и другие ПС, основана на механике МКЭ, что позволяет производить моделирование динамических и статических процессов. Диапазон применения данного программного средства довольно обширный, начиная от машиностроения и заканчивая аэрокосмическими разработками.

Как и другие программы, Nastran состоит из модулей – подпрограмм, каждая из которых направлена на отдельный вид моделирования и анализа, и кроме того есть возможность интеграции моделей из других ПО.

Тепловой анализ в модуле Nastran происходит следующим образом: для начала в панели инструментов указывается теплопроводность. Далее задаются тепловые ограничения для внешней группы поверхностей, а также тепловые условия и способ передачи тепловой энергии. После выбирается источник тепла (он же источник мощности). Далее подбирается алгоритм разбиения сетки, данный алгоритм зависит от геометрических особенностей объекта. После происходят генерация сетки и моделирование температурных напряжений [12].

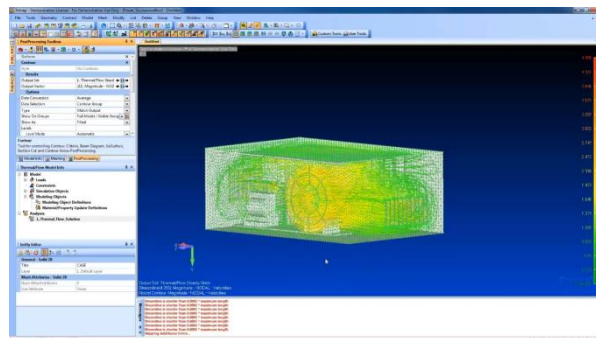


Рис. 6. Рабочее окно Nastran

Сравнение программных сред

Первое, на что обращается внимание при работе с ПС, это наличие русскоязычного интерфейса в программе, во всех вышеперечисленных программах присутствует русификатор, и поэтому сложности в работе не возникают.

Механика построения моделей в анализируемых программах схожа и основана на методе конечных элементов.

Принцип действия МКЭ основан на одинаковых функциях: выбор детали, её фиксация на определенной точке, нагрузка на деталь, и т.п. Но МКЭ у разных ПО по-разному себя ведет, и поэтому большую часть программ можно разделить по удобству применения. Кроме того, в рассматриваемых программных продуктах можно производить исследование как отдельных элементов устройства, так и всей конструкции в целом. Также все перечисленные ПО могут импортировать файлы из других систем САД, а значит, поддерживают большое количество форматов файлов.

Ещё один фактор, который является важным для конструкторов, это наличие в ПС соответствующих систем измерения. Кроме того, иногда для исследований могут понадобиться нестандартные системы, к примеру, сантиметр-грамм-секунда (СГС), миллиметр-грамм-секунда (ммГС), дюйм-фунт-секунда (ДФС) и др. Для этих целей в программных комплексах Creo и АСОНИКА есть возможность создавать пользовательские системы измерения с необходимыми для конструктора величинами.

Основная задача при моделировании температурных нагрузок на устройстве – анализ распространения тепловых потоков в зависимости от типа корпуса, способа охлаждения, а также влияния атмосферного давления и гравитации.

Доказательством того, что анализ был выполнен верно, служат построенные гамма-поля на 3D-модели устройства при просмотре полученных результатов.

Исходя из анализа ПС (Creo, SolidWorks, АСОНИКА, T-FLEX и Nastran), был проведён собственный тепловой анализ платы управления в рассматриваемых выше комплексах.

Для проведения собственного исследования было принято решение проанализировать плату управления, в которой основными греющимися элементами являются конденсаторы типа ЖСК1. Сначала для всех программ необходимо задать одинаковые начальные условия,

а именно температуру конденсаторов 65°C , что также является максимальной температурой платы. Мощность теплопередачи 200 мВт, температура окружающей среды 25°C , передачей тепла путём конвекции можно пренебречь.

В CreoSimulate первым шагом, как и в других программах, является присвоение каждому элементу своего материала. Вообще свойство материала играет немаловажную роль в моделировании тепловых процессов, так как каждому материалу присвоены свои характеристики: теплопроводность, теплоемкость, нагревостойкость и т.д. Далее определяется наиболее вероятный источник тепла, и на него накладывается условие: температура наиболее нагретого элемента – 65°C (температура должна быть приближена к критической температуре готового устройства). Удельная теплопередача равна 200 мВт. Конвекцией можно пренебречь, так как естественная конвекция составляет 5-25 мВт, что очень незначительно. Также в ПО с автоматически строящейся сеткой необходимо установить размер сетки «стандарт» и отключить её видимость. Это необходимо сделать для равных условий сравнения. При симуляции можно видеть, как распространяется тепло относительно источников нагрева.

Результаты анализа предоставлены на рис. 7-11:

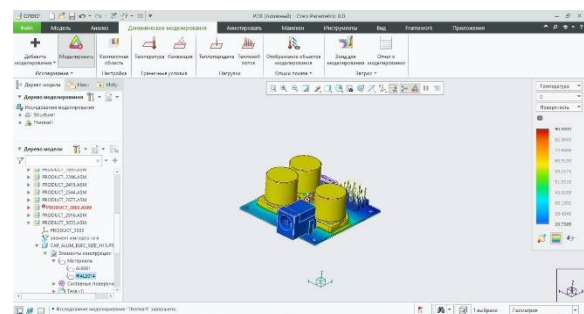


Рис. 7. Анализ печатной платы в ПО CreoSimulate

В T-Flex так же, как и в CreoSimulate, необходимо указать материал, после чего нужно выбрать единицу измерений температуры, в нашем случае это градусы Цельсия. После чего задаем необходимые параметры, и программа начинает моделировать процесс теплопередачи. Преимуществом данного ПО является наличие процесса постепенного нагревания, иными словами, можно наблюдать процесс изменения температуры от «включения» устройства до его пиковой температуры.

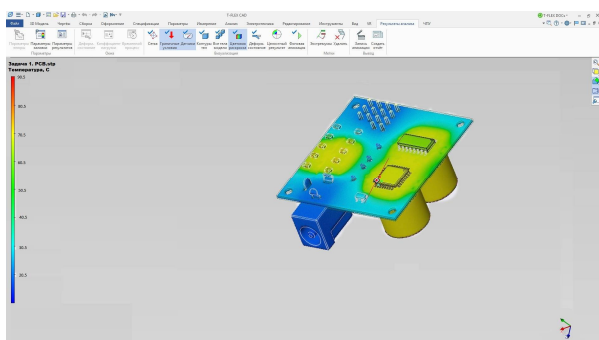


Рис. 8. Анализ печатной платы в ПО T-Flex

Далее сравним моделирование в программном обеспечении SolidWorks. Данная программа намного лучше остальных передаёт цветовую гамму распространения температурных полей, что говорит о лучшем анализе и о более точных подсчётах температуры.

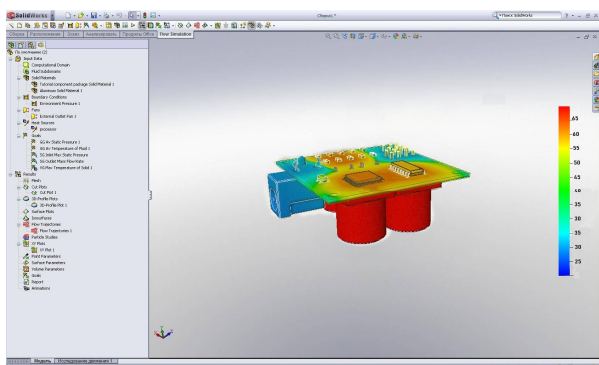


Рис. 9. Анализ печатной платы в ПО SolidWorks

При моделировании теплового процесса в ПО Nastran есть возможность настроить контраст, наличие сетки, шкалу (чтобы отображались значения, необходимые при анализе), так при моделировании необходимо приравнять показатели перечисленных функций к аналогичным параметрам, ранее рассмотренных программ для грамотного отображения результатов.

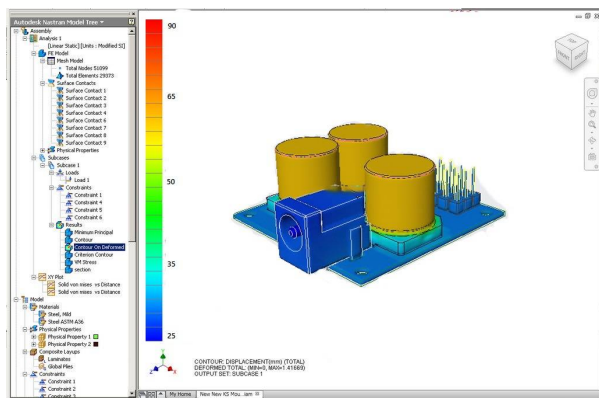


Рис. 10. Анализ печатной платы в ПО Nastran

Далее производим моделирование в программе АСОНИКА-Т. Все настройки, которые касаются модели, идентичны вышеперечисленным.

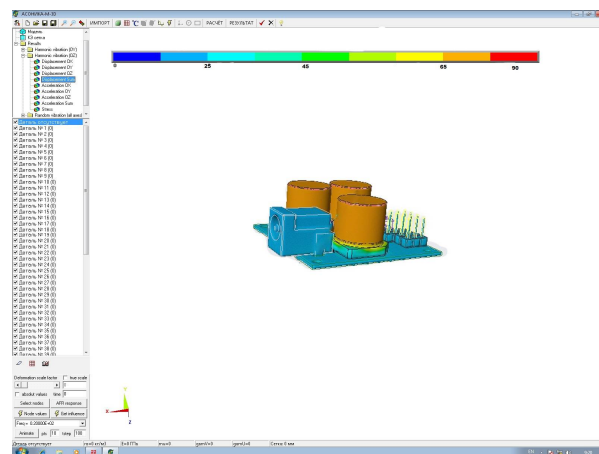


Рис. 11. Анализ печатной платы в ПО АСОНИКА-Т

Область применения АСОНИКА-Т - это конструкции такого типа, как микросборки, радиаторы и теплопроводящие основания, гибридно-интегральные модули, блоки этажерочной и кассетной конструкции, шкафы, стойки, а также нетиповые (произвольные) конструкции.

Программное средство нацелено на анализ всех видов тепловых полей, охлаждение которых происходит как естественной, так и вынужденной конвекцией воздушной среды.

При анализе идёт считывание температурных показателей со всех частей конструкции. Температурные показатели делятся на температуру выделенных объемов, дискретную и интегральную.

Кроме того, у всех программ присутствует функция диагностики, благодаря которой возможно увидеть недостатки сборки или детали, а именно места с большей возможностью к перегреву. Данная функция позволяет пресечь ошибку в проектировании ещё до момента её появления, т.е. на стадии разработки конструкции, и исправить её.

Последним критерием оценки является цена лицензии ПО.

Одной из самых дорогих систем проектирования является АСОНИКА, с ценой лицензии в 300 тыс. р. Данная стоимость основана на функционале ПС, а также нераспространенности ПО, по сравнению с другими программами.

Стоит иметь в виду, что данная сумма относится только к подпрограмме АСОНИКА-Т,

весь же комплекс, состоящий из 22 подпрограмм, стоит в разы выше.

К дешевым ПО относятся программы SolidWorks и T-FLEX, стоимость которых составляет около 150 тыс. р., за счёт чего данные ПС пользуются большой популярностью среди предприятий малого бизнеса.

Важно отметить, что при моделировании температурных полей Creo Simulate и SolidWorks автоматически устанавливают сетку.

В модуле Simulation программы SolidWorks возможно осуществлять работу над всеми компонентами (границы, ребра, углы и т.д.), что, конечно же, является огромным плюсом для анализа.

В программе T-FLEX при анализе теплопередачи можно настроить сторонние факторы: конвекцию, излучение и потери.

Во всех перечисленных ПО заложена библиотека материалов, т.е. при выборе того или иного материала автоматически выставляется теплопроводность, коэффициент теплоотдачи и др.

Подробный анализ сравнения всех ПО представлен ниже.

Сравнение программных продуктов Creo, SolidWorks, АСОНИКА, T-FLEX, Nastran

	Creo	SolidWorks	АСОНИКА	T-FLEX	Nastran
Стоимость лицензии (руб.)	912000	150000	300000	150000	2000000
Поддерживаемые системы единиц	СИ (МКС); ДФС; ДФ-МС; ммКС; ммНС; СГС; ФФС. Возможность создать собственную систему	СИ (МКС); СГС; ммГС; ДФС	СИ (МКС); ДФС; ДФ-МС; ммКС; ммНС; СГС; ФФС. Возможность создать собственную систему	СИ (МКС); ДФС; ДФ-МС; ммКС; ммНС; СГС; ФФС.	СИ (МКС); ДФС; ДФ-МС; ммКС; ммНС; СГС; ФФС.
Поддерживаемые форматы файлов	prt; asm; drw; frm; mfg; lay; sec; int; g; tmu; tmz; cem; bdl; pkg; sdp; sda; sdac; sdpc; igs; iges; vda; dxf; neu; ibl; pts; rwd; rwt; mrs; xdb; stp; step; cgm; stl; obj; wrl; dwgemn; sldprt; sldasm; 3dm; par; sla.	sat; ai; psd; dxf; dwg; hsf; emn; brd; bdf; idb; ifc; igs; iges; jpg; pdf; 3dm; stp; step; stl; tif; vda; mts; wrl; xml.	prt; asm; drw; frm; mfg; lay; sec; int; g; tmu; tmz; cem; bdl; pkg; sdp; sda; sdac; sdpc; igs; iges; vda; dxf; neu; ibl; pts; rwd; rwt; mrs; xdb; stp; step; cgm; stl; obj; wrl; dwg; emn; sldprt; sldasm; 3dm;	step; stp; 3dm; wmf; emf; dwg; dxf; dxb; bmf; stl; xmt; txt; iges; sldasm; sldprt; xmt; bin; asm; par; psm; ipt; iam; 3dm;	prt; asm; drw; frm; mfg; lay; sec; int; tmu; tmz; cem; bdl; pkg; sdp; sda; sdac; sdpc; vda; dxf; neu; ibl; pts; rwt; mrs; xdb; stp; step; cgm; stl; obj; wrl; dwgemn; sldprt; sldasm; 3dm; par; sla
Анализ теплового режима	+	+	+	+	+
Термическая нагрузка	+	+	+	+	+
Расчёт температурных полей	+	+	+	+	+
Анализ тепловых установившихся процессов	+	+	+	+	+
Анализ тепловых нестационарных процессов	+	+	+	+	+

Продолжение таблицы

Анализ теплопередачи	+	+	+	+	+
Автоматическое построение тепловых полей	+	+	+	+	+
Возможность преобразования теплового воздействия на конструкцию приборов в механическую нагрузку	+	-	+	-	-
Автоматическое построение сетки	Да	Да	Нет	Нет	Нет

На основании параметров, представленных в таблице, можно сделать определенные выводы.

К примеру, одним из самых востребованных программных средств является Сгео. Это связано с тем, что система Сгео содержит большое количество систем измерения, что позволяет выбрать необходимые для той или иной работы. Кроме того, в системе предусмотрена функция создания пользовательской системы измерения, что позволит использовать данное ПО инженеру для любого рода анализа. Это и является главной особенностью, отличающей данный продукт от других ПО.

Вторым пунктом, отличающим Сгео от конкурентных ПО, является возможность открыть файлы большинства других ПО, т.е. количество импортируемых форматов гораздо выше, чем у других, что видно из таблицы.

Следующей положительной стороной ПС Сгео является большая база исследований, т.е. необходимые для моделирования функции ПС возможно купить. Кроме того, в стандартную версию Сгео включены базовые библиотеки, благодаря чему Сгео является универсальным ПО для большинства видов анализа.

Однако к минусам Сгео можно отнести довольно высокую стоимость за базовую комплектацию. Дополнительный же комплект приходится покупать отдельно, из-за чего данный комплекс слабо востребован и пользуется спросом лишь у профессиональных инженеров или в НИИ.

Однако не для всех видов производства подойдет данное ПО. Так, для мелко- и среднесерийного производства применение Сгео нерационально в связи с малым количеством проводимых исследований. Для таких видов

предприятий больше подойдет более простое ПО - SolidWorks.

SolidWorks привлекает пользователей приемлемой ценой, а также студенческой версией для вузов и колледжей, которая распространяется бесплатно. Кроме того, SolidWorks имеет большое количество форматов, с которыми возможна работа. В сравнении SolidWorks превосходит Сгео по функционалу базового пакета ПО.

К негативным моментам SolidWorks можно отнести малую базу единиц измерений, но для основных видов анализа данной базы достаточно.

Независимо от минусов SolidWorks является одной из востребованной САПР на технических предприятиях.

ПК АСОНИКА - российская разработка от компании НИИ «АСОНИКА». Разработка программы проводилась на основе отечественных ГОСТов, благодаря чему получила аттестацию от Министерства обороны РФ, из-за чего основное применение данного ПО - оборонная промышленность, авиапромышленность и космическая отрасль. По большей части её используют в государственной компании Роскосмос по причине того, что ПО является отечественным продуктом, а Роскосмос - это закрытая государственная структура. Благодаря своей мощной математической базе программа АСОНИКА не уступает своим конкурентам и, кроме того, в ПК доступно большое количество разных исследований. Программный комплекс имеет модульную структуру, благодаря чему можно купить необходимую подпрограмму для определенного вида анализа.

Ещё одна российская разработка от компании «Топ Системы» - Т-Flex. Данный комплекс включил в себя функции 2D- и 3D- мо-

делирования с возможностью создания и оформления конструкторской документации и чертежей согласно стандарту ЕСКД. Система включена в Единый реестр российских программ. Данная программа получила большое распространение в основном в малом бизнесе по причине невысокой цены и обширного функционала как в построении, так и в анализе объектов. Также компания предоставляет льготы на приобретение для учебных заведений с факультетами САПР.

Ещё одним перспективным программным комплексом является продукт компании Siemens PLM Software – программа Nastran. Функционал данной программы нацелен на проектирование и моделирование роторных машин, благодаря чему успешно используется в приборостроении и машиностроении. Данная программа схожа с SolidWorks, так как свое основное распространение она получила в США и Великобритании у студентов в технических вузах, а также в небольших частных инженерных компаниях. В нашей же стране ПО не нашло применение, так как по функциональной части она схожа с АСОНИКА или Creo, но в плане стоимости превышает их в несколько раз.

Заключение

Проанализировав программные среды Creo, SolidWorks, АСОНИКА, T-Flex и Nastran можно сделать следующие выводы.

Во-первых, доступность той или иной программы. У некоторых из перечисленных в статье программных комплексов завышена цена, но ПК Creo, SolidWorks, T-Flex имеют бесплатную студенческую версию, и хотя она имеет меньше возможностей, в сравнении с полным пакетом, этого вполне достаточно для ознакомления и учебной практики.

Во-вторых, если выбирать из категории бюджетных программ, то к такой группе относятся ПО SolidWorks и T-Flex. Их цена одинакова и составляет около 150 тыс. рублей. Однако T-Flex на порядок лучше SolidWorks, это выражено в первую очередь его быстродействием, то есть и установка и все вычислительные процессы быстрее, чем у SolidWorks. Кроме того, функционал последней версии T-Flex намного шире, чем у SolidWorks. Таким образом, из бюджетных САПР выигрывает T-Flex.

В-третьих, программный комплекс Creo отличается высокой функциональностью, но в то же время довольно дорогой лицензией.

Хоть его цена и велика, но сложностей в приобретении до сих пор не было, и большинство предприятий используют данный комплекс, а продукт показал себя с лучшей стороны. Creo довольно давно на рынке САПР и зарекомендовала себя как в РФ, так и за границей. Данное ПО в предпочтении у крупных НИИ и подобных организаций, которые ведут профессиональные исследования и разработку сложных функциональных устройств.

В-четвертых, если брать программный комплекс из категории цена-качество, то можно выделить ПО АСОНИКА. К особенностям данного комплекса можно отнести тот факт, что купить программу можно не целиком, а модульно, к примеру, АСОНИКА-Т предназначена для моделирования температурных полей, а АСОНИКА-М - для моделирования механических процессов. Кроме того, данный комплекс не уступает другим программам по функционалу, напротив, в некоторых моментах даже превосходит, видимо, по этим причинам активными пользователями программы являются такие госкомпании, как «Роскосмос», и другие, сфера которых требует предельных точностей, измерений и расчётов.

В-пятых, программа Nastran по большей части используется в военной промышленности. Единственным отличием от вышеуказанных программ является цена. Она довольно завышена у данного комплекса, в связи с чем кроме как в военной промышленности РФ нигде не используется, однако за границей она входит в основной круг пользования крупных компаний.

Литература

1. Ртищева А.С. Методы моделирования тепловых энергетических процессов: лабораторный практикум. Ульяновск: УлГТУ, 2007. 53 с.
2. Муратов А.В., Ципина Н.В. Способы обеспечения тепловых режимов РЭС: учеб. пособие. Воронеж: ГОУВПО «Воронежский государственный технический университет», 2007. 96 с.
3. Дульнев Г.Н. Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре: учебник для вузов по специальности «Конструирование и производство радиоаппаратуры». М.: Высш. шк., 1984. 247 с.
4. Беккель Л.С., Сломинская Е.Н. Анализ возможностей CreoParametric // Инновационная наука. 2016. №9. С. 47 – 50.
5. Сравнение технологии формирования параметрических моделей механических конструкций в системах Creo и Компас: выпускная квалификационная работа бакалавр: 09.03.01 / Грачева Дарья Алексеевна; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина). СПб., 2017. 62 с.

6. Зиновьев Д. Основы моделирования в SolidWorks. М.: Vertex, 2017. 277 с.

7. Дударева Н.Ю., Загайко С.А. Самоучитель SolidWorks 2007. СПб.: Изд-во БХВ-Петербург, 2007. 1308 с.

8. Шамулов А.С. Преимущества автоматизированной системы обеспечения надежности и качества аппаратуры АСОНИКА перед зарубежными системами ANSYS, NASRAN, COSMOS, COMSOL и другими // Электроника и электротехника. 2018. №2. С. 40 – 45.

9. Шамулов А.С., Тихомиров М. Оценка надежности и качества РЭС // Электроника и электротехника. 2019. № 1. С. 44 – 51.

10. Шамулов А.С., Шамулов М.А. Опыт применения автоматизированной системы АСОНИКА в промышленности Российской Федерации: монография. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2017. 422 с.

11. T-Flex CAD. Двухмерное проектирование и черчение: руководство пользователя. М.: Топ системы, 2004. 678.

12. Рычков С.П., Мовчан Д.А. Моделирование конструкций в среде Femap with NX Nastran. М.: ДМК-Пресс, 2016. 784 с.

13. Бочков А.Л., Большаков В.П., Лячек Ю.Т. Тщательное моделирование деталей в CAD-системах: AutoCAD, Компас-3D, SolidWorks, Inventor, Creo: учеб.пособие. СПб.: Питер, 2014. 480 с.

14. Шамулов М.А., Шамулов А.С. Виртуальная среда проектирования РЭС на основе комплексного моделирования физических процессов. Владимир: Владимирский филиал РАНХиГС, 2016. 87 с.

15. Большаков В.П., Бочков А.Л., Сергеев А.А. 3D-моделирование в AutoCAD, КОМПАС-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex: Учебный курс. СПб.: Питер, 2011. 332 с.

Поступила 23.04.2022; принята к публикации 15.06.2022.

Информация об авторах

Костюков Александр Сергеевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

Проценко Сергей Алексеевич – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: sergo2023@bk.ru.

Мурачёв Григорий Игоревич – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: grigoriy.m99@mail.ru.

Бугаев Андрей Владимирович – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: andrei.bugayov@mail.ru.

Затонский Александр Александрович – бакалавр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kino2010kot@mail.ru.

COMPARATIVE ANALYSIS OF SOFTWARE PACKAGES FOR DETERMINING THERMAL CHARACTERISTICS OF RADIO-ELECTRONIC DEVICES

A.S. Kostyukov, S.A. Protsenko, G.I. Murachyev, A.V. Bugaev, A.A. Zatonkiy

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: for the design of radio electronic devices (RED), one of the main tasks in the process of their design is to determine the critical thermal load. Based on the data obtained from the analysis of thermal effects, the selection of the most relevant and cost-effective material for the future device and its design will take place. Also, at the design stage of the device, vulnerabilities can be identified, which saves both financial and time resources. To achieve the above goals, various specialized software systems are used. Such software products include Creo, SolidWorks, T-FLEX, ASONIKA and Nastran. This article will focus on the listed software, namely, their main parameters and functionality, their advantages and disadvantages. We compared the presented software systems according to the method of conducting thermal analysis on the design of the RED. For these purposes, we carried out a comparative experiment, a thermal analysis of the printed circuit board, thanks to which we revealed the features of each of the listed software and their design differences. All results of the experiment are listed in the table for comparison

Key words: Creo, SolidWorks, ASONIKA, T-FLEX, Nastran, finite element mesh, strength analysis

References

1. Rtishcheva A.S. “Methods for modeling heat and power processes” (“Metody modelirovaniya teploenergeticheskikh protsessov”), Ulyanovsk, 2007, 53 p.

2. Muratov A.V., Tzipina N.V. “Ways to ensure the thermal regimes of RES” (“Sposoby obespecheniya teplovykh rezhimov REC”), textbook, Voronezh State Technical University, 2007, 96 p.

3. Dul'nev G.N. "Heat and mass transfer in electronic equipment" ("Тепло- и массообмен в радиоэлектронной аппаратуре"), textbook, Moscow: Bysshaya shkola, 1984, 247 p.
4. Bekkel L.S., Slominskaya E.N. "CreoParametric capabilities analysis", *Innovative Science (Innovatsionnaya nauka)*, 2016, no. 9, pp. 47-50.
5. Gracheva D.A. "Comparison of the technology for the formation of parametric models of mechanical structures in the Creo and Compass systems" ("Sravnenie tekhnologii formirovaniya parametricheskikh modeley mekhanicheskikh konstruksiy v sistemakh Creo i Kompas"), final qualification work of a bachelor, 09.03.01, St. Petersburg State Electrotechnical University named after V.I. Ul'yanov (Lenin), 2017, 62 p.
6. Zinov'ev D. "Fundamentals of modeling in SolidWorks" ("Osnovy modelirovaniya v SolidWorks"), Moscow: Vertex, 2017, 277 p.
7. Dudareva N.Yu., Zagayko S.A. "Self-tutor SolidWorks 2007" ("Samouchitel' SolidWorks 2007"), St. Petersburg: BHV, 2007, 1308 p.
8. Shamulov A.S. "Advantages of the automated system for ensuring the reliability and quality of ASONIKA equipment over foreign systems ANSYS, NASRAN, COSMOS, COMSOL and others", *Electronics and Electrical Engineering (Elektronika i elektrotehnika)*, 2018, no. 2, pp. 40-45.
9. Shamulov A.S., Tikhomirov M. "Assessment of the reliability and quality of RES", *Electronics and Electrical Engineering (Elektronika i elektrotehnika)*, 2019, no. 1, pp. 44-51.
10. Shamulov A.S., Shamulov M.A. "Experience in the application of the ASONIKA automated system in the industry of the Russian Federation" ("Opyt primeneniya avtomatizirovannoy sistemy ASONIKA v promyshlennosti Rossiyskoy Federatsii"), monograph, Vladimir branch of the RANEPА, 2017, 422 p.
11. "T-Flex CAD. 2D Design and Drawing" ("T-Flex CAD. Dvukhmernoe proektirovanie i cherenie"), user's guide, Moscow: Top Systems, 2004, 678 p.
12. Rychkov S.P., Movchan D.A. "Structural modeling in Femap with NX Nastran" ("Modelirovanie konstruksiy v srede Femap with NX Nastran"), DMK-Press, 2016, 784 p.
13. Bochkov A.L., Bol'shakov V.P., Lyachek Yu.T. "Solid modeling of parts in CAD systems: AutoCAD, Compass-3D, SolidWorks, Inventor, Creo" ("Tverdotel'noe modelirovanie detaley v CAD-sistemakh: AutoCAD, Kompas-3D, SolidWorks, Inventor, Creo"), textbook, St. Petersburg: Piter, 2014, 480 p.
14. Shamulov M.A., Shamulov A.S. "Virtual environment for designing RES based on complex modeling of physical processes" ("Virtual'naya sreda proyektirovaniya RES na osnove kompleksnogo modelirovaniya fizicheskikh protsessov"), Vladimir branch of the RANEPА, 2016, 87 p.
15. Bol'shakov V.P., Bochkov A.L., Sergeev A.A. "3D modeling in AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex" ("3D-modelirovanie v AutoCAD, KOMPAS-3D, SolidWorks, Inventor, T-Flex"), textbook, St. Petersburg: Peter, 2011, 332p.

Submitted 23.04.2022; revised 15.06.2022

Information about the authors

Aleksandr S. Kostyukov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: stalkerklon@mail.ru, ORCID ID - <https://orcid.org/0000-0002-5711-9059>

Sergey A. Protsenko, bachelor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: sergo2023@bk.ru.

Grigoriy I. Murachyev, bachelor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: grigoriv.m99@mail.ru.

Andrey V. Bugaev, bachelor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: andrei.bugayov@mail.ru.

Aleksandr A. Zatonskiy, bachelor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kino2010kot@mail.ru.

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ ДЛЯ ОБНАРУЖЕНИЯ MIMO И ДЕКОДИРОВАНИЯ КАНАЛОВ

А.В. Башкиров, И.В. Свиридова, М.В. Хорошайлова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: предложен подход глубокого обучения для совместной задачи обнаружения MIMO и декодирования канала. Обычные приемники MIMO применяют подход на основе существующей модели для обнаружения MIMO и декодирования канала линейным или итеративным образом. Однако из-за сложной модели сигнала MIMO оптимальное решение проблемы совместного обнаружения MIMO и декодирования канала (то есть декодирование с максимальной вероятностью переданных кодовых слов из принятых сигналов MIMO) невозможно с вычислительной точки зрения. В качестве практической меры все современные приемники MIMO на основе стандартных моделей используют неоптимальные методы декодирования MIMO с доступной вычислительной сложностью. В этой работе применяются последние достижения в области глубокого обучения для проектирования приемников MIMO. В частности, используем глубокие нейронные сети (DNN) с контролируемым обучением для решения проблемы совместного обнаружения MIMO и декодирования каналов. DNN можно обучить для обеспечения гораздо лучшей производительности декодирования, чем это делает обычные приемники MIMO. Моделирование показывает, что реализация DNN, состоящая из семи скрытых слоев, может превзойти традиционные линейные или итерационные приемники на основе используемых моделей. Это улучшение производительности указывает на новое направление для будущей конструкции приемников MIMO.

Ключевые слова: глубокое обучение, нейронные сети, приемные устройства MIMO, декодирование канала

Введение

Технология с несколькими антеннами, также известная как MIMO (англ. Multiple Input Multiple Output, несколько входов и выходов), является одним из наиболее важных методов для передовых систем беспроводной связи. Она уже включена во многие стандарты беспроводной связи, например, 802.11n / ac [1] и LTE 4G [2]. Также было теоретически показано, что MIMO может увеличивать эффективность использования спектра линейно с количеством передающих и приемных антенн [3]. Большой интерес представляют функциональные блоки MIMO невысокой сложности с хорошей производительностью.

Передатчик MIMO передает несколько потоков данных, по одному на каждую передающую антенну. Приемник MIMO принимает мультиплексированную копию нескольких потоков данных плюс шум на каждой приемной антенне. Детектор MIMO демultiplexирует и декодирует мультиплексированные данные на всех приемных антеннах в первоначально переданные несколько потоков данных, плюс шум и помехи.

Для достижения производительности, близкой к пропускной способности, для си-

стем 5G были предложены совершенствованные схемы кодирования каналов, такие как LDPC и поляризованные коды [4], [5]. Эти коды каналов защищают потоки данных от замирания канала, помех и шума. Выходной сигнал MIMO-детектора состоит из зашумленной версии кодового слова, передаваемого передатчиком. Функция декодирования канала заключается в отображении кодового слова с шумом на исходные информационные биты в передатчике.

Для оптимального декодирования MIMO обнаружение и MIMO декодирование канала должны выполняться совместно. Все традиционные схемы декодирования MIMO используют подход, основанный на модели. Однако из-за сложной модели сигнала MIMO оптимальное решение проблемы совместного обнаружения MIMO и декодирования канала (то есть декодирование с максимальной вероятностью переданных кодовых слов из принятых сигналов MIMO) невозможно с вычислительной точки зрения.

Для ограничения разницы в производительности здесь используются последние достижения в области глубокого обучения при разработке приемных устройств MIMO. В частности, мы используем глубокие нейронные сети (DNN) с контролируемым обучением для решения проблемы совместного обнару-

жения MIMO и декодирования каналов. DNN можно обучить для обеспечения лучшей производительности декодирования, чем это делают обычные приемники MIMO. Моделирование показывает, что реализация DNN, состоящая из семи скрытых слоев, может превзойти традиционные линейные или итерационные модели приемных устройств.

Модель системы

Рассмотрим систему MIMO, в которой передатчик оснащен M_T антеннами, а приемник M_R антеннами. Предполагается, что канал между каждой приемопередающей антенной парой подвергается частотно-плоскому замиранию, и состояние канала остается постоянным в пределах одного передаваемого пакета. Предполагаем, что $M_T \leq M_R$ и M_T передаются параллельные потоки данных по одному на каждую передающую антенну.

На рис. 1 показана структурная схема передатчика MIMO. На стороне передатчика - вектор из L информационных битов, $b = [b_1, b_2, \dots, b_L]^T$ кодируется первым каналом в вектор кодового слова $c = [c_1, c_2, \dots, c_N]^T$ длины $N = K/R$, где R - кодовая скорость. Допустимый набор кодовых слов обозначается C и, следовательно, $c \in C$. Кодированные биты в векторе c модулируются в вектор комплексных симво-

лов данных, $\tilde{x} = [x_1, x_2, \dots, x_{N/B}]^T$, где B - количество кодовых битов на комплексный символ данных. Совокупность модуляции масштабируется так, чтобы модулированные символы в \tilde{x} имели удельную среднюю мощность. Посредством последовательного преобразования в параллельный вектор \tilde{x} делится на $L = N/(M_T)$ последовательных векторов данных длиной $M_T = \{x_1; x_2; \dots; x_L\}$, т.е. имеем

$$\tilde{x} = \begin{bmatrix} x_1^T \\ x_2^T \\ \dots \\ x_L^T \end{bmatrix}$$

На стороне приемника принятые сигналы записываются в матрицу $M_R \times (L'+L)$, $Y = [y_1, y_2, \dots, y_{L'+L}]$, где t -й вектор y_t содержит принятые сигналы на приемных антеннах M_R в t -м временном интервале. Матрицу принятого сигнала можно записать как

$$Y = \sqrt{\frac{1}{M_T}} HX + W \tag{1}$$

где H - это матрица комплексного канала $M_R \times M_T$ с комплексными гауссовыми элементами, не зависящими от нулевого среднего и σ^2 -дисперсии, а W - матрица аддитивного белого гауссова шума (AWGN) $M_R \times (L'+L)$, которая имеет нулевое среднее и единичную комплексно-гауссовские значения, не зависящие от дисперсии.

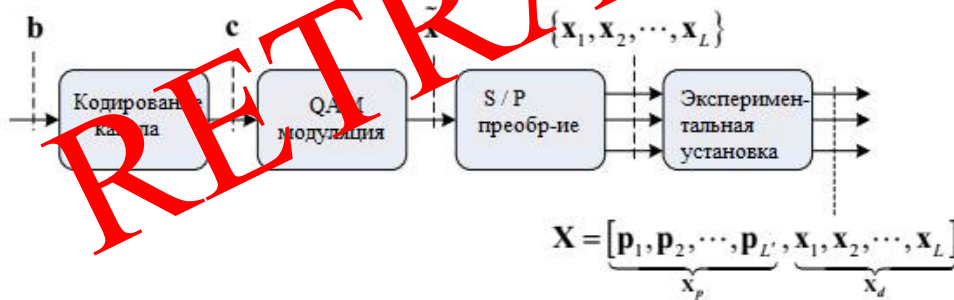


Рис. 1. Блок-схема передатчика MIMO

Линейный и итеративный приемники MIMO

Одним из подходов к неоптимальному обнаружению MIMO и декодированию канала состоит в том, чтобы сначала отменить параллельную помеху сигнала линейным обнаружением MIMO, а затем выполнить декодирование канала следующим образом. Называем этот подход линейными приемниками MIMO. Например, обнаружение нулевого форсирования (ZF) устраняет помехи путем

$$\tilde{Y}_d = \sqrt{M_T} (\hat{H} \hat{H}^H)^{-1} \hat{H}^H Y_d = X_d + \tilde{W}_d, \tag{2}$$

где \tilde{Y}_d это сигналы после отмены и $\tilde{W}_d = \sqrt{M_T} (H_d H_d^H)^{-1} W_d$ - это шум после отмены. На рис. 2 показана структурная схема этого линейного приемника MIMO.



Рис. 2. Блок-схема линейного MIMO-приемника

Неоптимальность в линейном декодировании MIMO возникает из-за того, что традиционный каналный декодер предполагает, что преобразованный шум \tilde{W}_d белый, но на самом деле это не так после преобразования в (2). Хотя сложность этого линейного приемника MIMO невелика, его производительность

далека от оптимальной.

На рис. 3 показана блок-схема итеративного приемника MIMO. Часто используемое мягкое обнаружение MIMO - это сферический алгоритм, а часто используемое мягкое декодирование канала - алгоритм распространения доверия (BP). Сложность итеративного приемника MIMO намного выше, чем у линейного приемника MIMO. Хотя итеративный приемник MIMO имеет лучшую производительность, чем линейный приемник MIMO, все еще существует большой разрыв в производительности по сравнению с оптимальным приемником MIMO. Кроме того, итеративный обмен информацией приводит к большим задержкам декодирования.



Рис. 3. Блок-схема итеративного MIMO-приемника

Приемники MIMO с глубоким обучением

Глубокие нейронные сети (DNN) используются для решения проблемы совместного обнаружения MIMO и декодирования каналов с целью повышения производительности. DNN обучаются в соответствии с методикой обучения с учителем.

Рассматриваем обучение DNN в приемнике MIMO после того, как оценка матрицы

канала уже вычислена из принятых пилот-сигналов. Используя эту оценку матрицы канала \hat{H} в приемнике MIMO, генерируем набор обучающих сигналов для обучения DNN для решения проблемы совместного обнаружения MIMO и декодирования канала в рамках контролируемого обучения. Структура обучения и развертывания DNN для MIMO показана на рис. 4.

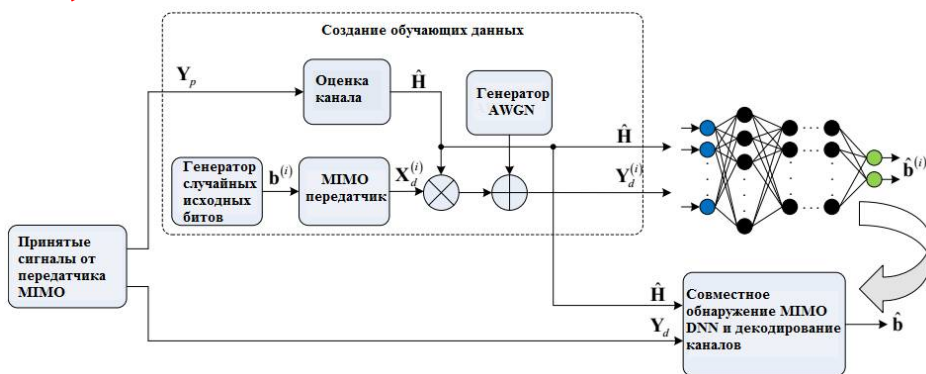


Рис. 4. Структура обучения и развертывания DNN для MIMO

Приемник генерирует обучающие данные, вызывая функциональный блок, который имитирует работу передатчика MIMO. В частности, в целях обучения приемник случайным образом генерирует множество двоичных векторов длиной K , $b^{(i)}$, $i = 1, 2, \dots, Z$. Каждый двоичный вектор $b^{(i)}$ преобразуется в матрицу данных $X_d^{(i)}$ с использованием функционального блока передатчика MIMO. Затем с оценкой матрицы канала \hat{H} , заданной устройством оценки канала, приемник генерирует обучающий сигнал путем умножения \hat{H} на $X_d^{(i)}$ с последующим добавлением AWGN:

$$Y_d^{(i)} = \sqrt{1/M_T} \hat{H} X_d^{(i)} + W_d^{(i)},$$

где $Y_d^{(i)}$ - i -й обучающий сигнал, $W_d^{(i)}$ - соответствующий сгенерированный AWGN. Обучающий набор задается как $D(\hat{H}) = \{Y_d^{(i)}, b^{(i)}\}_{i=1}^Z$, где $b^{(i)}$ - соответствующая метка для $Y_d^{(i)}$. Подчеркнем, что обучающая выборка зависит от оценки матрицы канала \hat{H} .

Переменные, представляющие интерес для DNN, - это символы данных в $X_d^{(i)}$. Таким образом, размер пространства переменных равен 2^K , где K - длина $b^{(i)}$. Если DNN может видеть все возможные кодовые слова, производительность декодирования DNN является наилучшей.

Обучение DNN занимает довольно много времени. Следовательно, процедура обучения приведет к большой задержке декодирования и не может быть развернута для приложений с жесткими требованиями к задержке, таких как передача голоса.

Результаты моделирования

В этом разделе мы представляем результаты моделирования для оценки предлагаемого приемника DNN MIMO. Используются модуляции BPSK и QPSK. Используемый код канала - полярный код со скоростью кода $1/2$. Предполагаем, что каждый пакет состоит из $K = 16$ бит при моделировании. Принятие короткой длины пакета связано с экспоненци-

альной сложностью обучения, когда DNN используется для выполнения декодирования канала. Пакеты небольшой длины представляют интерес для некоторых практических систем, таких как Интернет вещей (IoT). После кодирования канала и модуляции $K = 16$ информационных битов преобразуются в 32 символа BPSK или 16 символов QPSK. В нашем моделировании предполагается, что MIMO-матрицы имеют размер $M_R \times M_T = 2 \times 2, 4 \times 4$ и 8×8 .

Реализуем DNN, состоящую из одного входного слоя, шести скрытых слоев и одного выходного слоя, и пользуясь программный инструментарий Keras для глубокого обучения. Нелинейной функцией активации нейронов входного слоя и скрытых слоев является функция выпрямленных линейных единиц (ReLU). Входной слой - это плотно связанный слой. Каждый скрытый слой представляет собой плотно связанный слой с операциями пакетной нормализации (BN) перед операциями ReLU. Выходной слой - это плотно связанный слой с функциями активации сигмоида. Архитектура DNN проиллюстрирована на рис. 5. Обучаем нейронную сеть в течение нескольких эпох. В каждую эпоху градиент функции потерь вычисляется по всему обучающему набору с использованием метода Адама для оптимизации стохастического градиентного спуска. Обучающий набор содержит все разные кодовые слова 2^K , K - длина информационных битов. Установив количество эпох обучения на 10^5 , обучаем DNN с наборами данных с разными обучающими SNR (от 0 дБ до 6 дБ). После завершения обучения обученный DNN используется для декодирования полученных сигналов MIMO.

Для сравнения рассматриваем следующие два приемных устройства MIMO, которые являются ориентирами:

- 1) линейный приемник MIMO, который использует обнаружения нулевого форсирования (ZF) MIMO, за которым следует полярное декодирование MAP.
- 2) итеративный приемник MIMO, который выполняет итерацию между обнаружением сферического MIMO и полярное декодирование MAP.

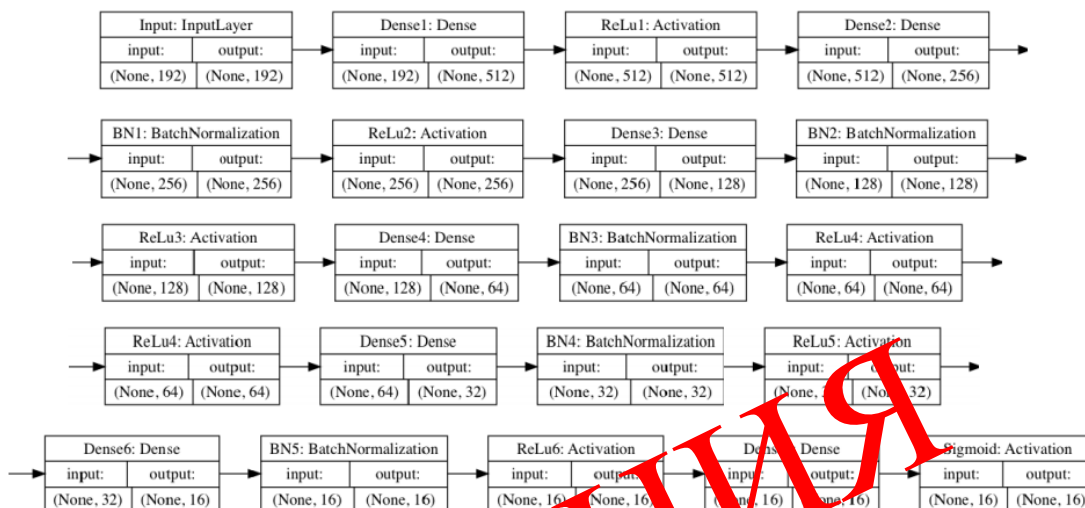


Рис. 5. Архитектура принятой DNN, состоящей из шести слоев с 512, 356, 128, 64, 32 и 16 нейронами, соответствующими слоям.

Исследуем производительность приемников MIMO как с полным, так и с несовершенным знанием матрицы каналов. Для фиксированного SNR оцениваем средние результаты BER приемников MIMO для 100 различных реализаций канала MIMO.

На рис. 6 и 7 показан BER приемников MIMO с точным знанием матрицы канала MIMO для BPSK и QPSK соответственно. Мы можем заметить, что наш приемник DNN MIMO действительно может превзойти линейные и итерационные приемники MIMO с точки зрения BER. Например, приемник DNN MIMO имеет усиление SNR около 1 дБ и 3,5 дБ по сравнению с линейным и итерационным приемниками MIMO, соответственно, при BER 10^{-4} для каналов BPSK и 8×8 MIMO.

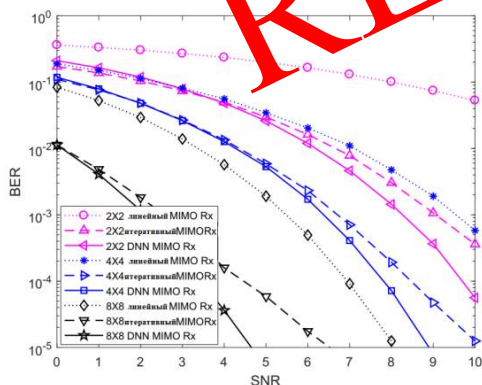


Рис. 6. BER приемников MIMO с точным знанием матрицы канала MIMO для BPSK

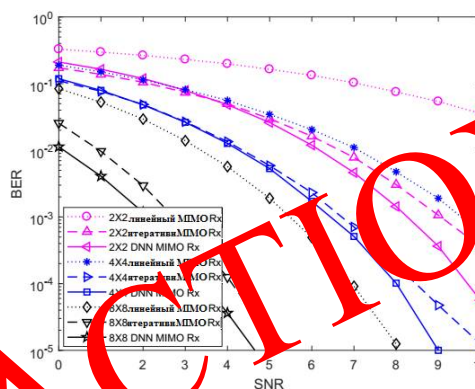


Рис. 7. BER приемников MIMO с точным знанием матрицы канала MIMO для QPSK

На рис. 8 и 9 показаны BER приемников MIMO с несовершенным знанием матрицы канала MIMO для BPSK и QPSK соответственно. Для оценки матрицы канала помещаем матрицу Адамара в начало пакетов в качестве пилот-сигналов и используем оценку LS на основе принятых пилот-сигналов для оценки матрицы канала в приемниках. В общем, тенденция производительности для случаев идеальных и несовершенных оценок канала одинакова. Единственное различие между ними состоит в том, что для случаев несовершенных оценок канала коэффициент усиления, полученный нашим приемником DNN MIMO еще больше. Например, приемник DNN MIMO теперь имеет усиление отношения сигнал / шум около 2 дБ и 10 дБ по сравнению с линейными и итеративными приемниками MIMO при BER 10^{-4} для каналов BPSK и 8×8 MIMO.

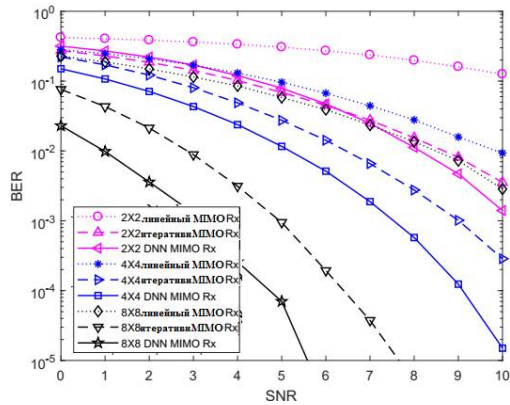


Рис. 8. BER приемников MIMO с несовершенным знанием матрицы канала MIMO для BPSK

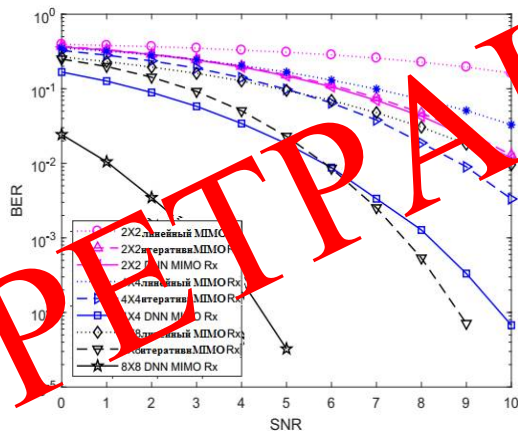


Рис. 9. BER приемников MIMO с несовершенным знанием матрицы канала MIMO для QPSK

Заключение

Глубокая нейронная сеть использовалась для разработки нового решения проблемы совместного обнаружения MIMO и декодирования каналов. Обычные приемники MIMO выполняют обнаружение MIMO и декодирование канала последовательным или итеративным способом. Алгоритмы этих обычных приемников MIMO ослабляют модель сигнала кодированного MIMO. В результате они являются неоптимальными решениями проблемы совместного обнаружения MIMO и декодирования каналов, оставляя возможность для дальнейшего улучшения. Наше решение для глубокого обучения использует DNN для совместного обнаружения MIMO и декодирования каналов в рамках контролируемого обучения. Приемник MIMO с глубоким обучением не разделяет обнаружение MIMO и декодиро-

вание канала на две части и не выполняет с ними последовательных или итерационных операций. Он рассматривает обнаружение MIMO и декодирование канала как процесс совместного декодирования и использует единый DNN для аппроксимации процесса совместного декодирования. Этот совместный процесс улучшает общую производительность декодирования. В процессе моделирования обучили DNN, состоящую из шести скрытых слоев, для декодирования сигналов MIMO. Результаты моделирования демонстрируют заметный выигрыш, полученный приемником MIMO с глубоким обучением по сравнению с обычными линейными и итеративными приемниками MIMO.

Недостатком предлагаемого в настоящее время приемника MIMO с глубоким обучением является то, что DNN необходимо обучать для каждой отдельной матрицы каналов, что приводит к большой задержке декодирования. В общем, обучить одну и ту же DNN для MIMO-декодирования с разными матрицами каналов сложно, так как пространство всех возможных матриц каналов огромно. Невозможно позволить DNN видеть все реализации каналов.

Литература

1. Marano O., Knightly E. W., Park M. Ieee 802.11 ac system channelization to multi-user mimo // IEEE Communications Magazine. 2013. Vol. 51. No. 10. Pp. 84–90.
2. Capacity limits of mimo channels / A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, S. Vishwanath // IEEE Journal on selected areas in Communications. 2003. Vol. 21. No. 5. Pp. 684–702.
3. Richardson T., Kudekar S. Design of low-density parity check codes for 5g new radio // IEEE Communications Magazine. 2018. Vol. 56. No. 3. Pp. 28–34.
4. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.
5. Башкиров А.В. Использование стохастического вычисления для реализации недвоичного LDPC-декодера на ПЛИС / А.В. Башкиров, М.В. Хорошайлова, С.Ю. Белецкая // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2016. –Т. 12, № 5. С. 70-73.
6. Khoroshaylova M.V. LDPC code and decoding algorithms // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности: материалы II междунар. науч.-практ. конф.: в 2-х ч.; под ред. Э. П. Комаровой. Воронеж, 2015. С. 227-228.

Информация об авторах

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fab7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Свиридова Ирина Владимировна – старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: riss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>
Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (34006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

USING NEURAL NETWORKS FOR MIMO DETECTION AND CHANNEL DECODING

A.V. Bashkirov, I.V. Sviridova, M.V. Khoroshaylova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the article proposes a deep learning approach for the joint problem of MIMO detection and channel decoding. Conventional MIMO receivers use an existing model approach to detect MIMO and decode the channel in a linear or iterative manner. However, due to the complex model of the MIMO signal, an optimal solution to the problem of joint MIMO detection and channel decoding (i.e., maximum probability decoding of the transmitted codewords from the received MIMO signals) is computationally impossible. As a practical measure, all current standard model based MIMO receivers use sub-optimal MIMO decoding techniques with affordable computational complexity. This work applies the latest advances in deep learning to the design of MIMO receivers. In particular, we use deep neural networks (DNN) with supervised learning to solve the problem of joint MIMO detection and channel decoding. DNNs can be trained to provide much better decoding performance than conventional MIMO receivers. Simulations show that a DNN implementation consisting of seven hidden layers can outperform traditional linear or iterative receivers based on the models used. This performance improvement points to a new direction for future MIMO receiver design.

Key words: deep learning, neural networks, MIMO receivers, channel decoding

References

1. Bejarano O., Knightly E.W., Park M. "Ieee 802.11 ac: from channelization to multi-user mimo," *IEEE Communications Magazine*, 2013, vol. 51, no. 10, pp. 84–90.
2. Goldsmith A., Jafar S.A., Jindal N., Vishwanath S. "Capacity limits of mimo channels," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, 2003, vol. 21, no. 5, pp. 684–702.
3. Richardson T., Kudekar S. "Design of low-density parity check codes for 5g new radio," *IEEE Communications Magazine*, 2018, vol. 56, no. 3, pp. 28–34.
3. Khoroshaylova M.V. "Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105
4. Bashkirov A.V., Khoroshaylova M.V., Beletskaya S.Yu. "Use of stochastic computation for realization of non-binary LDPC-decoder on FPGA", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2016, vol. 12, no. 1, pp. 70-73.
5. Khoroshaylova M.V. "LDPC code and decoding algorithms", *Proc. of the 2nd Int. Sci.-Practical Conf.: Anthropocentric Sciences: an Innovative Look at Education and Personal Development*, 2015, pp. 227-228.

Submitted 26.04.2022; revised 16.06.2022

Information about the authors

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor., Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fab7@mail.ru, ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>
Irina V. Sviridova, Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: riss-ka@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5279-0807>
Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, tel.: 8-910-732-66-13, orcid.org/0000-0001-9167-9538

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ НЕЙРОСЕТЕВЫХ АЛГОРИТМОВ ДЛЯ ВИЗУАЛЬНОГО КОНТРОЛЯ ТОПОЛОГИИ ПЕЧАТНЫХ ПЛАТ

М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: в процессе производства любого электронного устройства на данный момент принимает участие большое количество как программных, так и аппаратных средств. При изготовлении электронных изделий производится автоматическая установка элементов на плату с применением робототехнических устройств. Наряду с установкой компонентов серьезное значение имеет также и качество рисунка печатной платы. Контроль качества на любом из этапов производства отводится человеку, что значительно снижает не только продуктивность, но и качество отбраковки. В данной статье рассматриваются способы определения дефектных участков топологии печатной платы, возникающих в процессе ее производства, а также возможность корректировки алгоритмов управления производственной линией. Предлагаемое решение направлено в первую очередь на улучшение качества и увеличение скорости современного производства печатных плат, основным показателем, который она способна обеспечить, выступает снижение процента брака. Отличительным признаком разработанного принципа является повышенная, относительно аналогов, точность определения дефектных участков, а также возможность автоматического управления конвейерной линией. Контроль линии производится в режиме реального времени и позволяет добиться корректировки показателей «онлайн» путем занесения в базу данных возможных причин возникновения, последующего анализа и устранения

Ключевые слова: искусственный интеллект, сверточные нейронные сети, машинное зрение, глубокое обучение, повышение качества

Введение

Производство электронных устройств крупными партиями требует от любого предприятия перехода к конвейерным линиям и максимальной автоматизации своего производства с целью увеличения скорости работы по выпуску продукции. Уже сейчас большая часть операций по установке компонентов производится автоматизированными линиями. Однако такой фактор, как контроль качества производимой печатной платы, остается на человеке. [2]. Доля ошибок, связанных с действиями человека, по некоторым оценкам может достигать порядка 15%. Такой процент ошибок может не только повлиять на выпускаемую продукцию, но и на имидж компании в целом. К тому же применение человеческого труда для отбраковки на конвейерной линии при больших скоростях работы приведет к еще большему числу пропущенных бракованных экземпляров, что связано с ограниченностью скорости реакции человека. Одним из выходов является увеличение числа контролеров, что также негативно влияет на материальные затраты и качество отбраковки. Все эти недостатки ведут к снижению продуктивности и экономической выгоды от выпускаемой продукции [1].

В настоящее время, в связи с развитием вычислительных мощностей электроники, становится возможным использование глубоких нейронных сетей в качестве классификатора тех или иных отклонений. Данные отклонения в том числе могут быть классифицированы и на изображениях. Такой подход характеризуется понятием «машинное зрение» и может быть применен в качестве основного способа контроля печатных плат на наличие дефектов.

Диаграмма для разработки методики контроля топологии печатной платы

Для осуществления дефектовки поверхности печатной платы необходимо выполнить целый ряд действий. В основе любого алгоритма, позволяющего осуществить обработку данных с применением нейронных сетей, лежит несколько основных принципов. Первый – качественная разметка данных для обучения нейронной сети. Второй – обучение нейронной сети. Третий – обеспечение идентичности поступающих на вход данных. Каждый из принципов можно разделить на отдельные этапы, но в общем случае методика построения работы и адаптация нейронной сети для каждого отдельного применения показана на рис. 1.

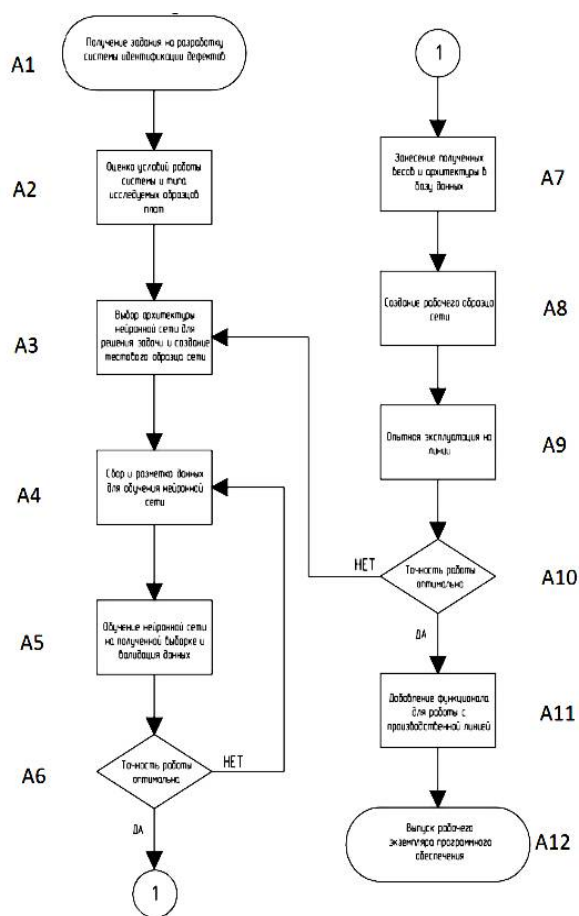


Рис. 1. Методика обучения нейронной сети

На рис. 1 представлены следующие обозначения:

- A1 Получение задания на разработку системы идентификации дефектов
- A2 Оценка условий работы системы и типа исследуемых образцов плат
- A3 Выбор архитектуры нейронной сети для решения задачи и создание тестового образца сети
- A4 Сбор и разметка данных для обучения нейронной сети для решения задач и создание тестового образца сети
- A5 Обучение нейронной сети на полученной выборке и валидация данных
- A6 Выяснение точности оптимальной работы
- A7 Занесение полученных весов и архитектуры в базу данных
- A8 Создание рабочего образца сети
- A9 Опытная эксплуатация на линии
- A10 Выяснение точности оптимальной работы
- A11 Добавление функционала для работы с производственной линией

– A12 Выпуск рабочего экземпляра программного обеспечения.

Применение процедуры анализа изображения

На начальном этапе производится получение задания на создание системы, которое подвергается оценке с точки зрения области применения, разрабатываемого ПО и принципиальной возможности использования машинного зрения. Если применение возможно и особенности производства позволяют внедрить подобную систему – производится выбор архитектуры нейронной сети, которая будет наиболее подходящей исходя из требований к точности и скорости работы системы. Для реализации данной архитектуры в виде алгоритма обработки произведено конструирование нейронной сети с использованием языка Python и библиотек PyTorch, Keras, TensorFlow и Numpy. В итоге удалось получить сверточную нейронную сеть, на базе сверточной модели сети YOLOv5.

Для обучения выбранного алгоритма создается два типа выборки. Первая – тренировочная выборка. Данная выборка предназначена для «тренировки» алгоритма на обнаружение конкретных паттернов на изображении. В данном случае используется принцип «обучение с учителем», что подразумевает применение заранее размеченных и разбитых на классы тестовых изображений. Нейронная сеть в процессе обучения подбирает весовые коэффициенты, опираясь на данные координат ограничивающих рамок в размеченных изображениях. Для апробации вычислений сеть обращается ко второму типу выборки – валидационной. Данный тип выборки схож с обучающей, за исключением того, что нейронная сеть обрабатывает изображения и сравнивает отклонения, полученные путём вычислений координат дефектов с реальными координатами, размеченными человеком. За счёт этого сеть может приблизительно определить качество работы и выдать результат в виде вероятности обнаружения дефекта в определенной области, а также произвести корректировку весовых коэффициентов. Графики, представляющие результат обучения, представлены на рис. 2.

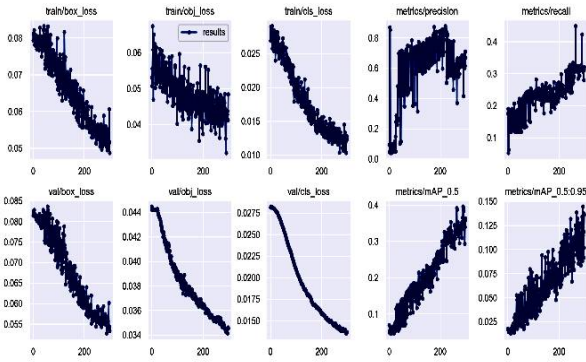


Рис. 2. График результата обучения нейронной сети

Для выделения областей дефектов разработанная сеть производит математические вычисления, представленные в формуле ниже:

$$C_i^j = P_{i,j} \times IOU_{pred}^{truth}, \quad (1)$$

где параметры j, i обозначают j -ю регрессивную ячейку i -й сетки, C_i^j означает достоверность j -й ограничивающей фигуры i -й сетки выделяемого дефекта. $P_{i,j}$ – это значение, указывающее на существование в j -м поле нахождения искомого дефекта, если дефект существует в данном квадрате, то значение $P_{i,j} = 1$, в противном случае оно равняется 0. IOU_{pred}^{truth} является параметром, указывающим пересечение по объединению множества предсказанных результатов и множества истинных значений. Чем больше значение IOU_{pred}^{truth} , тем выше вероятность правильного нахождения дефекта на плате.

Функция потерь является оптимизирующей функцией и также вычисляется при обучении сети для выявления ошибок алгоритма на каждом конкретном объекте. Вычисления происходят по формуле (2):

$$loss = l_{box} + l_{cls} + l_{obj}, \quad (2)$$

где l_{box} – функции регрессии с ограничением, l_{cls} – функция потери классификации, l_{obj} – функция потери достоверности.

В общем виде был получен алгоритм, который позволяет обнаружить на исходном изображении и обвести ограничивающей рамкой область дефекта, с указанием вероятности нахождения найденного дефекта в данной области. Для осуществления обучения нейронной сети необходимо разметить данные. Разметка данных представляет собой создание вручную ограничивающих рамок в местах нахождения дефекта на выборке из изображе-

ний. Далее информация о местах нахождения дефекта относительно начала координат в размерной сетке разрешения изображения записывается в текстовый файл. В имени файла указывается принадлежность к конкретному изображению, а в содержании файла фигурируют координаты и название выделенной области (label) – пример показан на рис. 3.



Рис. 3. Форма разметки изображений для создания обучающей и валидационной выборки

Поскольку на вход данная сеть принимает изображения с разрешением 640x640 необходимо предварительно сжать исходное изображение до данных размеров. Для обработки видеоряда от камер, работающих по интерфейсу GigE, используется дополнительная библиотека, которая производит обработку данных о видеоряде и перерабатывается в единственный фрейм для обработки с исходным размером. Затем с использованием библиотеки OpenCV производится преобразование размера изображения в необходимое для последующей подачи его на вход нейронной сети. После этого обработанное изображение с нанесенными на него ограничивающими рамками формируется с учетом выхода сети и сохраняется как результат её работы в отдельный файл.

Испытание программного комплекса

При помощи разработанной методике, представленной на рис. 1, в лабораторных условиях был разработан и испытан программный комплекс для определения дефектных участков печатных плат.

Условно действующая модель состоит из трех частей: 1 – камера машинного зрения, 2 –

ПК со специализированным программным обеспечением, 3 – освещение. Сборка из трех составляющих является первой итерацией опытного образца для испытания программного обеспечения. Фото используемой камеры и освещения представлены на рис. 4.



Рис. 4. Используемое оборудование

После сборки установка закрепляется под углом сверху испытуемого образца платы для того, чтобы минимизировать блики и засветы от освещения как показано на рис. 5.



Рис. 5. Установка оборудования

Практическое применение и оценка эффективности разрабатываемого устройства представлены на рис. 5. Вероятность нахождения дефектов в виде царапин, отслоение элементов печатного монтажа, выход отверстий за пределы контактных площадок, поврежденных отверстий контактных площадок, разрыв токопроводящих цепей система обнаруживает с высокой вероятностью.



Рис. 6. Практическое применение разрабатываемого комплекса

Вывод

Увеличение объемов производства на ряду с уменьшением размеров как самих компонентов, так и печатных плат значительно усложняет процесс выходного визуального контроля. Контроль всей партии на конвейерной линии с применением визуального контроля силами человека становится невозможным. В связи с этим разработка концептуально иных способов автоматизации производственных процессов на всех стадиях становится основной задачей [3]. Повышение качества на ряду с увеличением количества производимых продуктов благоприятно сказывается на экономической составляющей предприятия. Увеличение количества выпускаемого продукта при сравнимом уровне затрат на выпуск единичного изделия позволяет уменьшить стоимость продукта, что благоприятно сказывается на рыночной конкуренции предприятия [4]. Применение систем искусственного интеллекта для автоматизации производственных процессов приведет к качественному и количественному улучшению показателей производства. Совершенствование систем автоматизации на предприятии увеличивает его экономические показатели на ряду с повышением качества выпускаемых продуктов.

Литература

1. Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Рожненко С.Н. Методика оценки влияния электромагнитных помех на функционирование электронных средств в процессе их проектирования // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 6. С. 57-61.

2. Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Ромашенко М.А. Программно-аппаратный комплекс тестирования электронных средств на воздействие электромагнитных помех // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXVI Междунар. науч.-техн. конф., 2020. С. 386-391.

3. Патент на полезную модель №189820 Российская Федерация. Сканирование ближнего электрического поля для двухсторонних и многослойных печатных плат / Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Глотов В.В., Глотова Т.С.; патентообладатель: Федеральное гос-

ударственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Воронежский государственный технический университет" № 2019108722; заявл. 26.03.2019; опубл. 05.06.2019.

4. Методика формирования испытательных сигналов для оценки устойчивости электронных средств к ЭМП / М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, С.Н. Рожненко, Ю.С. Балашов // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 6 (12). С. 19-23.

Поступила 04.04.2022; принята к публикации 16.06.2022

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kivr@vorstu.ru

Васильченко Дмитрий Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Shadow951@bk.ru

Пухов Дмитрий Анатольевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

USING NEURAL NETWORK ALGORITHMS FOR VISUAL CONTROL OF THE TOPOLOGY OF PRINTED CIRCUIT BOARDS

M.A. Romashchenko, D.V. Vasil'chenko, D.A. Pukhov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: in the production process of any electronic device, a large number of both software and hardware are currently involved. In the manufacture of electronic products, elements are automatically installed on the board using robotic devices. Along with the installation of components, the quality of the printed circuit board design is also of great importance. Quality control at any stage of production is assigned to a person, which significantly reduces not only productivity, but also the quality of rejection. This article discusses ways to determine defective sections of the printed circuit board topology that occur during its production, as well as the possibility of adjusting the production line control algorithms. The proposed solution is aimed primarily at improving the quality and increasing the speed of modern production of printed circuit boards, the main indicator that it is able to provide is a reduction in the percentage of scrap. A distinctive feature of the developed principle is the increased, relative to analogues, accuracy of determining defective areas, as well as the possibility of automatic control of the conveyor line. The line is monitored in real time and allows you to adjust the indicators "online" by entering into the database the possible causes of occurrence, subsequent analysis and elimination

Key words: artificial intelligence, convolutional neural networks, machine vision, deep learning, quality improvement

References

1. Romashchenko M.A., Vasil'chenko D.V., Romanenko S.N. "Methodology for assessing the influence of electromagnetic interference on the functioning of electronic means in the process of their design", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 57-61.

2. Vasil'chenko D.V., Neklyudov A.L., Romashchenko M.A. "Software and hardware complex for testing electronic means for the effects of electromagnetic interference", *Proc. of the XXVI Int. Sci. and Tech. Conf.: Radar, Navigation, Communication. (Radio-lokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. tr. XXVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, 2020, pp. 386-391.

3. Romashchenko M.A., Vasil'chenko D.V., Neklyudov A.L., Glotov V.V., Glotova T.S. "Near-field scanner for double-sided and multilayer printed circuit boards" ("Skanirovanie blizhnego elektricheskogo polya dlya dvukhstoronnikh i mnogosloynnykh pechatnykh plat"), patent RU 189820 U1, 05.06.2019, application no. 2019108722 dated 26.03.2019.

4. Romashchenko M.A., Vasil'chenko D.V., Romanenko S.N., Balashov Yu.S. "Methodology for forming test signals for assessing the stability of electronic means to EMF", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2020, vol. 84, no. 6 (12), pp. 19-23.

Submitted 04.04.2022; revised 16.06.2022

Information about the authors

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

Dmitriy V. Vasil'chenko, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Shadow951@bk.ru

Dmitriy A. Pukhov, student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

**ПЛОСКИЕ АНТЕННЫЕ РЕШЕТКИ С РАЗЛИЧНЫМИ СПОСОБАМИ
РАСПОЛОЖЕНИЯ ИЗЛУЧАТЕЛЕЙ**

А.Д. Базанова, К.А. Лайко, Ю.О. Филимонова

Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия

Аннотация: рассматриваются различные виды структур размещения излучающих элементов в плоской антенной решетке. Приведено описание разнообразных структур плоских антенных решеток. Рассмотрены три наиболее распространенных варианта расположения излучателей в узлах плоской антенной решетки с прямоугольной, радиальной и гексагональной сетками, для разных форм геометрии раскрыва (прямоугольная, круглая и треугольная). Описаны параметры данных структур, а именно: шаг d_x , d_y для прямоугольной сетки, d – для гексагональной сетки, d_r и d_φ – шаг по радиальной и угловой координатам, соответственно, между излучателями, а также N_n – количество излучателей для радиальной сетки на окружности n . Представлено влияние геометрии раскрыва для прямоугольной, треугольной и круглой апертур антенной решетки с различными сетками расположения излучателей в узлах плоской антенной решетки. Для всех рассмотренных случаев рассчитаны диаграммы направленности в трехмерном пространстве, которые представлены на плоскости чертежа различными сечениями по угловой координате φ с шагом 15° . Проведен сравнительный анализ полученных характеристик излучения антенных решеток с различными структурами размещения излучателей, а также при различной геометрии раскрывов. Отмечено, что антенная решетка с круглым раскрывом и радиальной структурой в отличие от других структур обладает одинаковыми диаграммами направленности в разных плоскостях φ . Это указывает на оптимальную форму раскрыва и структуру размещения излучателей по критерию оптимизации коэффициента использования поверхности раскрыва по заданному уровню боковых лепестков

Ключевые слова: антенная решетка, апертура антенной решетки, диаграмма направленности, шаг антенной решетки, уровень боковых лепестков

Введение

В настоящее время активное развитие в техническом плане получили антенны. Это связано с постоянным повышением требований к радиотехнической аппаратуре. Для получения оптимальных характеристик используются антенные решетки (АР), которые обладают плоским раскрывом [1-3].

При этом необходимо оптимально подходить к вопросу выбора места расположения излучателей в раскрыве. В большинстве случаев такие АР состоят из однотипных излучающих элементов, расположенных в узлах плоской координатной сетки с двойной периодичностью (рис. 1).

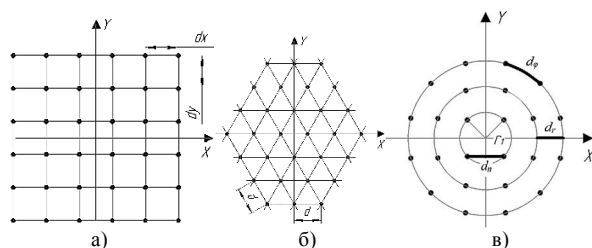


Рис. 1. Размещение излучателей в узлах сетки:
а) прямоугольной, б) гексагональной, в) радиальной

Здесь d_x , d_y – шаг между излучателями по оси x , y для прямоугольной сетки; d – расстояние между излучателями АР для гексагональной сетки; r_n – радиус n -й окружности, d_r и d_φ – шаг между излучателями по радиальной и угловой координатам, соответственно.

Различные структуры антенных решеток

В данной работе рассмотрены три структуры (рис. 1) расположения излучателей для плоских АР: прямоугольная, гексагональная, радиальная [4 - 6].

Опишем каждую сетку расположения излучателей в структуре АР:

1. В качестве прямоугольной сетки расположения координат обычно понимают стандартную сетку полностью перпендикулярных друг другу линий, отстоящих друг от друга на равные расстояния, называемые шагом d_x , d_y . Излучатели расположены в узлах сетки.

2. Гексагональная сетка – это так же система, относящаяся к классу прямолинейных систем координат. На плоскости данная сетка задается в виде системы векторов X , Y , Z ,

которые исходят из точки O – из центра координат. Линии, образующие равносторонние треугольники со стороной d , в узлах которых и располагают излучатели.

3. Радиальная сетка – в данной структуре излучатели расположены на окружностях определенного радиуса с заданным шагом по угловой координате d_φ между собой. Радиусы соответствующих окружностей отличаются на величину d_r – шаг по радиальной координате.

В данной работе к рассмотрению предлагаются эквидистантные структуры АР с равномерно-синфазным амплитудным распределением [7-9], где $A_{nm}=1$, $\Phi_{nm}=const$ и без учета направленных свойств излучателей.

Радиальная структура АР

Опишем радиальную структуру для плоской АР с круглым раскрывом. Для дискретной симметричной радиальной структуры минимально возможное число излучателей представлено в таблице. Для заданного минимального расстояния между излучателями на первой окружности d_n определяются все дальнейшие координаты остальных излучателей [10-11]. Рассмотрим данную структуру для девяти окружностей.

Распределение излучателей на окружностях

Номер окружност и n	Радиус n -ой окружност и	Длина n -ой окружност и	Количество излучателе й на n -ой окружност и $N_n (N_n/4)$
1	$1r_1$	$2\pi r_1$	4 (1)
2	$2r_1$	$4\pi r_1$	8 (2)
3	$3r_1$	$6\pi r_1$	12 (3)
4	$4r_1$	$8\pi r_1$	16 (4)
5	$5r_1$	$10\pi r_1$	20 (5)
6	$6r_1$	$12\pi r_1$	24 (6)
7	$7r_1$	$14\pi r_1$	28 (7)
8	$8r_1$	$16\pi r_1$	32 (8)
9	$9r_1$	$20\pi r_1$	36 (9)

Так как структура симметрична, то в скобках, в крайней колонке, указано количество излучателей в одном квадранте - $N_n/4$.

Таким образом, на первой окружности минимально возможное количество излучателей равно четырем, тогда расстояние между излучателями определяем по формуле:

$$d_1 = \sqrt{2}r_1, \quad (1)$$

где r_1 – радиус первой окружности.

Далее определяем радиус второй и третьей окружностей: $r_2 = 2r_1$, $r_3 = 3r_1$

Тогда общая формула для нахождения радиусов последующих окружностей примет вид:

$$r_n = nr_1, \quad (2)$$

где n - номер окружности.

Для эквидистантной структуры шаг по радиальной координате является величиной постоянной [12]. Задаем расстояние между излучателями на первой окружности, к примеру, $d_1=const=0,5\lambda$. Исходя из данного расстояния, по выражению (1) определяем радиус первой окружности. Учитывая закон изменения радиусов (формула (2)), проводим расчет радиальной структуры, изображенной на рис. 2. ДН такой структуры приведены на рис. 3.

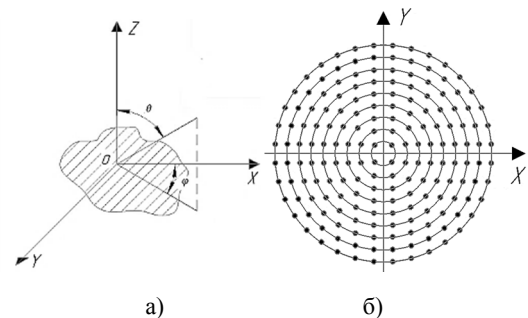


Рис. 2. Расположение апертуры АР в сферической системе координат (а), апертура плоской АР с радиальной структурой для круглого раскрыва (б)

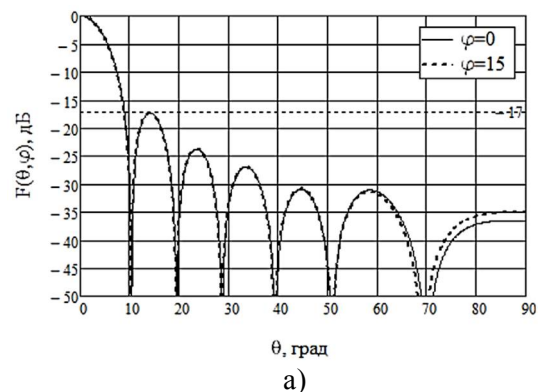


Рис. 3. ДН АР: а) в плоскости $\varphi=0^\circ$, $\varphi=15^\circ$ б) в плоскости $\varphi=30^\circ$, $\varphi=45^\circ$, где $F(\theta, \varphi)$ – ДН АР, θ, φ – текущие угловые координаты

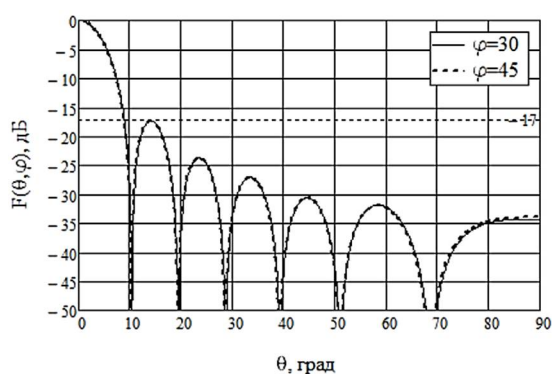


Рис. 3. ДН АР: а) в плоскости $\varphi=0^\circ, \varphi=15^\circ$ б) в плоскости $\varphi=30^\circ, \varphi=45^\circ$, где $F(\theta, \varphi)$ – ДН АР, θ, φ – текущие угловые координаты (продолжение)

Уровень боковых лепестков (УБЛ) составил -17 дБ. При этом, как видно из рис. 3, ширина главного луча по уровню половинной мощности составила 9° во всех плоскостях φ . Разброс ДН по угловой координате φ минимален и визуализируется только по уровню -35 дБ.

Прямоугольная структура АР

Далее приведем структуру АР с прямоугольной сеткой расположения излучателей, которая чаще всего применяется для прямоугольных раскрытий.

В данном случае выберем площадь апертуры антенны с прямоугольным раскрытием равную площади АР с круглым раскрытием (рис. 2).

Определим площадь прямоугольного раскрытия по окружности максимального радиуса радиальной структуры, используя выражения:

$$S_{okr} = \pi r_{max}^2 = \pi \cdot (3.182\lambda)^2 = 31.809\lambda^2, \quad (3)$$

где r_{max} – окружность максимального радиуса.

Тогда примем, что площадь прямоугольника равна площади окружности, имеющей максимальный радиус. Исходя из этого условия находим величину стороны прямоугольника $a=5,64\lambda$.

На рис. 4 представлены АР с прямоугольной сеткой, ДН – на рис. 5.

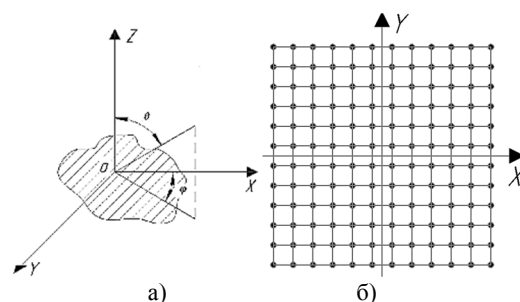


Рис. 4. Расположение апертуры АР в сферической системе координат (а), апертура плоской АР с прямоугольной структурой для прямоугольного раскрытия (б)

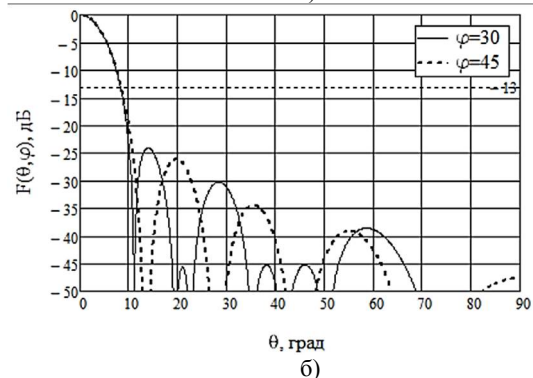
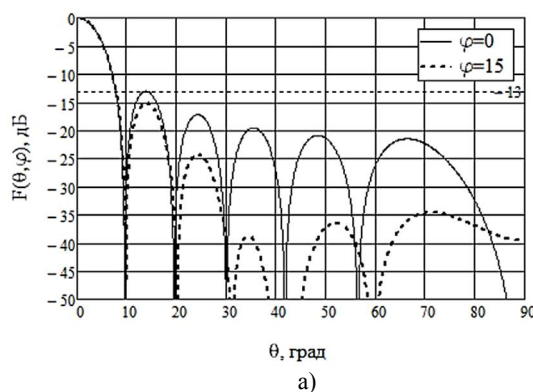


Рис. 5. ДН АР: а) в плоскости $\varphi=0^\circ, \varphi=15^\circ$, б) в плоскости $\varphi=30^\circ, \varphi=45^\circ$, где $F(\theta, \varphi)$ – ДН АР, θ, φ – текущие угловые координаты

В данном случае имеем 36 излучателей в одном квадранте. Всего же 144 излучателя на всем раскрытии.

Максимальный УБЛ составил порядка -13 дБ. Появился разброс максимальных боковых лепестков от -13 дБ до -26 дБ в различных плоскостях φ .

Ширина главного луча по уровню половинной мощности составила так же, как и в предыдущем случае 9° .

Далее была исследована АР с круглым раскрытием и прямоугольной сеткой расположения излучателей (рис. 6 – 7). Рассматриваем структуру с эквивалентной площадью и тем же количеством излучателей.

В данном случае получили равное заполнение круглого и прямоугольного раскрывов.

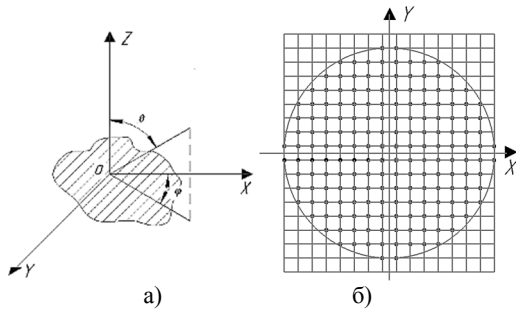


Рис. 6. Расположение апертуры АР в сферической системе координат (а), апертура плоской АР с прямоугольной структурой для круглого раскрыва (б)

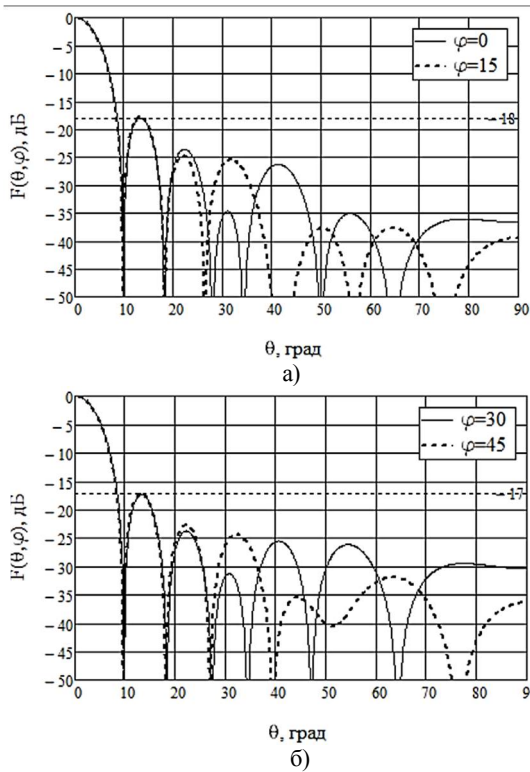


Рис. 7. ДН АР: а) в плоскости $\varphi=0^\circ, \varphi=15^\circ$, б) в плоскости $\varphi=30^\circ, \varphi=45^\circ$, где $F(\theta, \varphi)$ – ДН АР, θ, φ – текущие угловые координаты

Для такого вида структуры УБЛ порядка -17 дБ, а разброс ДН гораздо меньше, чем в предыдущем случае и составляет от -17 дБ до -18 дБ в различных плоскостях φ .

Ширина главного луча по уровню половинной мощности составила 9° , как и в предыдущем случае.

Гексагональная структура АР

Далее приведем структуру АР с расположением излучателей в узлах гексагональной сетки (рис. 8 - 9).

На первом этапе приведем для сравнения гексагональную сетку с площадью, равной площади АР с круглым раскрывом. Для этого воспользуемся ранее найденной величиной площади окружности, имеющей максимальный радиус. Отсюда принимаем, что площадь всего треугольного раскрыва должна также составлять $31,809\lambda^2$.

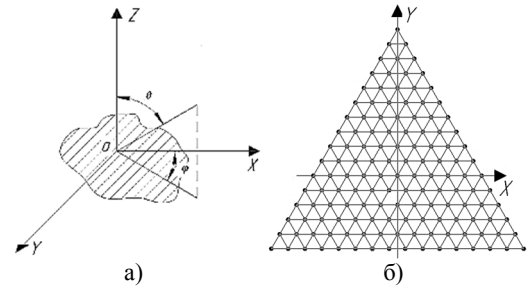


Рис. 8. Расположение апертуры АР в сферической системе координат (а), апертура плоской АР с гексагональной структурой для треугольного раскрыва (б)

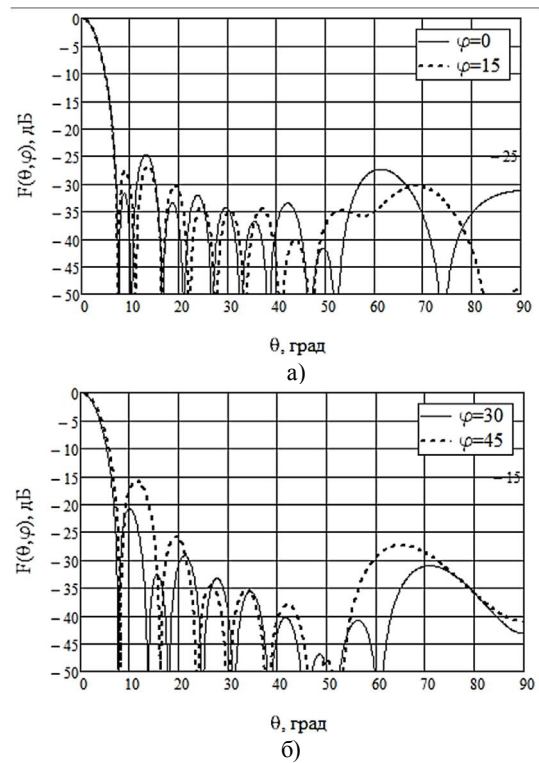


Рис. 9. ДН АР: а) в плоскости $\varphi=0^\circ, \varphi=15^\circ$, б) в плоскости $\varphi=30^\circ, \varphi=45^\circ$, в) в плоскости $\varphi=90^\circ$, где $F(\theta, \varphi)$ – ДН АР, θ, φ – текущие угловые координаты

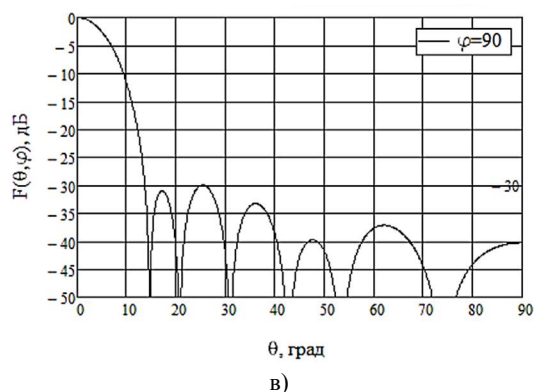


Рис. 9. ДН АР: а) в плоскости $\varphi=0^{\circ}, \varphi=15^{\circ}$, б) в плоскости $\varphi=30^{\circ}, \varphi=45^{\circ}$, в) в плоскости $\varphi=90^{\circ}$, где $F(\theta, \varphi)$ – ДН АР, θ, φ – текущие угловые координаты (продолжение)

В данном случае получили уже 136 излучателей в структуре АР, что по сравнению с прямоугольной сеткой меньше примерно на 7%.

Для такого вида структуры получили уже УБЛ порядка -16 дБ, но появился видимый разброс по УБЛ, около 14 дБ, также появился разброс по ширине главного луча.

Ширина главного луча по уровню половинной мощности составила $6,4^{\circ}$ при $\varphi=0^{\circ}$, $10,8^{\circ}$ при $\varphi=90^{\circ}$.

Далее по аналогии со случаем вписанной окружности максимального радиуса в прямоугольник рассмотрим случай с треугольной структурой (рис. 10-11). Условием сравнения является равное количество излучателей в АР. В данном случае в связи с несимметричностью треугольного раскрыва добиться равного количества излучателей не удастся. Самый оптимальный вариант позволяет расположить в такой АР 140 излучателей в раскрыве.

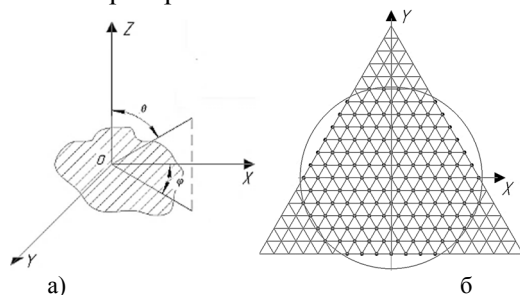


Рис. 10. Расположение апертуры АР в сферической системе координат (а), апертура плоской АР с гексагональной структурой для круглого раскрыва (б)

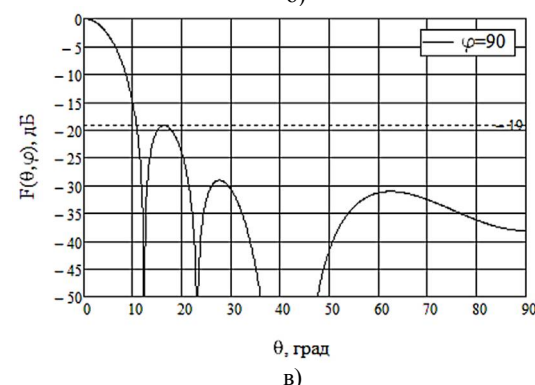
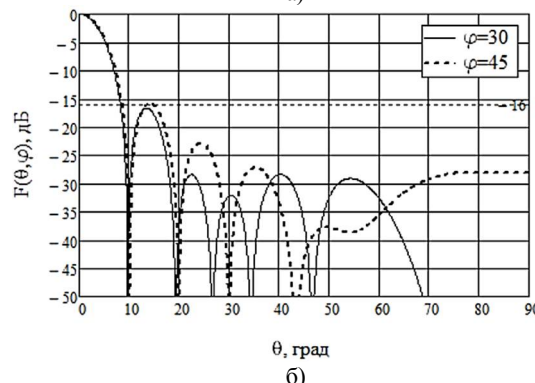
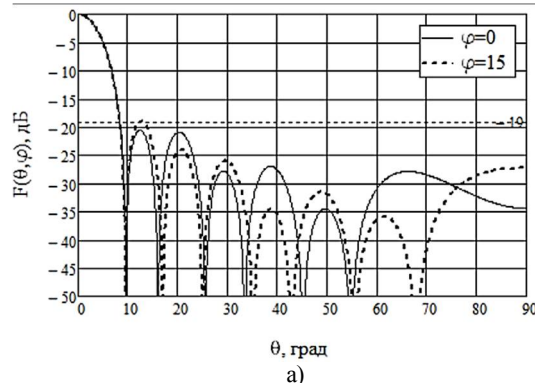


Рис. 11. ДН АР: а) в плоскости $\varphi=0^{\circ}, \varphi=15^{\circ}$, б) в плоскости $\varphi=30^{\circ}, \varphi=45^{\circ}$, в) в плоскости $\varphi=90^{\circ}$, где $F(\theta, \varphi)$ – ДН АР, θ, φ – текущие угловые координаты

Для такого вида структуры получили УБЛ порядка -16 дБ, но в данном случае снизился разброс по УБЛ, он составил около 5 дБ.

Ширина главного луча по уровню половинной мощности составила $7,4^{\circ}$ при $\varphi=15^{\circ}$, $10,4^{\circ}$ при $\varphi=0^{\circ}$.

Заключение

Проведя сравнительный анализ различных способов размещения излучателей в структуре АР при равной площади раскрыва и одинаковом количестве излучателей было продемонстрировано, что для прямоугольной сетки показатель УБЛ был максимальным. При использовании же гексагональной сетки снижается количество излучателей при равной

площади раскрыва антенны, что выгодно с конструктивной и экономической точки зрения. Для радиальной структуры с круглым раскрывом был достигнут как минимальный УБЛ, так и минимальный разброс боковых лепестков. Следовательно, для данной структуры (радиальная сетка и круглый раскрыв) могут быть получены оптимальные параметры в части достижения максимального значения коэффициента использования поверхности раскрыва для заданного УБЛ. Также это наиболее оптимальный вариант для получения наилучшего УБЛ при минимальном его разбросе в различных плоскостях обзора и для улучшения направленных свойств плоской АР.

Литература

1. Хансен Р.К. Сканирующие антенные системы СВЧ: пер. с англ. под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. М.: Советское радио, 1966. Т.1. 536 с.
2. Хансен Р.К. Сканирующие антенные системы СВЧ: пер. с англ. под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. М.: Советское радио, 1969. Т. 2. 496 с.
3. Хансен Р.К. Сканирующие антенные системы СВЧ: пер. с англ. под ред. Г.Т. Маркова и А.Ф. Чаплина. М.: Советское радио, 1971. Т. 3. 464 с.

4. Abdelmajid R. Concentric Ring Arrays Optimization Using the Spiral Inspired Technique. Laboratory Signal and System, IGEE, University M'hamed Bougara Boumerdes, 2018. Vol. 3. P. 10-21.

5. Kleiman A., Cohen I., Berdugo B. Constant – Beamwidth Beamforming with Concentric Ring Arrays. Sensors, 2021, 21, 7253.

6. Chatterjee A., Mahanti G.K. Differential Evolution and Genetic Algorithm for Sidelobe Reduction of a Concentric Ring Arrays Antenna by Radial Variation of Amplitudes with Fixed and Variable First Null Beamwidth // IJEEI. 2012. Vol. 4. №1.

7. Беньковский З., Липинский Э. Любительские антенны коротких и ультракоротких волн: пер. с полск. под ред. О.П. Фролова. М.: Радио и связь, 1983. 480 с., ил.

8. Шифрин Я.С. Вопросы статистической теории антенн. М.: Советское радио, 1970. 384 с.

9. Марков Г.Т., Сазонов Д.М. Антенны: учебник для студентов радиотехнических специальностей вузов. М.: Энергия, 1975. 528с.

10. Филимонова, Ю.О., Лайко К.А. Синтез амплитудных распределений антенных решеток с повышенным коэффициентом использования поверхности раскрыва // Доклады ТУСУР. Томск, 2015. – 162 с.

11. Зелкин Е.Г., Соколов В.Г. Методы синтеза антенн // Е.Г. Зелкин. М.: Сов. радио, 1980. 296 с.

12. Зелкин Е.Г., Кравченко В.Ф. Задачи синтеза антенн и новые методы их решения. М.: ИПРЖР, 2002. Кн. 1. 72 с.

Поступила 13.05.2022; принята к публикации 16.06.2022

Информация об авторах

Базанова Анастасия Дмитриевна – магистрант, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20), тел. 8(913)921-51-40, e-mail: adbazanova@yandex.ru

Лайко Константин Алексеевич – канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20), тел. 8(383) 346-06-33, e-mail: play-byte@mail.ru

Филимонова Юлия Олеговна - канд. техн. наук, доцент, Новосибирский государственный технический университет (630073, Россия, г. Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20), тел. 8(383) 346-06-33, e-mail: jul7788@mail.ru

FLAT ANTENNA ARRAYS WITH VARIOUS WAYS OF EMITTER ARRANGEMENT

A.D. Bazanova, K.A. Layko, Yu.O. Filimonova

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

Abstract: the article discusses various types of structures for locating emitting elements in a flat antenna array. We give the description of various structures of flat antenna arrays. We considered three most common variants of the emitter arrangement in the nodes of a flat antenna array with rectangular, radial and hexagonal grids, for different shapes of the opening geometry (rectangular round and triangular). We described the parameters of these structures, namely: the step d_x , d_y for a rectangular grid, d - for a hexagonal grid, d_r and d_ϕ – the step along the radial and angular coordinates, respectively, between the emitters, and N_n - the number of emitters for a radial grid on a circle n . We presented the influence of the opening geometry for rectangular, triangular and round apertures of the antenna array with different grids of emitters in the nodes of the flat antenna array. For all the considered cases, we calculated directional diagrams in three-dimensional space, which are represented on the drawing plane by various sections along the angular coordinate ϕ with a step of 15° . We carried out a comparative analysis of the obtained radiation characteristics of antenna arrays with different emitter placement structures, as well as with different opening geometries. We note that an antenna array with a circular opening and a radial structure, unlike other structures, has the same radiation patterns in different planes ϕ . This indicates the optimal shape of the opening and the

structure of the placement of emitters according to the criterion of optimizing the utilization factor of the opening surface for a given level of side lobes

Key words: antenna array, antenna array aperture, radiation pattern, antenna array pitch, side lobe level

References

1. Hansen R.K. "Microwave scanning antennas: volume I", Moscow: Sovetskoe Radio, 1966, 536 p.
2. Hansen R.K. "Microwave scanning antennas: volume II", Moscow: Sovetskoe Radio, 1969, 496 p.
3. Hansen R.K. "Microwave scanning antennas: volume I", Moscow: Sovetskoe Radio, 1971, 464 p.
4. Abdelmadjid R. "Concentric ring arrays optimization using the spiral inspired technique", *Laboratory Signal and System, IGEE*, University Muhamed Bougara Boumerdes, 2018, vol. 3, pp. 10–21.
5. Kleiman A., Cohen I., Berdugo B. "Constant-beamwidth beamforming with concentric ring arrays", *Sensors*, 2021, no. 21, pp. 7253.
6. Chatterjee A., Mahanti G.K. "Differential evolution and genetic algorithm for sidelobe reduction of a concentric ring arrays antenna by radial variation of amplitudes with fixed and variable first null beamwidth", *IJEEI*, 2012, vol. 4, no. 1.
7. Benkovsky Z., Lipinsky E. "Amateur antennas of short and ultrashort waves", Moscow: Radio i svyaz', 1983, 480 p.
8. Shifrin Ya.S. "Questions of the statistical theory of antennas" ("Voprosy statisticheskoy teorii antenn"), Moscow: Sovetskoe Radio, 1970, 384 p.
9. Markov G.T., Sazonov D.M. "Antennas", textbook, Moscow: Energiya, 1975, 528 p.
10. Filimonova, Yu.O., Layko K.A. "Synthesis of amplitude distributions of antenna arrays with an increased coefficient of use of the opening surface", *Reports of TSUCSR (Doklady TUSUR)*, 2015, 162 p.
11. Zelkin, E.G., Sokolov V.G. "Methods of antenna synthesis" ("Metody sinteza antenn"), Moscow: Sovetskoe Radio, 1980, 296 p.
12. Zelkin E.G., Kravchenko V.F. "Problems of antenna synthesis and new methods of their solution" ("Zadachi sinteza antenn i novye metody ikh resheniya"), Moscow: IPRZHR, 2002, 72 p.

Submitted 13.05.2022; revised 16.06.2022

Information about the authors

Anastasiya D. Bazanova, MA, Novosibirsk State Technical University (20 Karl Marx Ave., Novosibirsk 630073, Russia), tel.: +7 (913)921-51-40, e-mail: adbazanova@yandex.ru.

Konstantin A. Layko, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073), tel.: +7(383) 346-06-33, e-mail: play-byte@mail.ru.

Yuliya O. Filimonova, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Novosibirsk State Technical University (20 Karl Marx Ave., Novosibirsk, 630073), tel.: +7(383) 346-06-33, e-mail: jul7788@mail.ru.

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ВИРТУАЛЬНЫХ АНТЕННЫХ РЕШЕТОК ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПЕЛЕНГАТОРА ВОЗДУШНОГО БАЗИРОВАНИЯ

Е.А. Ищенко¹, Ю.Г. Пастернак¹, В.А. Пендюрин², С.М. Фёдоров^{1,3},
И.А. Черноиваненко¹

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи»,
г. Воронеж, Россия

³Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается пассивный радиопеленгатор авиационного базирования, который устанавливается на беспилотный летательный аппарат с применением технологий малозаметности. Благодаря применению технологии виртуальных антенных решеток, как показывают результаты моделирования, удается повысить точность пеленгации, так, ошибка и среднеквадратическое отклонение пеленга уменьшились более чем в 2 раза. На основе всех проведенных исследований можно сделать вывод, что использование технологии виртуальных антенных решеток позволило снизить искажения, которые вносит корпус, серьезно искажающий характеристики электромагнитного поля. Благодаря применению функции Ганкеля в процессе формирования (может быть использовано как фундаментальное решение уравнений Гельмгольца) виртуальной антенной решетки удалось повысить скорость расчетов, а также решить проблему отсутствия опорного сигнала в процессе формирования виртуальной антенной решетки. Аппроксимация поля, которая выполняется на основе использования функции Ганкеля обладает высокой точностью, а также позволяет снизить влияние окружающих поверхностей, искажающие характеристики электромагнитных волн. Таким образом, можно сказать, что использование аппарата виртуальных антенных решеток на основе характеристик поля, измеренных реальным радиопеленгатором, позволяет улучшить характеристики пеленгации, что является важной и актуальной задачей в пассивной радиопеленгации

Ключевые слова: виртуальная антенная решетка, пеленгация, беспилотный летательный аппарат

Благодарности: исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 19-79-10109)

Введение

Пассивные радиопеленгаторы применяются все чаще в задачах определения направления прихода электромагнитных волн, так как их применение позволяет значительно повысить скрытность. Однако в случае установки таких систем на летательные аппараты с использованием технологии повышения скрытности (стелс-технология) возникает серьезное искажение характеристик электромагнитных волн, что нарушает качество пеленгации электромагнитных волн. Решение задачи повышения точности является важной и актуальной задачей и одним из способов решения данной задачи могут послужить виртуальные антенные решетки (ВАР).

Пример использования виртуальных антенных решеток для повышения точности определения направления прихода электромаг-

нитных волн (ЭМВ) приводится во многих научных работах. Например, в работе [1] представлен пример использования ВАР для повышения точности определения направления прихода ЭМВ от базовых станций сотовых сетей, чтобы повысить эффективность работы технологии формирования луча (beamforming). Благодаря применению виртуальной антенной решетки удалось значительно повысить точность определения направления прихода электромагнитных волн, что позволило повысить точность фокусировки главного лепестка диаграммы направленности.

Другим примером использования ВАР для повышения точности определения направления прихода ЭМВ может послужить работа [2]. В ней предложен алгоритм SAGE для формирования виртуальной антенной решетки, которая позволила значительно повысить точность определения направления прихода электромагнитных волн. Таким образом, удается улучшить точность пеленгации за счет обработки измеренных реальной антенной решеткой напряже-

ний путем выполнения аппроксимации характеристик поля.

Одной из особенностей применения алгоритма ВАР является сужение главного лепестка диаграммы направленности, а также уменьшение уровня боковых лепестков, как это показано в работе [3, 4]. Благодаря достижению таких характеристик удается достичь повышения точности определения направления прихода волн, а также повысить защиту от помех, которые принимает пеленгатор.

В работе [5] отчетливо видно, что даже если формировать виртуальную антенную решетку на незначительно увеличенном радиусе относительно реальной удается достичь повышения точности пеленгации и снизить погрешность определения пеленга.

В данной работе предлагается алгоритм формирования ВАР на основе функции Ганкеля, при этом исследуемый комплекс пеленгации устанавливался на беспилотном летательном аппарате (БПЛА) с использованием технологии снижения заметности.

Метод формирования виртуальной антенной решетки

Формирование виртуальной антенной решетки основано на характеристиках, которые измеряет реальная антенная решетка. Так, в нагрузках антенных элементов происходит измерение комплексных характеристик напряжения:

$$U_i(f) = A_i(f) \cdot \exp(j \cdot \varphi_i(f)), \quad (1)$$

где $A_i(f)$ – амплитуды напряжений, которые изменены в нагрузках антенных элементов; $\varphi_i(f)$ – фазы напряжений, которые измерены в нагрузках.

На основании конструкции пеленгатора производится привязка антенных элементов к координатам, а также присвоение к каждому соответствующих комплексных напряжений. На основании этого происходит аппроксимация электромагнитного поля с использованием функции Ганкеля первого рода:

$$E(x_0, y_0) = H^{(1)}\left[0, k_0 \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}\right], \quad (2)$$

где $H^{(1)}$ – функция Ганкеля первого рода; k_0 – волновое число; x, y – координаты антенных элементов реальной антенной решетки;

x_0, y_0 – координаты элементов аппроксимации (Виртуальная антенная решетка).

Далее на основании этого находятся напряжения на антенных элементах ВАР, после чего выполняется пеленгация. Данный алгоритм ВАР имеет преимущество над алгоритмами MUSIC и root-MUSIC в том, что обладает большей скоростью расчетов, а также не требует информации об опорном сигнале. Рассмотрим применение данного алгоритма для пеленгатора, установленного на БПЛА.

Моделирование использования предложенного алгоритма ВАР

Исследуемая модель БПЛА с комплексом пеленгации приводится на рис. 1.

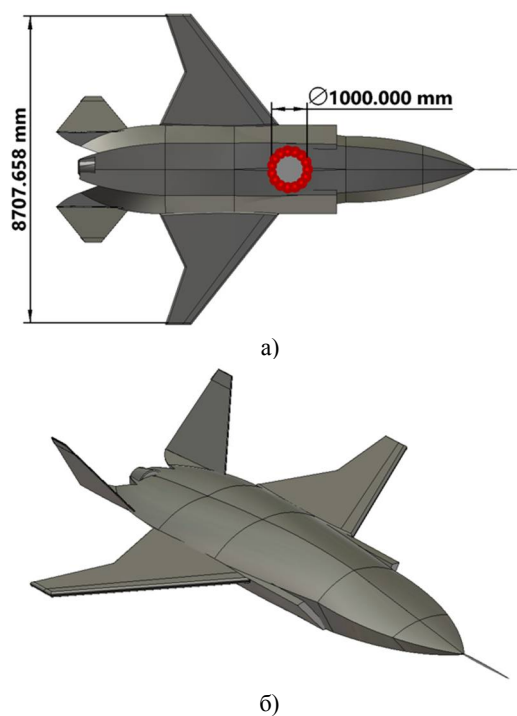


Рис. 1. Модель исследуемого БПЛА с комплексом пеленгации: а) вид снизу; б) 3D-модель БПЛА

Как видно, конструкция БПЛА выполнена на основе технологий повышения скрытности, что приводит к ухудшению точности пеленгации на основе реальной антенной решетки. Вид того, насколько искажены характеристики ЭМВ после отражения от БПЛА можно отследить на основе картины моностатической эффективной площади рассеяния (ЭПР) – рис. 2.

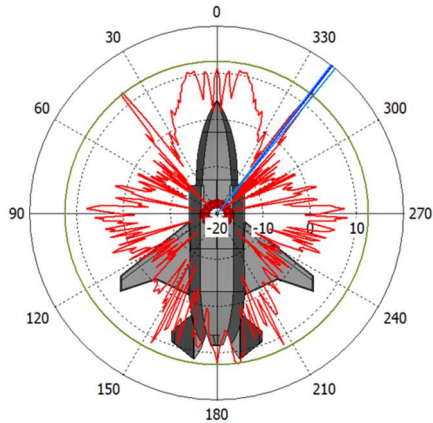


Рис. 2. Моностатическая ЭПР исследуемого БПЛА

Как видно по картине ЭПР БПЛА из-за особой формы корпуса возникают серьезные искажения характеристик электромагнитных

волн – «изрезанность» ЭПР, особенно отчетливо это заметно в диапазоне углов от 90 до 180 градусов, при этом радиус аппроксимации поля (радиус ВАР) составляет 650 мм, число элементов ВАР – 15.

На основании выбранной модели произведем исследование возможности использования виртуальной антенной решетки, которая формируется на основе метода функции Ганкеля, для повышения точности пеленгации. Моделирование производилось путем облучения модели плоской волной от 0 до 180 градусов с шагом в 10 градусов. На рис. 3 приводятся картины пеленгов для углов падения в 10°, 40°, 90°, а в таблице приводятся статистические показатели пеленга.

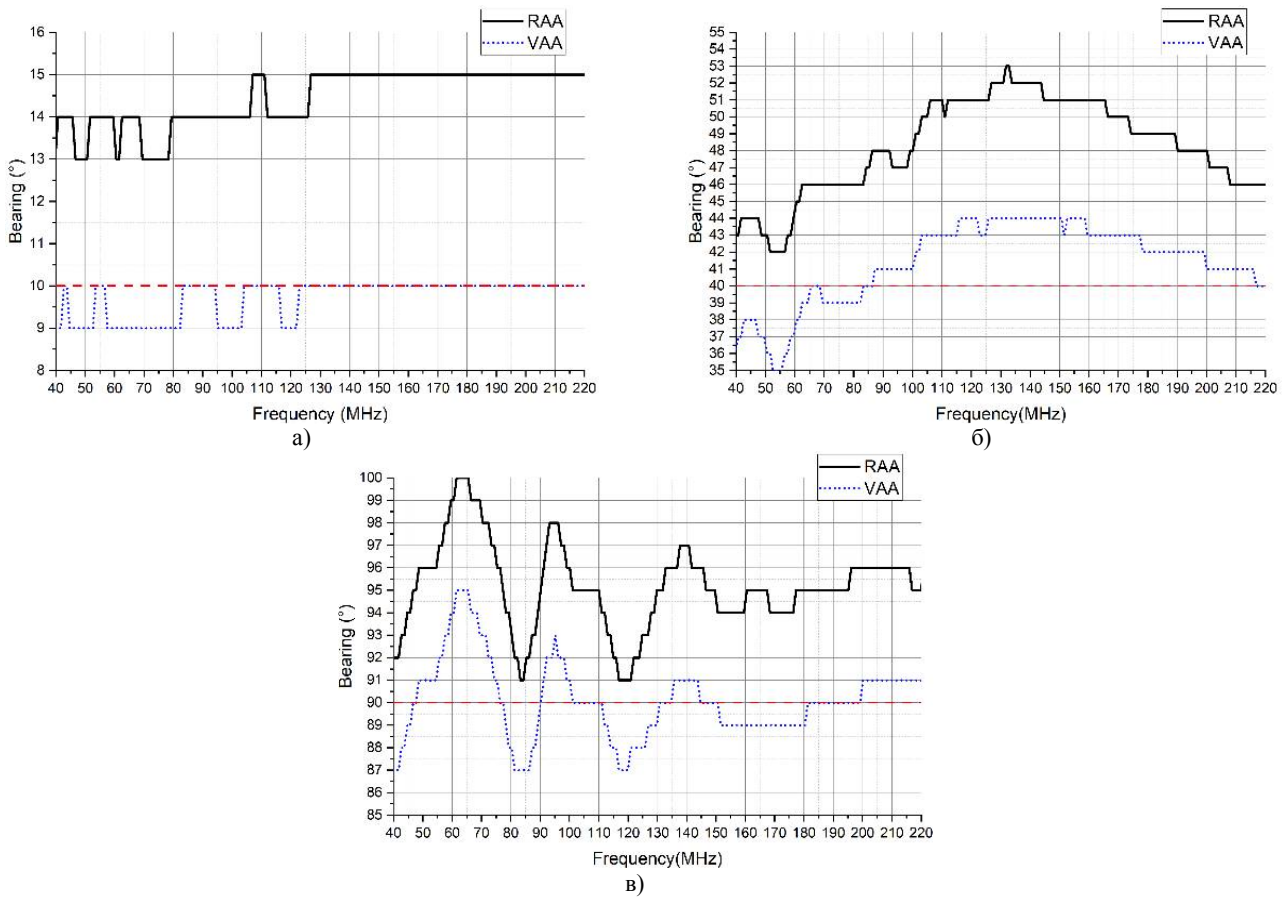


Рис. 3. Картины пеленгов для реальной (RAA) и виртуальной (VAA) антенных решеток (40-220 МГц): а) истинный пеленг 10°, б) истинный пеленг 40°, в) истинный пеленг 90°

Статистические показатели пеленгации
с использованием ВАР и РАР

Пеленг, °	Мат. ож. РА Р, °	Мат. ож. ВАР, °	с.к.о. РАР	с.к.о. ВАР	Ош. пеленга РАР, °	Ош. пеленга ВАР, °
0	0	0	0	0	0	0
10	14	10	4.5	0.5	4.4	0.28
20	21	20	1.5	1.1	1.28	0.9
30	35	31	5.71	1.9	5.3	1.7
40	48	41	8.6	2.7	8.2	2.3
50	55	51	6.5	2.9	5.4	2.4
60	62	61	4.21	2.9	3.1	2.1
70	72	70	3.3	2.4	2.1	1.6
80	87	84	7	4	6.7	3.7
90	95	90	5.52	1.7	5.2	1.3
100	100	100	1.7	1.4	1.4	1.1
110	109	109	3	2.5	2.2	1.8
120	123	119	5.06	3.42	4.5	2.7
130	132	128	4.57	3.72	4.1	2.9
140	137	141	4.968	2.962	4.101	2.307
150	147	149	4.37	2.55	3.92	1.9
160	163	159	3.87	1.9	3.243	1.58
170	175	170	4.9	0.99	4.76	0.61
180	180	180	0	0	0	0
ср.	----	----	4.17	2.08	3.68	1.64

Как видно по полученным результатам, применение технологии виртуальных антенных решеток позволяет снизить среднеквадратическое отклонение пеленгации в 2 раза, а ошибка пеленга уменьшилась в 2.24 раза. Таким образом, можно сделать вывод, что использование аппарата теории виртуальных антенных решеток позволяет повысить точность пеленгации даже в сложных задачах, когда носитель имеет особую геометрическую форму.

Заключение

Полученные в процессе исследования результаты показали, что использование технологии виртуальных антенных решеток позволяет повысить точность пеленгации благодаря выполнению аппроксимации напряжений, которые измеряет реальный комплекс радиопеленгации. Также можно сделать вывод, что использование метода формирования ВАР на основе функции Ганкеля позволяет повысить скорость расчетов, а также получить требуемые значения пеленгации.

Литература

1. Virtual Multiantenna Array for Estimating the Direction of a Transmitter: System, Bounds, and Experimental Results / F. Quitin, P. De Doncker, F. Horlin, W. P. Tay // IEEE Transactions on Vehicular Technology. 2018. Vol. 67. No. 2. Pp. 1510-1520.
2. Direction of arrival estimation with arbitrary virtual antenna arrays using low cost inertial measurement units / M.A. Yaqoob, F. Tufvesson, A. Mannesson, B. Bernhardsson // 2013 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC). 2013. Pp. 79-83.
3. Optimization of Virtual Array Element Position for Sparse Array Based on Particle Swarm Algorithm / X. Chen, X. Yang, F. Xu, M. Lu // 2019 IEEE International Conference on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP). 2019. Pp. 1-4.
4. Wang W.Q. Virtual Antenna Array Analysis for MIMO Synthetic Aperture Radars // International Journal of Antennas and Propagation. 2012. Vol. 2012. Article ID 587276. 10 p.
5. Joint Estimation Method for Frequency and DOA of Virtual Antenna Array in Space-Time Domain / M. Zuo, S. Xie, Y. Li, C. Zhang // 2019 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. China (ACES). 2019. Pp. 1-2.

Поступила 10.03.2022; принята к публикации 16.06.2022

Информация об авторах

Ищенко Евгений Алексеевич – инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

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 НПП «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); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

Чернованенко Игорь Александрович – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: chernovnanenko2000@mail.ru

APPLICATION OF VIRTUAL ARRAY TECHNOLOGY TO INCREASE THE ACCURACY OF AIR-BASED DIRECTION FINDER

E.A. Ishchenko¹, Yu.G. Pasternak¹, V.A. Pendyurin², S.M. Fyedorov^{1,3},
I.A. Chernoiivanenko¹

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Research and Production Enterprise "Automated Communication Systems", Voronezh, Russia

³International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the article considers an airborne passive radio direction finder, which is installed on an unmanned aerial vehicle using stealth technologies. Thanks to the use of virtual antenna array technology, as simulation results show, it is possible to improve the direction-finding accuracy, so the error and the standard deviation of the bearing decreased by more than 2 times. Based on all the studies conducted, it can be concluded that the use of virtual antenna array technology has made it possible to reduce the distortions introduced by the housing, which seriously distorts the characteristics of the electromagnetic field. Thanks to the use of the Hankel function in the process of formation (it can be used as a fundamental solution of the Helmholtz equations) of a virtual antenna array, it is possible to increase the speed of calculations, as well as solve the problem of the lack of a reference signal in the process of forming a virtual antenna array. Field approximation, which is based on the use of the Hankel function, has high accuracy, and also reduces the influence of surrounding surfaces that distort the characteristics of electromagnetic waves. Thus, it can be said that the use of the apparatus of virtual antenna arrays based on the field characteristics measured by a real radio direction finder makes it possible to improve the direction-finding characteristics, which is an important and urgent task in passive radio direction finding

Key words: virtual antenna array (VAA), direction finding, unmanned aerial vehicle (UAV)

Acknowledgments: this research was funded by Russian Science Foundation, grant no. 19-79-10109

References

1. Quitin F., De Doncker P., Horlin F., Tay W P. "Virtual multiantenna array for estimating the direction of a transmitter: system, bounds, and experimental results", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2018, vol. 67, no. 2, pp. 1510-1520.
2. Yaqoob M.A., Tufvesson F., Mannesson A., Bernhardsson B. "Direction of arrival estimation with arbitrary virtual antenna arrays using low-cost inertial measurement units", *2013 IEEE Int. Conf. on Communications Workshops (ICC)*, 2013, pp. 79-83.
3. Chen X., Yang X., Xu F., Lu M. "Optimization of virtual array element position for sparse array based on particle swarm algorithm", *2019 IEEE Int. Conf. on Signal, Information and Data Processing (ICSIDP)*, 2019, pp. 1-4.
4. Wang W.Q. "Virtual antenna array analysis for MIMO synthetic aperture radars", *Int. J. of Antennas and Propagation*, 2012, vol. 2012, Article ID 587276, 10 p.
5. Zuo M., Xie S., Li Y., Zhang C. "Joint estimation method for frequency and DOA of virtual antenna array in space-time domain", *2019 Int. Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - China (ACES)*, 2019, pp. 1-2.

Submitted 10.03.2022; revised 16.06.2022

Information about the authors

Evgeniy A. Ishchenko, engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

Yuriy G. Pasternak, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia); e-mail: pasternaky@mail.ru

Vladimir A. Pendyurin, General Director, JSC RPE "Automated Communication Systems" (of. 415, 108 Peshe-Streletsкая 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), 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>

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

МЕТОДИКА АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ ЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ К ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ПОМЕХАМ

М.А. Ромащенко, Д.В. Васильченко, Д.А. Пухов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описан способ обработки сигналов, поступающих от тестируемого устройства в процессе его проверки на воздействие электромагнитных помех (ЭМП). Практическое решение вопроса определения потенциально уязвимых мест конструкции, как правило, сводится к аналитической оценке данных эксперимента и выдаче заключения о пригодности исследуемого электронного средства к дальнейшему использованию. Сама же аналитическая оценка, позволяющая определить сбои в работе электронного средства, на данный момент может быть произведена только через субъективную экспертную оценку. Это вызывает дополнительную погрешность, связанную с влиянием человеческого фактора на результаты. Предлагаемое решение заключается в разработке автоматизированного способа обнаружения критических мест в конструкции. Данный подход основан на оценке влияния помех на электронные устройства в процессе проведения тестирования с использованием программно-аппаратного комплекса. Алгоритм работы основывается на поиске отклонений в получаемых выходных данных тестируемого изделия и дальнейшей детальной обработки и автоматическом выявлении причин их возникновения, которое строится на базе алгоритмов линейной классификации и нейронных сетей

Ключевые слова: электромагнитная совместимость, электромагнитное излучение, электромагнитные помехи, испытания, тестирование, обработка результатов, повышение качества, нейронные сети

Введение

Для проведения тестирования электронных средств на воздействие электромагнитных помех необходимо с достаточной точностью оценивать отклонения измеряемых сигналов от заявленной производителем нормы. Помимо точности измерения аналоговых сигналов, а также точности декодирования цифровых, одной из основных задач является фиксация отклонений и их ассоциация с внешним эффектом, вызвавшим это влияние. Поскольку в начале эксперимента производится установка его параметров в программном обеспечении, а также эталонных параметров, заданных производителем, программный комплекс обладает достаточным количеством исходной информации, необходимой для определения нормального функционирования тестируемого образца. Исходя из того, что начальные условия являются исчерпывающими, основной задачей остается правильное определение возникающих отклонений, их последующая фильтрация и сопоставление с возможной причиной их возникновения [1].

Алгоритм получения данных от испытываемого устройства

Данные от программно-аппаратного комплекса [2] поступают в базу данных (БД), где сохраняются с целью последующей обработки. Процесс записи значений в БД является стандартным и представляет собой привязку к времени поступающих на вход ПК по цифровому интерфейсу данных и последующим сохранением в таблице. Каждому набору данных присваивается соответствующая характеристика в зависимости от типа измеренного значения. Все данные в таблице структурированы и имеют уникальный идентификатор, по которому к ним производится обращение в процессе их обработки. Все данные защищены от перезаписи и сохраняются в отдельный защищенный файл. Алгоритм сохранения приведен на рис. 1 и является полностью синхронизированным по времени приложения воздействий и записи данных в БД. Каждое действие комплекса имеет свой временной штамп, который записывается в журнал, ассоциируется с данными в каждом цикле измерения и сохранения [3].

Четкое соблюдение временной точности необходимо для уменьшения вероятности возникновения наложения данных от различных воздействий и переходных процессов, происходящих во время тестирования и работы

устройства. После завершения данного этапа происходит дальнейшая обработка полученных данных и поиск отклонений.

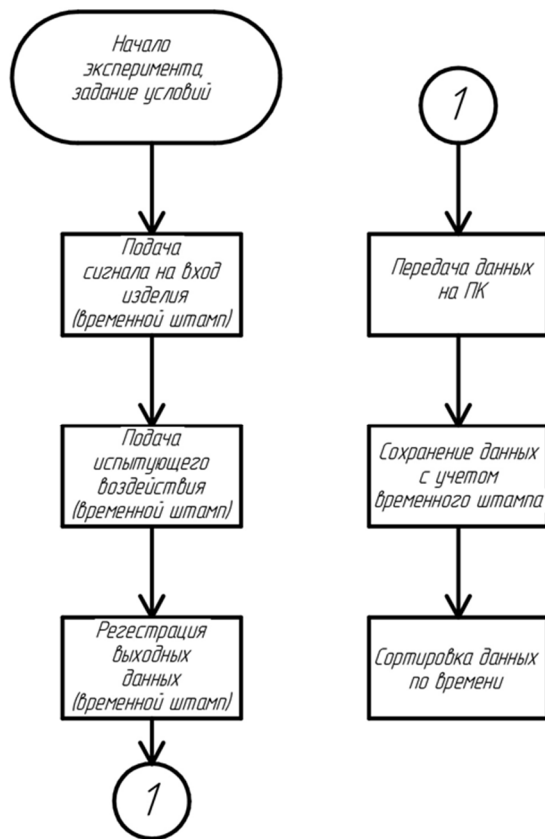


Рис. 1. Алгоритм сохранения данных в программный комплекс

Алгоритм поиска отклонений в полученных данных

Основной задачей, на решение которой направлена разработка процедуры – нахождение потенциально уязвимых, с точки зрения ЭМС, мест в конструкции электронного средства по результатам проводимого тестирования. Поскольку основными признаками возможных ошибок конструкции являются данные о работе устройства в различной электромагнитной обстановке, необходимо организовать их правильную обработку и поиск возможных ошибок в значениях выходных параметров. Под ошибкой в данном случае, следует понимать отклонение измеряемых значений от эталонных, которые заявляет производитель устройства. Ошибка полученных данных учитывает погрешности измерительных каналов, которая заносится в ПО на стадии задания начальных условий эксперимента. В общем случае ошибкой измерений будет являться

разность значений эталонного выхода устройства при известных параметрах на его входе относительно измеренного. Ошибка измерений вычисляется по формуле 1.

$$e = x_3 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (1)$$

где x_3 – эталонное значение на выходе; x_i – среднее измеренное значение на временном промежутке.

Измерение производится на небольшом временном промежутке для исключения влияния переходных процессов, которые записываются и учитываются отдельно. В случае, если ошибка превышает определенный порог погрешности измерений, она считается существенной и подвергается дальнейшей обработке.

Под такой обработкой понимается оценка влияния текущего воздействующего излучения на испытуемое устройство. Параметры воздействующего сигнала вместе с измеренными выходными значениями записываются в БД эксперимента и в дальнейшем используются для определения характеристик поля, имеющих наибольшее влияние на работу устройства [4].

Алгоритм ассоциации ошибки и вызвавшей её причины

Для ассоциации полученных значений наводимого на испытуемое изделие ближнего поля и возможных причин возникновения ошибки используется классификатор. В качестве классификатора выступает нейронная сеть, принимающая данные эксперимента, которые привели к возникновению ошибки. Далее сеть обрабатывает полученный набор, пропуская их через линейный классификатор. В общем виде формула классификации выглядит следующим образом:

$$a(x, w) = \operatorname{argmax}_{y \in Y} \sum_{j=1}^n w_j f_j(x) - w_0 = \operatorname{argmax}_{y \in Y} \langle x, w \rangle, \quad (2)$$

где w_j – вес j -го признака; w_0 – порог принятия решения; f_j – числовой признак класса.

Под классами понимается конкретный эффект, возникающий в результате воздействия на устройство электромагнитного поля. Полученный алгоритм обработки имеет вид, представленный на рис. 2.

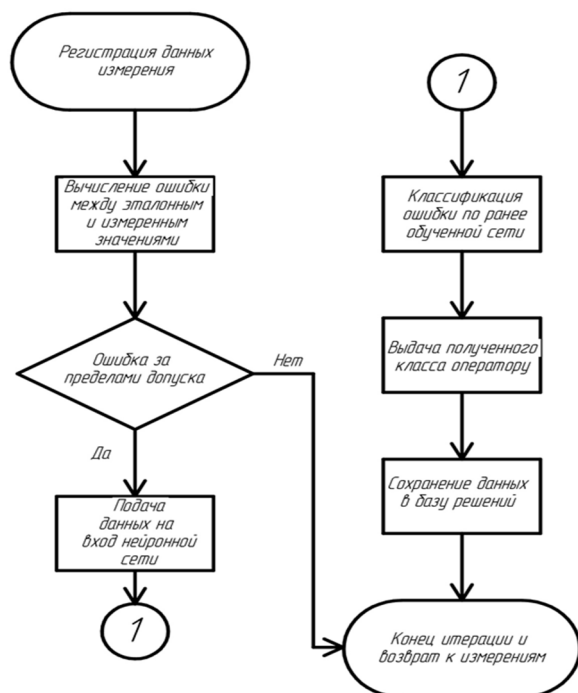


Рис. 2. Алгоритм классификации ошибок

В случае, если ошибка не выходит за рамки погрешности, производится возврат к измерениям.

Полученные классифицированные значения по каждому эксперименту сохраняются в отдельной БД решений, где в последующем обрабатываются и проверяются оператором для улучшения результатов и дополнительного обучения сети.

Обучение алгоритма линейной классификации производится с применением заранее подготовленных наборов экспериментальных данных, в которых «размечены» заведомо ошибочные зависимости. В качестве метода обучения применяется метод минимизации эмпирического риска. Данный метод заключается в сведении функции к максимально возможной минимизации возникающей ошибки на обучающей выборке. Для расчёта численных значений используется функция потерь $L = (y, y')$. На ряду с функцией потерь вводится модель алгоритмов вида $A = \{a: X \rightarrow Y\}$, в рамках которой ведётся поиск отображения, приближающего неизвестную целевую зависимость. В общем виде функция эмпирического риска записывается в следующем виде:

$$Q(a, X^m) = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}. \quad (3)$$

Сама минимизация риска заключается в поиске алгоритма, который позволяет найти минимальное значение функции, в заданной модели A . Данная целевая функция имеет вид:

$$a = \left\{ \operatorname{argmin}_{a \in A} Q(a, X^m) \right\}. \quad (4)$$

В качестве обучающей функции для модели в разработанном программном обеспечении используется функция однослойного перцептрона (5).

$$[M < 0] \leq \frac{2}{1 + e^{aM}} \quad (5)$$

График обучения модели, позволяющего классифицировать два сигнала – правильный и «с отклонениями», представлен на рис. 3. В процессе обучения на выборке данных в 100 измерений (50 заведомо правильных и 50 «с отклонениями») были получены данные, которые позволяют судить о сходимости модели классификатора и возможности его использования в задачах определения возможных неточностей в устройствах в процессе их проектирования.

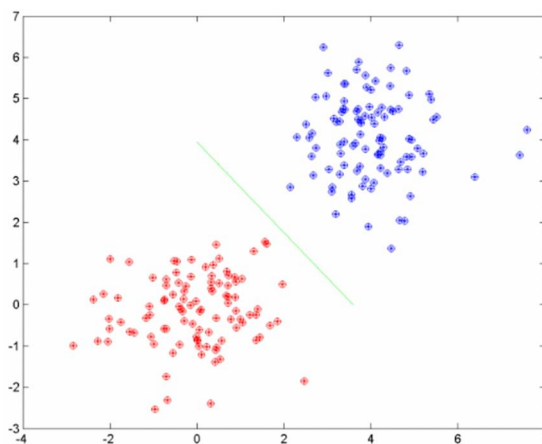


Рис. 3. Графические результаты работы классификатора

Используя данный набор функций, производится обработка обучающей выборки и корректировка весовых коэффициентов с целью получения максимально точного результата при вариации данных. Точность работы алгоритма обучения зависит от следующих факторов:

- качества разметки обучающей выборки;
- размера обучающей выборки;
- количества итераций обучения;

– сложности обучающей модели.

В случае, если выборка имеет малый размер и недостаточное качество разметки, корректировка весовых коэффициентов приведет к неверным показателям при вариации. В связи с этим предъявляются определенные требования к размерам и качеству размеченных обучающих данных. Так, желательный размер обучающей выборки для значений должен составлять не менее 1000 пар значение – класс. Качество выборки должно быть максимально приближенным к 100%, что подразумевает практически полное попадание соотношения значение – класс в зону классификации того или иного отклонения. Чрезмерное количество итераций обучения приводит к появлению эффекта переобучения сети, который заключается в значительном увеличении ошибки на валидационной выборке относительно обучающей. Переобучение возникает также в случае использования сложного алгоритма обучения, который может быть не применим к текущему набору данных.

Математический аппарат программного обеспечения, которое производит обработку сигналов, использует линейный классификатор для выделения из набора данных определенных признаков. Данные признаки позволяют соотнести поведение сигнала в условиях воздействия электромагнитных помех к конкретному классу вызвавшей появление данного признака неисправности и/или неточности при проектировании.

Вывод

Разработанный подход позволяет оценить ошибки, которые могут возникать в процессе воздействия различных электромагнитных излучений на испытуемое электронное средство. Использование нейронных сетей в качестве классификатора обеспечивает улучшение точности работы алгоритма в процессе набора экспериментальных данных и дополнительного обучения нейронной сети. Основным преимуществом использования данного алгоритма является повышение точности определения причин возникновения неисправности, а также автоматизация процесса тестирования электронных средств на воздействие электромагнитных помех.

Литература

1. Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Рожненко С.Н. Методика оценки влияния электромагнитных помех на функционирование электронных средств в процессе их проектирования // Радиотехника. 2021. Т. 85. № 6. С. 57-61.
2. Васильченко Д.В., Неклюдов А.Л., Ромашенко М.А. Программно-аппаратный комплекс тестирования электронных средств на воздействие электромагнитных помех // Радиолокация, навигация, связь: сб. тр. XXVI Междунар. науч.-техн. конф., 2020. С. 386-391.
3. Методика формирования испытательных сигналов для оценки устойчивости электронных средств к ЭМП / М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, С.Н. Рожненко, Ю.С. Балашов // Радиотехника. 2020. Т. 84. № 6 (12). С. 19-23.
4. Разработка модулей калибровки комплекса оценки влияния электромагнитных помех на электронные средства / Д.А. Пухов, А.В. Суворин, Д.В. Васильченко, М.А. Ромашенко // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 6. С. 95-99.

Поступила 29.03.2022; принята к публикации 16.06.2022

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kipr@vorstu.ru

Васильченко Дмитрий Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Shadow951@bk.ru

Пухов Дмитрий Анатольевич – студент, Воронежский государственный технический университет (394006, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

THE METHOD OF AUTOMATED ASSESSMENT OF THE STABILITY OF ELECTRONIC MEANS TO ELECTROMAGNETIC INTERFERENCE

M.A. Romashchenko, D.V. Vasil'chenko, D.A. Pukhov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper describes a method for processing signals coming from the device under test during its testing for electromagnetic interference (EMI). The practical solution to the problem of determining the potentially vulnerable places of the structure, as a rule, is reduced to an analytical assessment of the experimental data and the issuance of a conclusion on the

suitability of the studied electronic means for further use. The analytical assessment itself, which makes it possible to determine failures in the operation of an electronic tool, at the moment can only be made through a subjective expert assessment. This causes an additional error associated with the influence of the human factor on the results. The proposed solution is to develop an automated method for detecting critical places in the structure. This approach is based on the assessment of the impact of interference on electronic devices during testing using a hardware and software complex. The algorithm of operation is based on the search for deviations in the output data of the tested product and further detailed processing and automatic identification of the causes of their occurrence. Detection of occurrence is based on linear classification algorithms and neural networks

Key words: electromagnetic compatibility, electromagnetic radiation, electromagnetic interference, testing, testing, results processing, quality improvement, neural networks

References

1. Romashchenko M.A., Vasil'chenko D.V., Romanenko S.N. "Methodology for assessing the influence of electromagnetic interference on the functioning of electronic means in the process of their design", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2021, vol. 85, no. 6, pp. 57-61.
2. Vasil'chenko D.V., Neklyudov A.L., Romashchenko M.A. "Software and hardware complex for testing electronic means for the effects of electromagnetic interference", *Proc. of the XXVI Int. Sci. and Tech. Conf.: Radar, Navigation, Communication. (Radio-lokatsiya, navigatsiya, svyaz': sb. tr. XXVI Mezhdunar. nauch.-tekhn. konf.)*, 2020, pp. 386-391.
3. Romashchenko M.A., Vasil'chenko D.V., Romanenko S.N., Balashov Yu.S. "Methodology for forming test signals for assessing the stability of electronic means to EMF", *Radio Engineering (Radiotekhnika)*, 2020, vol. 84, no. 6 (12), pp. 19-23.
4. Pukhov D.A., Suvorin A.V., Vasil'chenko D.V., Romashchenko M.A. "Development of calibration modules for assessing the effect of electromagnetic interference on electronic devices", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 6, pp. 95-99

Submitted 29.03.2022; revised 16.06.2022

Information about the authors

Mikhail A. Romashchenko, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kivr@vorstu.ru

Dmitriy V. Vasil'chenko, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Shadow951@bk.ru

Dmitriy A. Pukhov, student, Voronezh State Technical University, (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: puhov.dm22@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6818-2715>

УЛУЧШЕНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИМПУЛЬСНЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ ПУТЕМ ОПТИМИЗАЦИИ ВЫСОКОЧАСТОТНЫХ ПОТЕРЬ В ОБМОТКАХ МАГНИТНЫХ КОМПОНЕНТОВ

Н.Ю. Веретенников, О.Ю. Денисов, А.В. Башкиров, О.Ю. Макаров

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: основным способом улучшения массогабаритных параметров импульсных источников питания является уменьшение габаритов магнитного компонента. Наиболее простым способом по уменьшению объема магнитного сердечника является повышение его рабочей частоты. Однако с повышением частоты преобразования магнитного компонента его эффективность может существенно снижаться вследствие возникновения высокочастотных потерь в сердечнике и медных проводниках. В данной работе рассмотрены основные механизмы возникновения высокочастотных потерь в обмотках магнитного компонента. Большинство инженеров при расчете импульсных трансформаторов учитывают только омические потери и потери на скин-эффект. Показано, что с увеличением частоты и количества слоев обмоток эффект близости имеет тенденцию становиться доминирующим в формировании потерь в меди. На примере расчета прямоходового трансформатора показана зависимость потерь в каждом слое обмотки от толщины проводника и частоты. На основе результатов математического моделирования предложен способ оптимизации потерь вмоточных изделиях без чередования обмоток с использованием формулы Дуэлла

Ключевые слова: вихревые токи, эффект близости, скин-эффект, оптимизация магнитных компонентов, высокочастотные магнитные компоненты, импульсные трансформаторы, расчет потерь в магнитных компонентах, метод Дуэлла

Введение

С повышением частоты преобразования, высокочастотные потери в обмотках магнитного компонента могут существенно превысить омические потери по постоянному току, при этом существенно ухудшив эффективность конечного изделия. В связи с этим наиболее актуальной становится проблема численного расчета и оптимизации потерь в магнитных компонентах, вызванных вихревыми токами.

Рассмотрим уединенный проводник цилиндрической формы, с протекающим в нем постоянным током или током низкой частоты. Если рассматриваемый проводник достаточно отдален от других проводников с током, то линии индукции магнитного поля \vec{B} , как и их производная $\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$, образуют concentрические окружности с центром на оси проводника. При этом их форма не будет зависеть от изменяющейся силы тока.

При относительно низкой частоте скин-эффект еще не проявляет себя в достаточной степени, а ток распределен равномерно по сечению проводника. Поскольку омические потери по постоянному току значительно превы-

шают потери по переменному току, то для снижения общей рассеиваемой мощности в проводнике достаточно только минимизации его электрического сопротивления с целью уменьшения потерь по постоянному току.

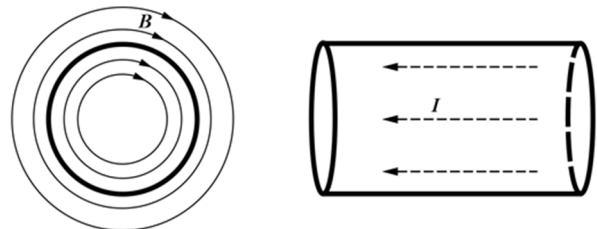


Рис. 1. Распределение поля в цилиндрическом проводнике на низкой частоте

С повышением частоты тока в проводнике всё большую роль начинает играть электромагнитная индукция. Под действием резко изменяющегося магнитного поля в проводнике создается электрическое поле

$$\text{rot } \vec{E} = - \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

силовые линии которого замыкаются по окружности вокруг линий магнитного поля (рис. 2). При этом направление вектора напряженности электрического поля \vec{E} совпадает с направлением движения тока у поверхности

Пусть по трем слоям обмотки дросселя протекает суммарный ток 1 А. В наружной части первого слоя поле отсутствует и магнитодвижущая сила F равна нулю, аналогично ситуации на рис. 3. Так как в первом слое обмотки протекает ток в 1 А, то магнитодвижущая сила

$$F = \oint Hdl = NI \quad (3)$$

между первым и вторым слоем равна одному ампер-витку. Вследствие эффекта близости ток протекает только со стороны поля на глубине проникновения δ .

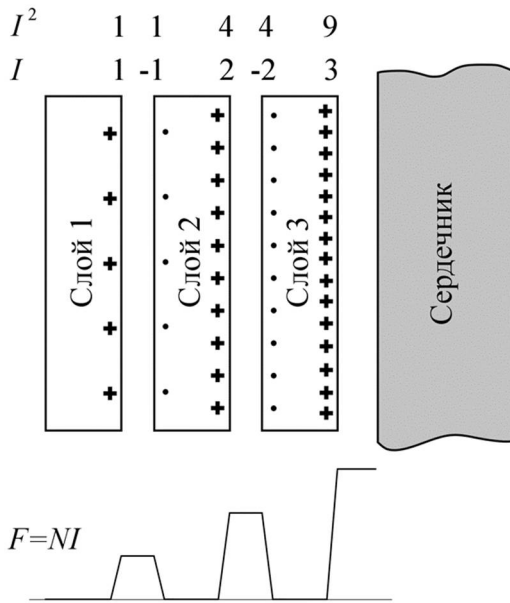


Рис. 4. Проявление эффекта близости в многослойных обмотках дросселя

На наружной поверхности второго слоя присутствует вихревой ток противоположной направленности, созданный высокочастотным током, протекающим в первом слое. Однако суммарный ток в проводнике должен быть равен 1 А, а суммарное поле внутри проводника равно нулю. Следовательно, в правой части второго слоя тоже возникает вихревой ток, который складывается с током проводимости. Таким образом, магнитодвижущая сила на границе между вторым и третьим слоем равна двум ампер-виткам, согласно формуле (3). То есть ток на внутренней поверхности второго слоя уже равен 2 А. Так как рассеиваемая мощность пропорциональна квадрату токов, то можно сделать вывод, что во втором слое вследствие эффекта близости рассеивается в 5 раз большая мощность, чем в первом.

Аналогично во внешней стороне третьего слоя будет протекать вихревой ток 2 А, направ-

ленный противоположно вихревому току на внутренней стороне второго слоя. Магнитодвижущая сила на внутренней стороне слоя возрастает до 3 ампер-витков, увеличивая ток на внутренней стороне слоя до 3 А. При этом рассеиваемая мощность будет уже в 13 раз больше, чем в первом слое обмотки.

Видно, что во внутренних слоях обмоток потери в меди существенно возрастают, вследствие усиления поля на границах между слоями. Следовательно, с увеличением числа слоев и ростом частоты протекающего тока, эффект близости начинает играть все большую роль [1, 3, 5, 6] в формировании потерь в обмотках силовых трансформаторов и дросселей.

Результаты расчетов

Рассмотрим трансформатор с двумя слоями первичной и двумя слоями вторичной обмотки, по 11 витков в каждом слое. Как показано на рис. 5, магнитодвижущая сила, и как следствие, потери, будет расти с каждым последующим слоем первичной обмотки, аналогично случаю с дросселем на рис. 4, и достигать своего максимума на границе между первичной и вторичной обмоткой.

В качестве примера для расчета проанализируем потери для следующей формы тока (рис. 6). Разложим токовый сигнал в ряд Фурье и воспользуемся формулой Доуэлла (4) для каждой полученной гармонике тока [7, 8], найдя отношение сопротивлений по постоянному и переменному току на каждой частоте.

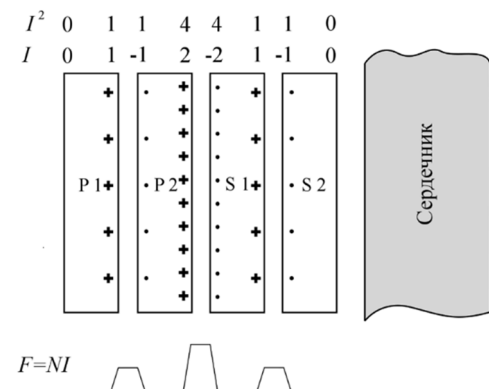


Рис. 5. Распределение поля в силовом трансформаторе

$$Fr_i = \frac{R_{ac i}}{R_{dc}} = \Delta_i \left[\frac{\text{sh}(2\Delta_i) + \sin(2\Delta_i)}{\text{ch}(2\Delta_i) - \cos(2\Delta_i)} + \frac{2(p^2 - 1) \text{sh}(\Delta_i) - \sin(\Delta_i)}{3 \text{ch}(\Delta_i) + \cos(\Delta_i)} \right] \quad (4)$$

где p — количество слоев в каждой обмотке, $\Delta_i = \frac{d}{\delta_i}$ — отношение толщины проводника d к толщине скин-слоя на частоте i -й гармоники.

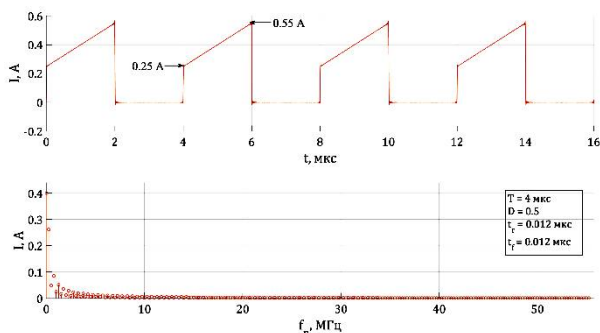


Рис. 6. Ток в трансформаторе и его спектр

Просуммировав по гармоникам, сможем найти общие потери на вихревые токи в каждой обмотке:

$$P_{ac} = \sum_{i=0}^n (NI_i)^2 R_{dc} Fr_i, \quad (5)$$

Для более наглядного представления нормируем полученную мощность на мощность, рассеиваемую в проводнике с толщиной δ .

$$K_r = \frac{P_{ac}}{I_{rms}^2 R_{dc} |_{d=\delta}} = \frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 Fr_i}{I_{rms}^2 \Delta}, \quad (6)$$

где I_{rms} — среднеквадратичный ток в обмотке трансформатора, а I_i — среднеквадратичный ток для i -й гармоники.

Формула (6) показывает отношение сопротивления по переменному току к сопротивлению по постоянному току проводника, толщиной, равной глубине проникновения δ , и позволяет наглядно оценить влияние эффекта близости на формирование потерь при различных частотах и толщине провода [8].

На рис. 7 представлены результаты расчетов нормированного коэффициента сопротивления (6) для данного трансформатора. Видно, что графики K_r полностью совпадают для слоев P1 и S2, а также для P2 и S1, так как эти обмотки находятся в одинаковом поле (рис. 5) и эффект близости проявляется в них одинаково.

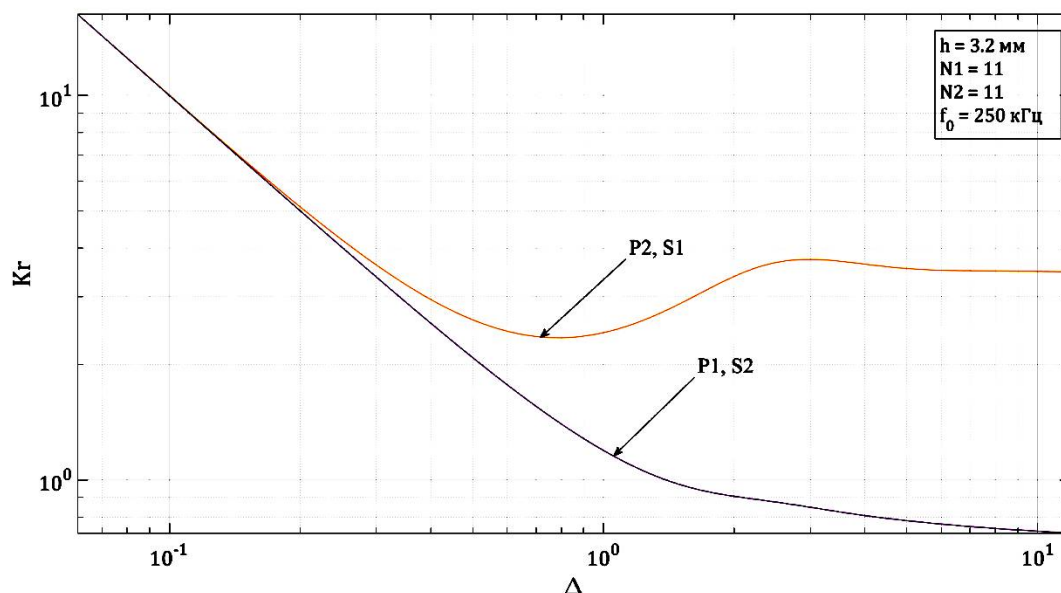


Рис. 7. Нормированный коэффициент сопротивления

При низких частотах ($d \ll \delta$) скин-эффект еще не проявляет себя в должной мере, и ведущую роль играют потери по постоянному току. С повышением частоты или ростом толщины слоев потери в проводнике снижаются, но вскоре

начинают расти вследствие усиления скин-эффекта и увеличения сопротивления по переменному току. Видно, что для обмоток P2 и S1 образуется локальный минимум потерь, которому соответствует оптимальная толщина слоя d .

При этом положение минимума существенно отклоняется от точки, в которой толщина проводника равна глубине проникновения ($\Delta = 1$), в сторону меньшей толщины проводника.

При дальнейшем увеличении частоты ($d \gg \delta$) кривые потерь выравниваются и уже не зависят от толщины слоя. Ток в проводнике распространяется только по его поверхности, и дальнейшее увеличение толщины слоя или частоты не приводит к изменению сопротивления.

Выводы

В данной работе были рассмотрены основные механизмы возникновения потерь в обмотках магнитных компонентов при высокочастотных токах. Показано, что с увеличением числа проводящих слоев эффект близости становится доминирующим в формировании потерь в обмотках.

В качестве примера был проведен расчет потерь по переменному току в трансформаторе прямоходового преобразователя с помощью формулы Доуэлла. При решении одномерной задачи [7] хорошо видно распределение потерь по проводящим слоям обмоток, а также локальные минимумы, соответствующие оптимальным значениям диаметра провода. По существенному увеличению потерь уже во втором слое, можно сделать заключение о необходимости учитывать эффект близости при проектировании трансформаторов даже на относительно низких частотах.

На основе полученных результатов можно выявить следующий алгоритм оптимизации потерь в обмотках точных изделий импульсных преобразователей:

1. Необходимо выбирать сердечник с большей высотой окна для уменьшения числа слоев обмоток.

2. Далее необходимо произвести решение оптимизационной задачи методом Доуэлла с последующим выбором толщины проводника.

Такой способ идеально подходит для оптимизации дросселей и простых трансформаторов с не чередующимися обмотками.

Другим путем снижения потерь, помимо оптимизации толщины проводников в точных изделиях, является чередование слоев обмоток с целью снижения поля на их границах и, как следствие, снижение потерь, вызываемых эффектом близости. Однако данный способ делает формулу Доуэлла неприменимой, что может существенно усложнить дальнейшую оптимизацию по толщине проводника, вынудив использовать специальные пакеты для расчетов в конечных элементах.

Литература

1. Kazimierzczuk M. High-Frequency Magnetic Components. John Wiley & Sons, Ltd, 2009. 508 p.
2. Матвеев А. Н. Электродинамика: учеб. пособие. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Высшая школа, 1980. 383 с.
3. Dixon L. H., Jr. Eddy Current Losses in Transformer Windings and Circuit Wiring // Texas Instruments. 2003.
4. Ridley R. Proximity Loss in Magnetics Windings // Switching Power Magazine. 2005.
5. Bennett E. Effective Resistance to Alternating Currents of Multilayer Windings / E. Bennett, S. C. Larson // Electrical Engineering. 1940. Vol. 59. Pp 1010 – 1016.
6. Солнышкин Н. И. Теоретические основы электротехники. Основы теории электромагнитного поля. Псков: Псковский государственный университет, 2013. 140 с.
7. Dowell P. L. Effect of Eddy Currents in Transformer Windings. IEE Proc., 1966. Pp. 1387 – 1394.
8. Carsten, B. High Frequency Conductor Losses in Switchmode Magnetics. HFPC '86 Record, Virginia Beach, VA, May 1986.

Поступила 22.04.2022; принята к публикации 16.06.2022

Информация об авторах

Веретенников Николай Юрьевич – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: Veretennikoff.nik@gmail.com

Денисов Олег Юрьевич – магистр, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: denivuk.oleg@yandex.ru

Башкиров Алексей Викторович – д-р техн. наук, заведующий кафедрой конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: fabi7@mail.ru, ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0939-722X>

Макаров Олег Юрьевич – д-р техн. наук, профессор кафедры конструирования и производства радиоаппаратуры, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: moy230@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2795-419X>

IMPROVING THE DESIGN AND ENERGY PARAMETERS OF SWITCHING POWER SUPPLIES BY OPTIMIZING HIGH-FREQUENCY LOSSES IN THE WINDINGS OF MAGNETIC COMPONENTS

N.Yu. Veretennikov, O.Yu. Denisov, A.V. Bashkirov, O.Yu. Makarov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the main way to improve the weight and size parameters of switching power supplies is to reduce the dimensions of the magnetic component. The simplest way to reduce the volume of the magnetic core is to increase its operating frequency. However, with an increase in the frequency of conversion of the magnetic component, its efficiency can significantly decrease, due to the occurrence of high-frequency losses in the core and copper conductors. In this paper, we considered the main mechanisms of occurrence of high-frequency losses in the windings of the magnetic component. Most engineers take into account only omic losses and skin effect losses when calculating pulse transformers. We show that with increasing frequency and number of winding layers, the effect of shortness tends to become dominant in the formation of losses in copper. We show the dependence of losses in each layer of the winding on the thickness of the conductor and frequency on the example of the calculation of a straight-line transformer. Based on the results of mathematical modeling, we propose a method for optimizing losses in winding products without alternating windings using the Dowell formula

Key words: eddy currents, proximity effect, skin effect, optimization of magnetic components, high-frequency magnetic components, pulse transformers, calculation of losses in magnetic components, Dowell method

References

1. Kazimirchuk M. "High-frequency magnetic components", John Wiley & Sons, Ltd, 2009, 508 p.
2. Matveev A.N. "Electrodynamics", textbook, Moscow: Vysshaya shkola, 1980, 383 p.
3. Dixon L.H. "Eddy current losses in transformer windings and electrical wiring", Texas Instruments, 2003.
4. Ridley R. "Proximity loss in magnetic windings", Switching Power Magazine, 2005.
5. Bennett E., Larson S.S. "Effective resistance to alternating currents of multilayer windings", *Electrical Engineering*, 1940, vol. 59, pp. 1010-1016.
6. Solnyshkin N.I. "Theoretical foundations of electrical engineering. Fundamentals of the theory of the electromagnetic field" ("Teoreticheskie osnovy elektrotehniki. Osnovy teorii elektromagnitnogo polya"), Pskov State University, 2013, 140 p.
7. Dowell P.L. "The influence of eddy currents in transformer windings", *IEE Proc.*, 1966, pp. 1387-1394.
8. Karsten B. "High-frequency losses in conductors in switchable magnets", Recording HFPC '86, Virginia, May 1986.

Submitted 22.04.2022; revised 16.06.2022

Information about the authors

Nikolay Yu. Veretennikov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Veretennikoff.nik@gmail.com

Oleg Yu. Denisov, MA, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: denivuk.oleg@yandex.ru

Aleksey V. Bashkirov, Dr. Sc. (Technical), Head of the Department of Design and Production of Radio Equipment, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: fabi7@mail.ru

Oleg Yu. Makarov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: moy230@yandex.ru

**ИДЕНТИФИКАЦИЯ РЕЧЕВЫХ ПАУЗ В УСЛОВИЯХ
СЛОЖНОЙ АКУСТИЧЕСКОЙ ПОМЕХОВОЙ ОБСТАНОВКИ****Р.С. Власов¹, И.А. Козлов¹, А.А. Афанасьев², А.В. Питолин³****¹Воронежский институт правительственной связи (филиал) Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Воронеж, Россия****²Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации, г. Орел, Россия****³Воронежский государственный технический университет г. Воронеж, Россия**

Аннотация: изложены материалы по исследованию возможностей определения пауз в речевом сигнале при условии акустического зашумления на входе микрофона. Необходимость в таких исследованиях обусловлена некорректной работой детектора голосовой активности при кодировании речи по алгоритму G.729. Данное обстоятельство не позволяет эффективно использовать избыточность РС, связанную с наличием пауз, в задачах повышения качественных показателей систем передачи речи. Причинами некорректной работы существующих детекторов голосовой активности является принятие паузы в речевом сигнале как стационарного случайного процесса. При отсутствии интенсивных помех распределение отсчетов неактивных участков речевого сигнала действительно носит квазистационарный характер. Однако в условиях интенсивных акустических шумов временные интервалы, на которых вероятностные характеристики не претерпевают значительных изменений, существенно меньше, чем средняя протяженность речевых пауз. Это не позволяет считать такие участки речевого сигнала квазистационарными. Тем не менее вероятностные распределения отсчетов, составляющих паузы в условиях ИАВ, и активных участков РС отличаются. Предлагается использовать данные отличия при идентификации пауз в условиях акустических шумов

Ключевые слова: речевой сигнал, акустический шум, последовательная статистика, критерий Вальда, речевая пауза

Введение

Качественная низкоскоростная передача речевого сигнала (РС) по цифровым системам передачи остается актуальной востребованной задачей. Для передачи по цифровым сетям связи РС подвергается компрессии в соответствии с одним из используемых алгоритмов. Одним из наиболее распространенных является стандарт G.729 и его модификации. В основе его работы лежит разделение (сегментация) последовательности цифровых отсчетов на кадры данных фиксированной длины, для каждого из которых определяются оптимальные параметры линейного предсказателя в условиях заданных ограничений.

Непременным фактором, сопутствующим процессу передачи РС в системах связи, является наличие акустических шумовых воздействий (рис. 1).

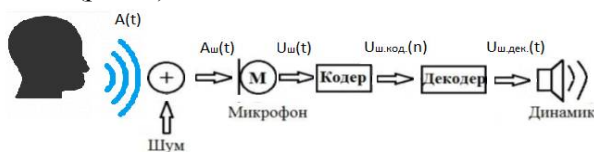


Рис. 1. Влияние акустических воздействий (шума) на процесс передачи речи

Большинство речевых кодеков, используемых в современных системах передачи данных, обеспечивают приемлемое качество передачи речи (I либо высший класс качества по ГОСТ Р 50840-95) только при отношении сигнал/шум (ОСШ) на входе кодека более 15 Дб. [1, 2]. Шумы на входе кодеков с ОСШ менее 15 Дб можно отнести к интенсивным акустическим воздействиям (ИАВ). Функционирование речевых кодеков в условиях ИАВ обеспечивает VI – II классы качества по ГОСТ Р 50840-95, что характеризуется заметным нарушением естественности и узнаваемости, а также искажениями речи [1, 3].

Естественный РС по своей природе обладает статистической избыточностью, наиболее ярким проявлением которой является наличие неактивных участков (пауз) между элементами речи. При отсутствии ИАВ на входе речевого кодека статистическая избыточность снижается за счет использования алгоритма обнаружения активности голоса (Voice Active Detector – VAD). Для улучшения качественных показателей функционирования VAD решается обратная задача, связанная с инициализацией наличия пауз в РС.

Постановка задачи

Особенности функционирования современных алгоритмов VAD рассмотрены в [2].

Основными классификационными признаками сегментации служат интервальная оценка от $-U_1$ до U_1 пороговой амплитуды или количество пересечений решающей функцией определенного порогового значения.

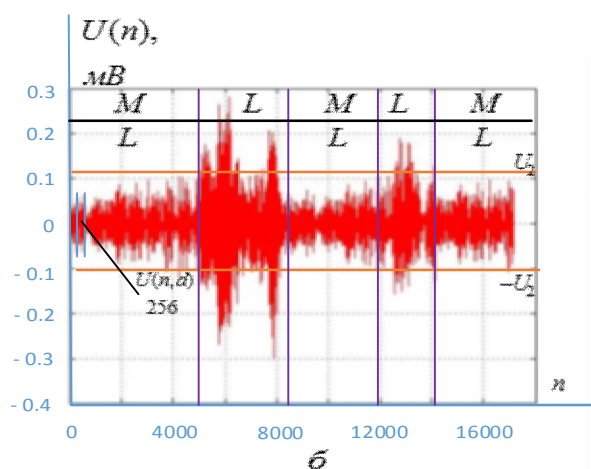
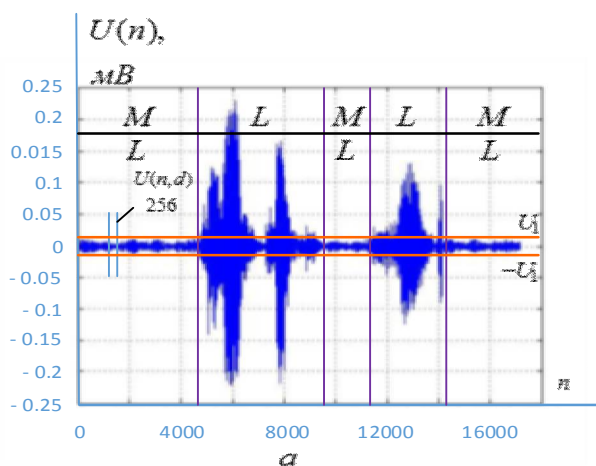


Рис. 2. Выделение сегментов паузы в существующих детекторах активности речи (пороговое значение мгновенной энергии сегмента)

На рис. 2, а изображен РС в условиях акустического воздействия с ОСШ 20 дБ.

Существуют решения по адаптации порогового значения U_2 , получаемого путем увеличения U_1 для случая сложной помеховой обстановки [2].

На рис. 2, б отражен РС в условиях акустического воздействия - шум вертолета (ОСШ 0 дБ). Значительное увеличение U_2 ведет к увеличению участков М, потенциально определя-

емых как пауза, и влечет за собой принятие решения вида - «ложная тревога», когда активные составляющие обрабатываемого РС будут ошибочно идентифицированы как сегменты пауз.

С учетом этого недостатка в [4, 5] предложены решения поиска сегмента паузы, которые основаны на вычислении точных значений долей энергии сегмента, попадающих в заданный частотный интервал.

В этом случае используется процедура обучения на основе анализа особенностей распределения долей энергии по частотным интервалам в паузе. Принадлежность сегмента анализа к паузе определяется на основе решающей функции:

$$S = \max \left(\frac{P_r}{P_r^{\text{II}}} \right), \forall r = 1, \dots, R, \quad (1)$$

где P_r – доли энергий, попадающих в заданные частотные интервалы; P_r^{II} – результаты предварительного усреднения по достаточно большому количеству отрезков сигнала, заведомо относящихся к паузам, долей энергий попадающих в заданный частотный интервал.

Если выполняется неравенство:

$$S > h_\alpha, \quad (2)$$

где h_α – порог, обеспечивающий заданный уровень вероятности ложной тревоги α на обучающей выборке, то основная гипотеза о наличии паузы отвергается, в противном случае принимается решение о наличии паузы.

Данный подход основан на равномерном характере распределения значений отсчетов фоновых шумов РС и допускает принятие решения типа «пропуск цели», т.е. ошибочное принятие решения о голосовой активности на сегменте при ОСШ менее 10 дБ [4]. В реальных условиях РС сложно аппроксимируется каким-либо известным параметрическим законом, что приводит к некорректной работе существующих алгоритмов VAD.

Как видно из рис. 3, в условиях ИАВ детектор активности VAD часто принимает решения о шуме во время голосового сеанса. Существующие технические решения по улучшению качества функционирования при низких ОСШ (≤ 15 дБ) связаны с минимизацией потерь информации об активной речи. С этой целью

изменяются условия обновления фонового шума и условия принятия решения о голосовой активности (рис. 4) [2].

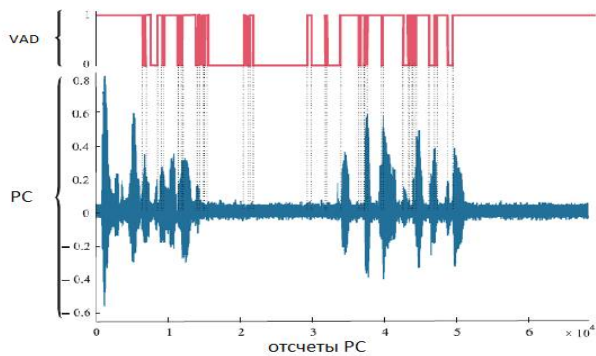


Рис. 3. Функционирование детектора активности речи

Таким образом, предпочтение отдается принятию решения вида «пропуск цели». В этом случае наиболее вероятным становится наступление ошибки первого рода.

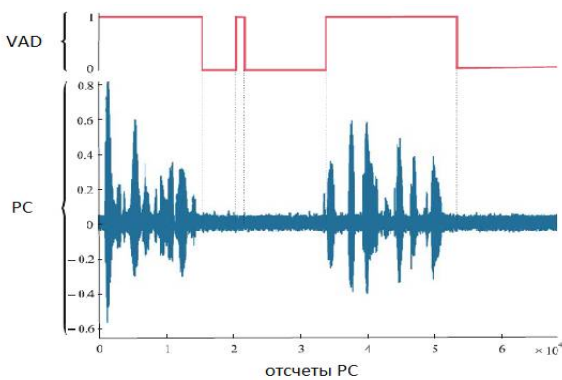


Рис. 4. Функционирование детектора активности речи с учетом внесенных изменений

Несмотря на то, что потери голосовой информации минимизированы, имеет место нежелательная производительность VAD на участках зашумленных пауз. При этом средняя длительность пауз PC колеблется в диапазоне от 25 до 600 мс, причем средняя длительность паузы во время телефонного разговора составляет 400 мс [6], что существенно превышает длительность сегмента анализа в кодеках PC. Данное обстоятельство не позволяет эффективно использовать избыточность PC, связанную с наличием пауз, в задачах повышения качественных показателей систем передачи речи (рис. 5).

Причинами некорректной работы существующих детекторов голосовой активности являются принятие паузы в PC как стационарного случайного процесса. При отсутствии ин-

тенсивных помех распределение отчетов неактивных участков PC действительно носит квазистационарный характер. Однако в условиях ИАВ временные интервалы, на которых вероятностные характеристики не претерпевают значительных изменений, значительно меньше, чем средняя протяженность речевых пауз, что не позволяет считать такие участки PC квазистационарными. Тем не менее вероятностные распределения отчетов, составляющих паузы в условиях ИАВ, и активных участков PC отличаются. То есть процедура идентификации пауз может быть основана на принципе обнаружения отличий вероятностного описания параметров сегментов активных речевых участков и пауз (рис. 5).

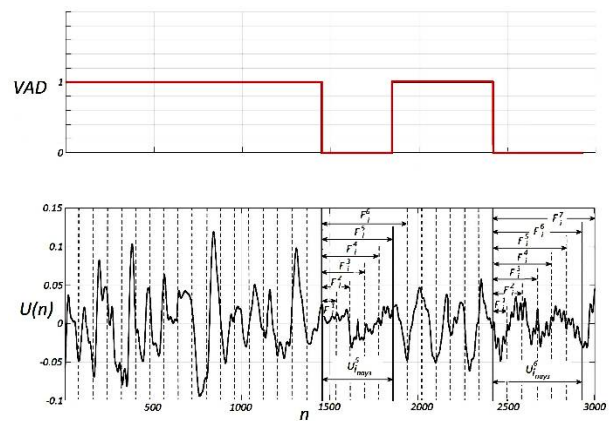


Рис. 5. Выделение паузы на основе вероятностных характеристик речевого сигнала

В режиме реального времени наблюдая за поступающими сегментами PC, необходимо постоянно анализировать принадлежность расширяющегося участка речи к определённой закономерности. При сохранении вероятностных характеристик нужно идентифицировать текущий сегмент как паузу, в противном случае останавливать расширение и начинать новое.

Математическая модель идентификации пауз на основе последовательного статистического анализа

Применительно к анализу PC аналитическое выражение, отражающее процесс идентификации сегментов паузы с учётом возможности ее дальнейшего расширения, показано в (3).

$$U_{i_{\text{пауз}}}^K = \{ \{U_i^1\} \cup \{U_i^2\} \cup \dots \cup \{U_i^k\} \cup \dots \{U_i^{K-1}\} \cup \{U_i^K\} \} \quad (3)$$

где i – порядковый номер неактивного участка РС (паузы), k – порядковый номер сегмента анализа в составе предполагаемой i -й паузы, $U_{i\text{пауз}}^K$ – i -я пауза, состоящая из K сегментов анализа.

Увеличение значения переменной k в выражении (3) осуществляется последовательно по результатам проверки основной и конкурирующих гипотез, которые описываются выражениями (4) и (5).

$$H_0 : F(U_{i\text{пауз}}^k) = F_i^k = F_i^0 \quad (4)$$

$$H_1 : F(U_{i\text{пауз}}^k) = F_i^k \neq F_i^1, \quad (5)$$

где F_i^k – функция плотности вероятности фрагмента i -й паузы, содержащего k сегментов анализа РС.

Отсутствие какой-либо степени периодичности на участках зашумленных пауз приводит к тому, что для принятия решения о характере распределения исследуемого участка необходимо более чем одно наблюдение над поступающими сегментами. Данное обстоятельство существенно осложняет использование классических (двухвариантных) методов проверки статистических гипотез. Количество наблюдаемых сегментов анализа РС, составляющих неактивный участок (паузу), является случайной величиной и зависит от исхода самих наблюдений. Применительно к цифровой обработке РС количество наблюдаемых сегментов для принятия решения должно быть минимально возможным. Это связано с рекомендациями Международного союза электросвязи по задержке РС при его передаче.

Наиболее подходящим математическим аппаратом для решения такого класса задач является последовательная проверка статистических гипотез, принципы которого изложены в [7]. Наиболее оптимальным с точки зрения количества наблюдений для практических целей является последовательный критерий отношения вероятностей (далее – критерий Вальда) [7]. Использование данного критерия предполагает идентификацию параметров вероятностного распределения наблюдаемых сегментов РС. Вероятностному анализу могут быть подвержены как непосредственно значения цифровых отсчетов (анализ во временной области), так и некоторые параметры РС, характеризующие его на длительном сегменте анализа.

В первом случае (анализ во временной области) выражение статистики критерия Вальда будет иметь вид (6):

$$\begin{aligned} & \ln \frac{L(U_{i\text{пауз}}^K, \theta_1)}{L(U_{i\text{пауз}}^K, \theta_0)} = \\ & = \ln \frac{f_1(u_{i\text{пауз}}^1) \times f_1(u_{i\text{пауз}}^2) \times \dots \times f_1(u_{i\text{пауз}}^k)}{f_0(u_{i\text{пауз}}^1) \times f_0(u_{i\text{пауз}}^2) \times \dots \times f_0(u_{i\text{пауз}}^k)} = \\ & = \ln \frac{\prod_{k=1}^K f_1(u_{i\text{пауз}}^k)}{\prod_{k=1}^K f_0(u_{i\text{пауз}}^k)} = \ln Z[U_{i\text{пауз}}^K] \end{aligned} \quad (6)$$

где θ_1 – параметр распределения, соответствующего паузе, θ_0 – параметр распределения, не соответствующего паузе, $u_{i\text{пауз}}^k$ – значение k -го отсчета РС в предполагаемой i -й паузе, L – функция правдоподобия распределения анализируемых значений по закону с параметром θ , f – плотность распределения анализируемых значений.

В качестве альтернативы значениям отсчетов могут быть использованы результаты мелкестрального анализа. Применительно к обработке РС данный подход используется с учетом психоакустической модели слуха, сущность которой заключается в разделении воспринимаемого слухом частотного диапазона на области частот, называемые критическими полосами. Явление разделения при восприятии человеком спектра РС на частотные группы относится к одному из фундаментальных свойств слуха. Для представления интенсивности звука в определенной области частот используются единицы [мел]. Мел – единица высоты звука, основанная на восприятии этого звука нашими органами слуха. Шкала мел является эмпирически подобранными значениями, отражающими особенности слуха человека (рис. 7) [8].

Мел удобно применять в целях анализа речи человека, так как его использование «приближает» алгоритмы обработки данных к человеческим параметрам восприятия, что благотворно сказывается на качестве распознавания. На их основе рассчитываются мел-частотные

кепстральные коэффициенты (MFCC), которые в последнее время получили весьма широкое использование при обработке РС. Последовательность их расчета приведена в [8].

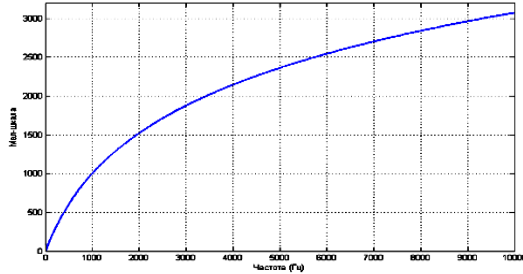


Рис. 6. Преобразование шкалы частот

Совокупность мел-кепстральных коэффициентов, получаемых на каждом этапе расширения предполагаемой речевой паузы, может быть использована в качестве исходных данных для анализа вероятностных характеристик и расчета статистики критерия Вальда. В этом случае статистика критерия Вальда примет следующий вид:

$$\begin{aligned} & \ln \frac{L(\text{MFCC}_{i_{\text{пауз}}}, \theta_1)}{L(\text{MFCC}_{i_{\text{пауз}}}, \theta_0)} = \\ & = \ln \frac{f_1(\text{mfcc}_{i_{\text{пауз}}}^1) \times f_1(\text{mfcc}_{i_{\text{пауз}}}^2) \times \dots \times f_1(\text{mfcc}_{i_{\text{пауз}}}^N)}{f_0(\text{mfcc}_{i_{\text{пауз}}}^1) \times f_0(\text{mfcc}_{i_{\text{пауз}}}^2) \times \dots \times f_0(\text{mfcc}_{i_{\text{пауз}}}^N)} = \\ & = \ln \frac{\prod_{n=1}^N f_1(\text{mfcc}_{i_{\text{пауз}}}^n)}{\prod_{n=1}^N f_0(\text{mfcc}_{i_{\text{пауз}}}^n)} = \ln Z[\text{MFCC}_{i_{\text{пауз}}}^N], \end{aligned} \quad (7)$$

где θ_1 - параметр распределения, соответствующего паузе, θ_0 - параметр распределения, не соответствующего паузе, $\text{mfcc}_{i_{\text{пауз}}}^n$ - значение n -го мел-кепстрального коэффициента предполагаемой i -й паузы, L – функция правдоподобия распределения анализируемых значений по закону с параметром θ , f – плотность распределения анализируемых значений, N – количество мел-кепстральных коэффициентов ($N = \text{const}$).

Натуральный логарифм значения статистики критерия Вальда Z является основанием для отнесения анализируемых совокупностей (значений отсчетов, либо мел-кепстральных коэффициентов) к одной из трех попарно непе-

ресекающихся областей в соответствии со следующими условиями [7]:

$$\ln B < \ln Z < \ln A, \quad (8)$$

$$\ln Z \leq B, \quad (9)$$

$$\ln Z \geq A. \quad (10)$$

При выполнении условия (10) гипотеза H_0 отвергается, и фрагмент речи принимается активным. Выполнение условия (9) предполагает принятие гипотезы H_0 и речевой фрагмент считается паузой. Условие (8) является основанием для продолжения эксперимента и увеличения наблюдаемой совокупности на следующий сегмент анализа РС с повторным вычислением (6) либо (7) и проверкой по условиям (8) – (10). Ввиду того, что при выполнении условия (8) имеет место расширение участка предполагаемой паузы, необходимо ввести ограничение на расширение анализируемой совокупности. С учетом рекомендаций Международного союза электросвязи предлагается ввести ограничение на максимальную длину анализируемого участка речи в 80 мс.

Ограничительные константы A и B рассчитываются исходя из величин ошибок первого и второго рода по следующим соотношениям [1]:

$$\begin{cases} A \leq \frac{1 - \beta}{\alpha} \\ B \geq \frac{\beta}{1 - \alpha} \end{cases}. \quad (11)$$

Возникновение ситуации, при которой выполнение условия (8) имеет место при достижении предельного значения анализируемого сегмента, является т.н. «усечением» критерия Вальда. Влияние «усечения» также описано в [7]. В этом случае принимается гипотеза H_0 .

Заключение

Таким образом, существующие детекторы активности речи некорректно работают в условиях интенсивных акустических воздействий на входе микрофона. Данное обстоятельство объясняется нестационарным характером РС на участках пауз в условиях ИАВ. Использование отличий вероятностных характеристик сегментов активных речевых участков и пауз позволит уменьшить количество решений типа «пропуск цели» в детекторах голосовой активности. Ввиду существенной длительности пауз по отно-

шению к длительности сегмента анализа РС, а также случайного характера их продолжительности и расположения предлагается использовать математический аппарат последовательной проверки статистических гипотез (критерий Вальда) для решения задачи выявления неактивных участков РС в условиях ИАВ. В качестве объекта анализа предлагается использовать либо значения цифровых отсчетов РС (анализ во временной области), либо совокупности мел-кепстральных коэффициентов, вычисленных на сегментах РС. Использование разных подходов обусловит необходимость корректировки исходных данных для расчета ограничительных констант, которые являются границами для принятия решения о соответствии речевого фрагмента паузе.

Литература

1. Дмитриев В.Т., Янак А.Ф. Исследование воздействия акустических шумов на первичные кодеки речевых сигналов // Вестник 38 РГРТУ. 2016. № 56. С. 38-44.

2. ITU-T Recommendation G.729. Coding of Speech at 8 kbit/s Using Conjugate-Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction (CS-ACELP), 06/2012.

3. ГОСТ Р 50840-95. Передача речи по трактам связи. Методы оценки качества, разборчивости и узнаваемости. М.: Госстандарт России, 1995. 230 с.

4. Об одном методе обнаружения пауз в речевых сигналах / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, Е.И. Прохоренко, А.С. Белов // Цифровая обработка сигналов и ее применение: материалы 10-й междунар. конф. М.: ИПУ РАН, 2008. – С. 229-231.

5. Об эффективности различных подходов к сегментации речевых сигналов на основе обнаружения пауз / Е.Г. Жилияков, С.П. Белов, А.С. Белов, А.А. Фирсова, А.В. Глушак // Научные ведомости Белгородского государственного университета. Сер. Экономика. Информатика. – 2010. № 7 (78). Выпуск 14/1. – С. 187-193

6. Михайлов В.Г., Златоустова Л.В. Измерение параметров речи. М.: Радио и связь, 1987. 168 с.

7. Вальд А. Последовательный статистический анализ / под ред. А.Ф. Лапко. М.: Гос. изд. ФИЗМАТЛИТ, 1960. 328 с.

8. Афанасьев А.А., Кирюхин Д.А. Цифровая обработка речевого сигнала с использованием программной среды MATLAB: учеб. пособие. Орел: Академия ФСО России, 2021. 133 с.

Поступила 26.04.2022; принята к публикации 16.06.2022

Информация об авторах

Власов Роман Сергеевич – канд. техн. наук, старший преподаватель кафедры сетей связи и систем коммутации, Воронежский институт правительственной связи (филиал) Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации (394042, Россия, г. Воронеж, ул. Минская, д. 2), e-mail: vlasrsv@mail.ru, тел. 8-473-210-30-09

Козлов Иван Александрович – преподаватель кафедры сетей связи и систем коммутации, Воронежский институт правительственной связи (филиал) Академии Федеральной службы охраны Российской Федерации (394042, Россия, г. Воронеж, ул. Минская, д. 2), e-mail: vlasrsv@mail.ru, тел. 8-473-210-30-09

Афанасьев Андрей Алексеевич – д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры электроники и теории связи, Академия Федеральной службы охраны Российской Федерации (302034, Россия, г. Орёл, ул. Приборостроительная, д. 35), e-mail: fromnet@yandex.ru, тел. 8-4862-54-98-90.

Питолин Андрей Владимирович – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры систем автоматизированного проектирования и информационных систем, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: pitol@mail.ru, тел. 8-473-243-77-04

IDENTIFICATION OF SPEECH PAUSES IN CONDITIONS DIFFICULT ACOUSTIC INTERFERING SITUATION

R.S. Vlasov¹, I.A. Kozlov¹, A.A. Afanas'ev², A.V. Pitolin³

¹ Voronezh Institute of Government Communication, branch of Academies of Federal Guard Service of the Russian Federation, Voronezh, Russia

² Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation, Oryel, Russia

³ Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: we present materials on the study of the possibilities of determining pauses in a speech signal under the condition of acoustic noise at the microphone input. The need for such studies is due to the incorrect operation of the voice activity detector when encoding speech using the G.729 algorithm. This circumstance does not allow efficient use of the SS redundancy associated with the presence of pauses in the tasks of improving the quality indicators of speech transmission systems. The reasons for the incorrect operation of the existing voice activity detectors are taking a pause in the speech signal for a stationary random process. In the absence of intense interference, the distribution of counts of inactive sections of the speech signal is indeed quasi-stationary. However, under conditions of intense acoustic noise, the time intervals at which the probabilistic characteristics do not undergo significant changes are significantly less than the average length of speech pauses. This does not allow us to consider such segments of the speech signal as quasi-stationary. Nevertheless, the probabilistic distributions of

counts that make up pauses under IAI conditions and active parts of the SS differ. We proposed to use these differences in the identification of pauses in acoustic noise conditions

Key words: speech signal, acoustic noise, consecutive statistics, Wald's criterion, speech pause

References

1. Dmitriev V.T., Yanak A.F. "Research of impact of acoustic noise on primary codecs of speech signals", *Bulletin 38 RSRTU (Vestnik 38 RGRU)*, 2016, no. 5, pp. 38-44.
2. ITU-T Recommendation G.729. Coding of Speech at 8 kbit/s Using Conjugate-Structure Algebraic Code Excited Linear Prediction (CS-ACELP), 06/2012.
3. GOST P 50840-95 "Speech transmission on paths of communication. Methods of assessment of quality, legibility and recognition", Moscow: Gosstandart of Russia, 1995, 230 p.
4. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Prokhorenko E.I., Belov A.S. "About a method of detection of pauses in speech signals", *Proc. of the 10th Int. Conf.: Digital Processing of Signals and its Application (Tsifrovaya obrabotka signalov i ee primeneniye)*, Moscow, 2008, pp. 229-231.
5. Zhilyakov E.G., Belov S.P., Belov A.S., Firsova A.A., Glushak A.V. "About efficiency of various approaches to segmentation of speech signals on the basis of detection of pauses", *Scientific Papers of Belgorod State University (Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta)*, Belgorod: BelGU publishing house, 2010, no. 7 (78), issue 14/1, pp. 187-193
6. Mikhaylov V.G., Zlatoustova L.V. "Measurement of parameters of the speech" ("Izmerenie parametrov rechi"), Moscow: Radio i svyaz', 1987, 168 p.
7. Wald A. "The consecutive statistical analysis" ("Posledovatel'nyy statisticheskiy analiz"), Moscow: FIZMATLIT, 1960, 328 p.
8. Afanas'ev A.A., Kiryukhin D.A. "Digital processing of a speech signal with use of the program MATLAB environment" ("Tsifrovaya obrabotka rechevogo signala s ispol'zovaniem programmnoy sredy MATLAB"), textbook, Oryol, 2021, 133 p.

Submitted 26.04.2022; revised 16.06.2022

Information about the authors

Roman S. Vlasov, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh Institute of Government Communication, branch of Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation (2 Minskaya str. Voronezh 392042, Russia), e-mail: vlasrsv@mail.ru, tel.: +7-473-210-30-09

Ivan A. Kozlov, Assistant Professor, Voronezh Institute of Government Communication, branch of Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation (2 Minskaya str. Voronezh 392042, Russia), e-mail: vlasrsv@mail.ru, tel.: +7-473-210-30-09

Andrey A. Afanas'ev, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Professor, Academy of Federal Guard Service of the Russian Federation (35 Priborostroitel'naya str., Oryol 302034, Russia), e-mail: fromnet@yandex.ru, tel.: +7-4862-54-98-90.

Andrey V. Pitolin, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pitol@mail.ru, tel. +7-473-243-77-04

МНОГОДИАПАЗОННАЯ ПАТЧ-АНТЕННА НА ОСНОВЕ АКТИВНОГО МЕТАМАТЕРИАЛА

Е.А. Ищенко¹, Ю.Г. Пастернак¹, В.А. Пендюрин², С.М. Фёдоров^{1,3}

¹Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

²АО Научно-производственное предприятие «Автоматизированные системы связи», г. Воронеж, Россия

³Международный институт компьютерных технологий, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматривается конструкция планарной патч-антенны с активным метаматериалом, который позволяет путем подключения дополнительных слоев управлять рабочим диапазоном антенны. Благодаря применению конструкции такой антенны удалось достичь того, что прямоугольная патч-антенна обладает четырьмя режимами работы, которые обеспечивают четыре рабочих частотных диапазона антенны. При этом во всех режимах работы антенны сохраняются стабильные характеристики, так, коэффициент полезного действия не снижался менее 72%, коэффициент направленного действия антенны не ниже 7.2 дБ. Благодаря таким характеристикам можно сказать, что использование активного метаматериала в планарных антеннах позволяет улучшить характеристики антенны путем увеличения числа диапазонов антенны с сохранением основных показателей антенны. Также благодаря тому, что в процессе переключения режимов сохраняется лишь один резонанс антенны, то удается повысить помехозащищенность антенны, так как отсутствует прием на побочных каналах. Используемые для коммутаций метаматериала рpн-диоды позволяют обеспечить быстрое переключение слоев, а также малое сопротивление во включенном режиме и этим обеспечить полученные высокие качественные характеристики, которые полостью соответствовали бы эквивалентным патч-антеннам с полной металлизацией

Ключевые слова: патч-антенна, метаматериал, многодиапазонная антенна

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Президента РФ для молодых ученых № МК-57.2020.9

Введение

Планарные патч-антенны становятся все более популярными в современных задачах связи, так как обладают малыми размерами, а также позволяют достичь высоких показателей КПД и направленного действия. Однако недостатком большинства конструкций патч-антенн является то, что они обладают узким диапазоном частот, поэтому актуальной является задача улучшения характеристик излучателей, а также поиск новых конструкций, которые позволят повысить КПД и КНД антенн.

Одним из способов применения патч-антенн является использование их в составе антенных решеток [1]. Благодаря тому, что планарные антенны формируются на диэлектрических подложках возможно обеспечить формирование электронных цепей, которые позволят осуществить управление характеристиками излучателей. С помощью таких цепей возможно осуществить управление поляризацией поля, а также фазой, что позволяет сузить главный лепесток диаграммы направленности, а также повысить КНД.

Для формирования дополнительных диапазонов работы патч-антенн как правило приходится изменять конструкцию проводящих пластин [2, 3] – формировать в них диэлектрические участки. Недостатком такого изменения конструкции является понижение КПД антенны, а также искажения диаграмм направленности.

Другой особенностью патч-антенн является то, что для излучения возможно использование нескольких мод радиоволн, как показано в работе [4]. Благодаря применению нескольких мод радиоволн удастся обеспечить управление характеристиками диаграмм направленности. Благодаря таким возможностям, патч-антенны имеют широкие возможности применения в задачах связи.

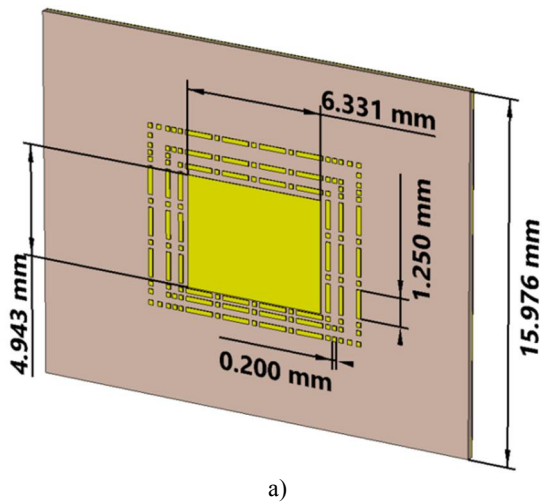
Одним из способов улучшения характеристик патч-антенн является применение метаматериалов [5]. Благодаря применению метаматериалов удастся улучшить согласование, а также улучшить характеристики диаграмм направленности.

Таким образом, можно сделать вывод, что улучшение характеристик патч-антенн является важной и актуальной задачей. В данной работе предлагается конструкция многодиапазонной

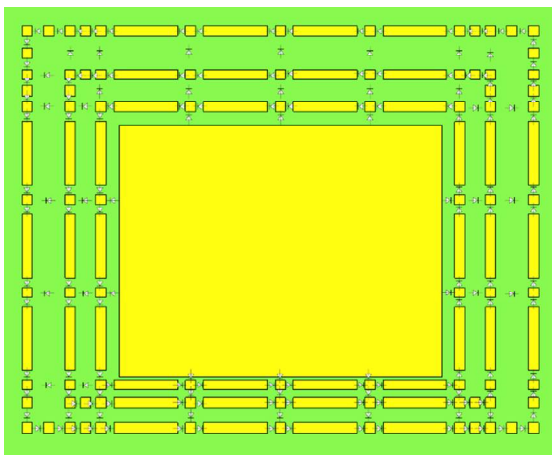
патч-антенны с возможностью управления рабочими диапазонами за счет активного метаматериала.

Моделирование активной антенны на основе метаматериала

Для управления характеристиками антенны был сформирован активный метаматериал, в котором для коммутации используются pin-диоды. На рис. 1 приводится исследуемая конструкция антенны с активным метаматериалом.



а)



б)

Рис. 1. Исследуемая модель патч-антенны: а) общий вид антенны; б) вид метаматериала, сформированного вокруг излучателя

Для питания антенны используется коаксиальная линия питания, что позволяет расширить возможный рабочий диапазон, поэтому удастся сформировать четырехдиапазонную антенну, причем для переключения диапазонов требуется выполнить коммутацию слоев метаматериала.

Для определения характеристик антенны произведем электродинамическое моделирование, причем для коммутации будут использоваться spice модели pin-диодов, что позволит повысить точность моделирования. На рис. 2 приводится график возвратных потерь (S_{11}), который позволит определить диапазоны рабочих частот для всех режимов работы антенны.

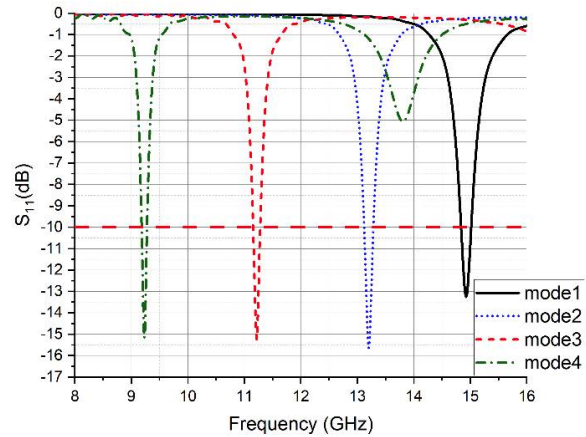


Рис. 2. Возвратные потери антенны во всех режимах работы: mode1 – отсутствие коммутаций в слоях метаматериала; mode2 – активен первый слой метаматериала; mode3 – активен первый и второй слой; mode4 – активны все слои метаматериала

Как видно, благодаря использованию метаматериала удастся обеспечить работу антенны в 4 частотных диапазонах. Рассмотрим диаграммы направленности антенны во всех режимах – рис. 3. Основные характеристики антенн во всех режимах приводятся в таблице.

Характеристики антенны во всех режимах

Режим (рис. 2)	Частота ДН, ГГц	КНД, дБ	Ширина гл. лепестка, °	КПД, %	Диап. Раб. частот ($S_{11} = -10$ дБ), ГГц
mode1	14.9	7.39	78.7	79	14.8-15.1
mode2	13.2	7.49	82.4	77	13.1-13.3
mode3	11.2	7.63	86.0	75	11.1-11.3
mode4	9.2	7.29	89.6	72	9.1-9.3

Как видно по полученным результатам, применение активного метаматериала позволяет сформировать четырехдиапазонную антенну, режимы которой полностью управляются путем выполнения коммутаций. Благодаря особенностям конструкции метаматериала сохраняется высокая стабильность характеристик диаграмм направленности.

Заключение

Разработанная патч-антенна с активным метаматериалом позволяет обеспечить работу в четырех диапазонах частот благодаря возможности увеличения площади излучателя путем подключения излучающих поверхностей за счет использования рin-диодов. Полученные характеристики антенн показывают, что благодаря использованию предложенной конструкции сохраняется высокая стабильность показателей, а также обеспечивается высокий КПД. Помимо этого, подобная конструкция антенны повышает помехозащищенность антенны от приемов сигнала в иных диапазонах, так как обеспечивается лишь один резонанс антенного элемента после активации требуемого режима. Таким образом, можно сделать вывод, что использование метаматериалов в современных антеннах является одним из наиболее перспективных способов управления и улучшения характеристик антенн.

Литература

1. Polarization Reconfigurable And Beam-Switchable Array Antenna Using Switchable Feed Network / C. Liu, Y. Li, T. Liu, Y. Han, J. Wang, S. Qu // IEEE Access. 2022. 9 p.
2. Dual-band gemini-shaped microstrip patch antenna for C-band and X-band applications / G. Djengomengoto, R. Altunok, C. Karabacak, Ş. T. İmeci, T. Durak // 2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium. Italy (ACES). 2017. Pp. 1-2.
3. Single-Layer Single-Patch Dual-Band and Triple-Band Patch Antennas / W.C. Mok, S.H. Wong, K.M. Luk, K.F. Lee // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2013. Vol. 61. No. 8. Pp. 4341-4344.
4. A CPW-fed Dual-Band Dual-Pattern Radiation Patch Antenna Based on TM₀₁ and TM₀₂ Mode / H. Liu, L. Meng, X. Huo, S. Liu // 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP). 2020. Pp. 1-2.
5. Saghanezhad S. A. H., Atlasbaf Z. Miniaturized Dual-Band CPW-Fed Antennas Loaded With U-Shaped Metamaterials // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. 2015. Vol. 14. Pp. 658-661.

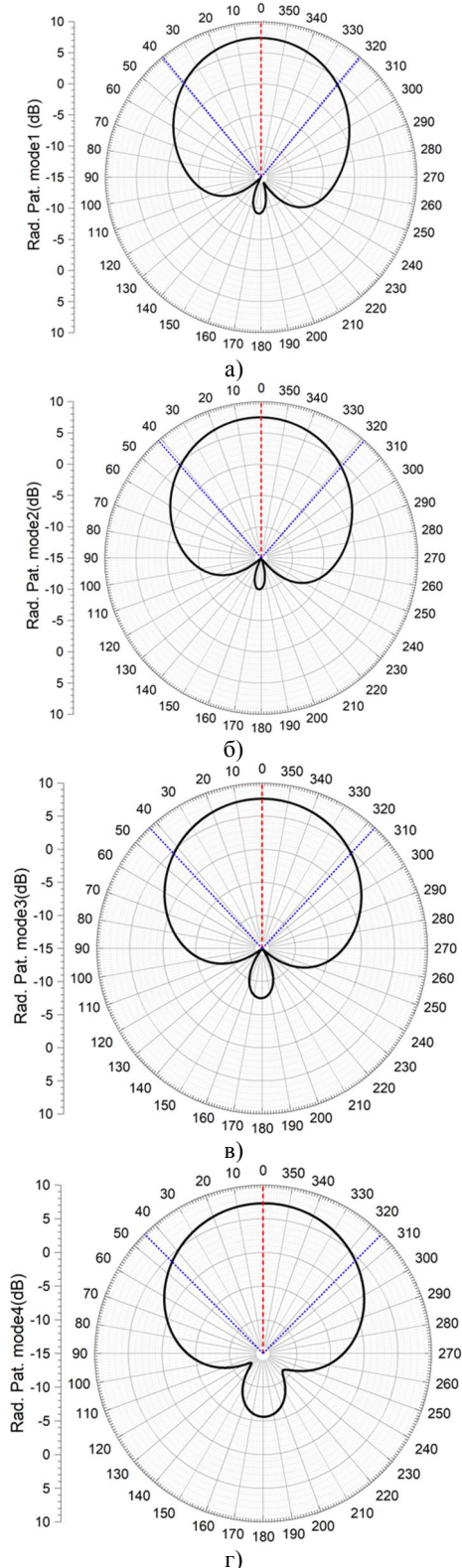


Рис. 3. Диаграммы направленности антенны во всех режимах работы:

- а) mode1 – нет коммутаций метаматериала;
- б) mode2 – коммутация первого слоя метаматериала;
- в) mode3 – коммутация первого и второго слоя метаматериала;
- г) mode4 – коммутация всех слоев метаматериала

Поступила 09.03.2022; принята к публикации 16.06.2022

Информация об авторах

Ищенко Евгений Алексеевич – инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

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 НПП «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); доцент кафедры информационной безопасности и систем связи, Международный институт компьютерных технологий (394026, Россия, г. Воронеж, ул. Солнечная, д. 29 б), тел. +7(473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

MULTI-BAND PATCH ANTENNA BASED ON ACTIVE METAMATERIAL

E.A. Ishchenko¹, Yu.G. Pasternak¹, V.A. Pendyurin², S.M. Fyedorov^{1,3}

¹Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

²Research and Production Enterprise “Automated Communication Systems”, Voronezh, Russia

³International Institute of Computer Technologies, Voronezh, Russia

Abstract: the article discusses the design of a planar patch antenna with an active metamaterial, which allows you to control the operating range of the antenna by connecting additional layers. Thanks to the design of such an antenna, it was possible to achieve that a rectangular patch antenna has four modes of operation, which provide four operating frequency bands of the antenna. At the same time, in all modes of operation of the antenna, stable characteristics are maintained, so the efficiency did not decrease below 72%, the directional coefficient of the antenna was not lower than 7.2 dB. Thanks to these characteristics, we can say that the use of active metamaterial in planar antennas can improve the characteristics of the antenna by increasing the number of antenna ranges while maintaining the main characteristics of the antenna. Also, due to the fact that in the process of switching modes, only one antenna resonance is preserved, it is possible to increase the noise immunity of the antenna since there is no reception on side channels. The pin diodes used for switching the metamaterial make it possible to ensure fast switching of layers, provide low resistance in the on mode, and thereby ensure the obtained high-quality characteristics that would correspond to equivalent full-metallization patch antennas

Key words: patch antenna, metamaterial, multiband antenna

Acknowledgments: this research was funded by the grant of the President of the Russian Federation for Young Scientists, the grant no. MK-57.2020.9

References

1. Liu C., Li Y., Liu T., Han Y., Wang J., Qu S. “Polarization reconfigurable and beam-switchable array antenna using switchable feed network”, *IEEE Access*, 2022, 9 p.
2. Djengomemgoto G., Altunok R., Karabacak C., İmeci Ş. T., Durak T. “Dual-band gemini-shaped microstrip patch antenna for C-band and X-band applications”, *2017 International Applied Computational Electromagnetics Society Symposium - Italy (ACES)*, 2017, pp. 1-2.
3. Mok W. C., Wong S. H., Luk K. M., Lee K. F. “Single-layer single-patch dual-band and triple-band patch antennas”, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2013, vol. 61, no. 8, pp. 4341-4344.
4. Liu H., Meng L., Huo X., Liu S. “A CPW-fed dual-band dual-pattern radiation patch antenna based on TM01 and TM02 mode”, *2020 9th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, 2020, pp. 1-2.
5. Saghanezhad S.A.H., Atlasbaf Z. “Miniaturized dual-band CPW-Fed antennas loaded with U-shaped metamaterials”, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, 2015, vol. 14, pp. 658-661.

Submitted 09.03.2022; revised 16.02.2022

Information about the authors

Evgeniy A. Ishchenko, engineer, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>

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

Sergey M. Fyedorov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), International Institute of Computer Technologies (29 b Solnechanya str., Voronezh 394026, Russia), tel.: +7 (473)243-77-29, e-mail: fedorov_sm@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9027-6163>

АЛГОРИТМ СХОДИМОСТИ ДЛЯ LDPC-КОДЕКА НИЗКОЙ СЛОЖНОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЙРОННОЙ СЕТИ

М.В. Хорошайлова

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: описана модифицированная методика, основанная на «мягких» вычислениях для менее сложного в вычислительном отношении LDPC-кодера/декодера. Данная методика обучения вычислительно менее сложна, чем обычный метод градиентного обучения, и отличается высокой точностью. Для изменения H -матрицы использовались две формы вычисления в виде приближенного нижнего треугольника, а именно: систематическое кодирование методом исключения Гаусса и кодирование со сложностью, которая растет линейно с размером блока. Производительность разработанной методики сравнивается с традиционными методами с точки зрения максимальной погрешности, минимальной погрешности и вычислительной сложности. Для эмуляции кодека разработан LDPC-кодер/декодер на основе искусственной нейронной сети. Нейронная сеть имеет три слоя: входной слой, один скрытый слой и выходной слой. Количество нейронов во входном и выходном слоях зависит от размера матрицы проверки четности LDPC-кодера. Производительность предлагаемого LDPC-кодека сравнивается с производительностью обычных кодеков с точки зрения алгоритма обучения. Предлагаемый алгоритм обучения имеет умножение $X \cdot L$ в отличие от умножения X^2 и X обычных методов. Также предлагается эффективная архитектура для того, чтобы нейронная сеть действовала как универсальный LDPC-кодек, выбирая 0/1 для установленного бита

Ключевые слова: алгоритм обратного распространения, LDPC-кодек, вычислительная сложность, персептрон

Введение

LDPC код является блочным кодом, в котором биты сообщения кодируются с помощью матрицы проверки четности (H -матрицы), которая генерируется с большим количеством нулей и меньшим количеством единиц. Количество нулей в матрице влияет на сложность декодирования и определяет минимальное расстояние кода. Распределение по степеням относится к числу ненулевых записей в каждой из строк и столбцов матрицы проверки четности H . Если степень распределения как строк, так и столбцов одинакова, то это обычная H -матрица, в противном случае она называется нерегулярной H -матрицей. Часто H -матрицу представляют в графическом виде и называют графом Таннера. Цикл определяется как последовательность соединенных узлов, которые начинаются и заканчиваются в одном и том же узле, а обхват относится к наименьшему циклу в графе Таннера. Кодовое слово, передаваемое с использованием H -матрицы, представляет собой само сообщение и избыточные биты.

Предлагается модифицированный метод для LDPC-кодеров, который позволит использовать меньшее количество вычислений для кодирования битов сообщения. Однако в слу-

чае приемопередатчиков будет наиболее целесообразно, если одна и та же схема сможет выполнять как кодирование, так и декодирование в LDPC. Была изучена логика декодирования для класса кодов евклидовой геометрии с низкой плотностью контроля четности (от англ. Euclidean geometry low density parity check, EG-LDPC) с использованием метода, аналогичного методу одношагового мажоритарного декодирования. Декодирование мажоритарной логики было реализовано последовательно с помощью простого оборудования, но требует длительного времени декодирования, что увеличило время доступа к памяти. Метод определяет, имело ли слово ошибки на первых итерациях мажоритарного логического декодирования, и когда ошибок в декодировании не было, оно закончилось, не завершив остальные итерации. Поскольку большинство слов в памяти будут безошибочными, среднее время декодирования сильно сократится.

Производительность квазициклических кодов проверки четности с низкой плотностью (QC LDPC) может быть дополнительно ускорена с помощью улучшенного логического декодирования, такого как декодирование мажоритарной логики. Был предложен эффективный метод кодирования с использованием метода скупых перестановок. Для изменения H -матрицы использовалась форма приближен-

ного нижнего треугольника (ALT) двумя способами, а именно: систематическое кодирование методом исключения Гаусса и кодирование со сложностью, которая растет линейно с размером блока. Затем систематическая форма ALT (форма SALT) используется для изменения H -матрицы. Для кодирования используется скупая перестановка и производительность сравнивается с результатами гауссовой перестановки.

В этой статье успешно разработан метод на основе нейронной сети как для кодирования, так и для декодирования, основанный на алгоритмах градиентного обучения обычной сети (GLN) и адаптивного естественного градиентного обучения (AGLN). Однако предложенный метод превосходит два алгоритма с точки зрения простоты вычислений и сходимости. Использование многослойного перцептрона (MLP) в нейронной сети позволяет прогнозировать и классифицировать выходные переменные из набора входных переменных. Нейронная сеть имеет три слоя: входной слой, один скрытый слой и выходной слой. Количество нейронов во входном и выходном слоях зависит от типа LDPC-кодека. В этом случае рассматривается LDPC-кодер с 5 входами и 10 выходами. Следовательно, количество нейронов в входном и выходном слоях равно 5 и 10 соответственно. Нейроны в скрытом слое повышают точность предсказания. Но это увеличивает сложность системы памяти и хранения информации. Следовательно, в этом случае количество нейронов в скрытом слое выбрано равным 10. Существующая нейронная сеть была смоделирована, а коды предсказаны с использованием методов OGL и AGL. Минимальная, максимальная и средняя ошибки предсказания 10-битного кода из 5-битного входного сообщения показаны в табл. 1.

Таблица 1
Минимальное, максимальное и среднее значения ошибки для входного сообщения

Метод	Суммарная ошибка	Ср. ошибка	Мин. ошибка	Макс. ошибка	Количество вычислений
OGL	14.3392	0.0448	0.0014	0.9716	X умножений
AGL	8.8542	0.0277	5.4360e-005	0.9986	X умножений

Количество умножений также указано в последнем столбце таблицы. Установлено, что AGLN обеспечивает меньшую среднюю

ошибку, минимальную и максимальную ошибки. Однако количество вычислений велико в случае сети на основе AGLN.

Чтобы сравнить производительность предложенного алгоритма с традиционными методами, изначально сохраняется архитектура нейронной сети. Также изучается возможность использования методов обучения для декодирования битов сообщения из закодированных битов. Производительность предлагаемого метода обучения (декодера) также сравнивается с обычными алгоритмами обучения. Предлагаемый многослойный перцептрон имеет входной слой, скрытый слой и выходной слой.

LDPC-кодер на основе нейронной сети

В случае кодера количество нейронов в скрытом слое выбирается равным 10. Количество нейронов во входном и выходном слоях равно 5 и 10 соответственно. Архитектура предлагаемого кодера на основе нейронной сети показана на рис. 1.

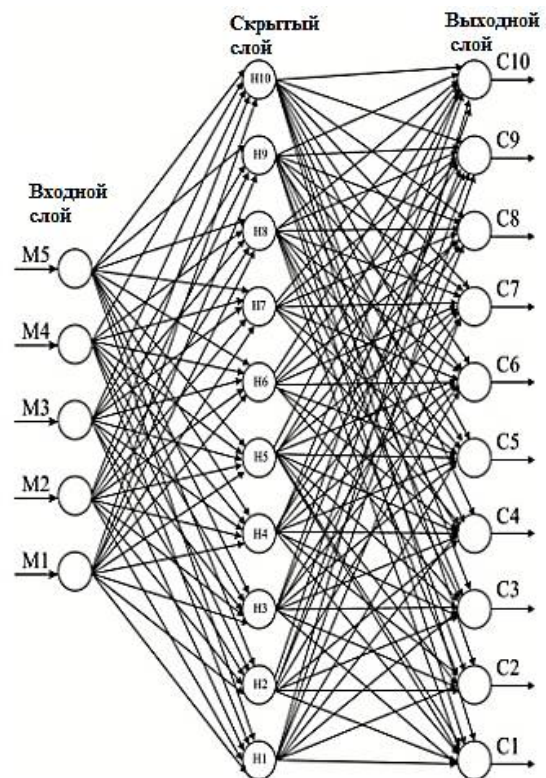


Рис. 1. LDPC-кодер на основе нейронной сети

Предлагаемый LDPC-кодер на основе перцептрона способен генерировать 10-битный код для любой из 32 комбинаций входного по-

тока сообщений в диапазоне от 00000В до 11111В. Матрица проверки четности снова представляет собой 32 комбинации из пяти битов. В этом конкретном случае 10-битное кодовое слово получается путем добавления битов сообщения к кодовым битам. Однако кодовые слова также могут быть сгенерированы путем рассмотрения матрицы проверки четности 10×5 и выполнения сложения по модулю 2 для завершеного сообщения и соответствующих кодовых битов.

Параметр обучения равен 0,0001, а параметр импульса равен 0,01. Условие смещения включено для всех нейронов в скрытом и выходном слоях. Сеть спроектирована таким образом, чтобы принимать блок сообщений и матрицу проверки четности также в качестве входных параметров. Кодовые слова представляют собой чистые выходные данные нейронов в выходном слое. Пример набора шаблонов (биты сообщения и соответствующие кодовые слова) показан в табл. 2.

Соотношение между фактическим (А) и желаемым (D) выходами каждого нейрона выходного уровня для всех 32 комбинаций показано в табл. 3 для предлагаемого алгоритма обучения.

Таблица 2
Примерный набор битов сообщения и соответствующие кодовые слова

Биты входного сообщения	Выходные кодированные биты
0 0 0 0 0	0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 1	1 1 1 0 0 0 0 0 0 1
0 0 0 1 0	1 1 0 1 0 0 0 0 1 0
0 0 0 1 1	0 0 1 1 0 0 0 0 1 1
0 0 1 0 0	1 0 1 0 1 0 0 1 0 0
0 0 1 0 1	0 1 0 0 1 0 0 1 0 1
0 0 1 1 0	0 1 1 1 1 0 0 1 1 0
0 0 1 1 1	1 0 0 1 1 0 0 1 1 1
0 1 0 0 0	0 0 1 1 1 0 1 0 0 0
0 1 0 0 1	1 1 0 1 1 0 1 0 0 1
0 1 0 1 0	1 1 1 0 1 0 1 0 1 0
0 1 0 1 1	0 0 0 0 1 0 1 0 1 1
0 1 1 0 0	1 0 0 1 0 0 1 1 0 0
1 0 0 1 1	0 1 1 0 1 1 0 0 1 1
1 0 1 0 0	1 1 1 1 0 1 0 1 0 0
1 0 1 0 1	0 0 0 1 0 1 0 1 0 1
1 0 1 1 0	0 0 1 0 0 1 0 1 1 0
1 0 1 1 1	1 1 0 0 0 1 0 1 1 1
1 1 0 0 0	0 1 1 0 0 1 1 0 0 0
1 1 0 0 1	1 0 0 0 0 1 1 0 0 1
1 1 0 1 0	1 0 1 1 0 1 1 0 1 0
1 1 0 1 1	0 1 0 1 0 1 1 0 1 1
1 1 1 0 0	1 1 0 0 1 1 1 1 0 0
1 1 1 0 1	0 0 1 0 1 1 1 1 0 1
1 1 1 1 0	0 0 0 1 1 1 1 1 1 0
1 1 1 1 1	1 1 1 1 1 1 1 1 1 1

Таблица 3

Отношения между желаемым (D) и фактическим (А) значениями

C10		C9		C8		C7		C6		C5		C4		C3		C2		C1	
D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	D	A
0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	1	0	1
1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	0
1	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1
0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0
1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1
0	0	1	1	0	1	0	1	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	1	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0
1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1
0	0	0	1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0
1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	1	0	0	0	1	1	1
1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1
0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0
1	1	0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0
0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	1	1
0	1	1	1	0	0	0	1	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	1
1	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	1

Продолжение табл. 3

0	1	1	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0	1
0	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	0
0	1	0	0	1	1	0	1	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	0	1
1	1	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
0	0	1	0	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	1
1	0	0	1	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0	0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1	0	1	1	0	0	1	0	1	0
1	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
0	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0
1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

Таблица 4

Оценка эффективности разработанной методики

Метод	Суммарная ошибка	Ср. ошибка	Мин. ошибка	Макс. ошибка
OGL	14.3392	0.0448	0.9716	X умножений
AGL	8.8542	0.0277	0.9986	X2 Очень сложный
Разработанный	7.0177	0.0219	0.9969	X-L умножения

Из табл. 3 видно, что существует небольшое несоответствие между фактическими и желаемыми значениями. Производительность измеряется в сумме ошибок, средней абсолютной ошибке и максимальной ошибке. Также вычислительная сложность измеряется в определении количества умножений во время выполнения программы. Эти значения приведены в табл. 4. Из табл. 4 видно, что сумма ошибок, средняя абсолютная и максимальная ошибки меньше, чем у методов AGL. Кроме того, вычислительная сложность уменьшилась на L умножений по сравнению с методом OGL, который, в свою очередь, требует меньших вычислений, чем AGL.

остаются неизменными. Соотношение между желаемыми и фактическими значениями показано в табл. 6.

Декодер на основе нейронной сети

Для реализации декодера количество нейронов во входном слое равно 10, а количество нейронов в выходном слое равно 5. Количество нейронов в скрытом слое равно 10. Предлагаемая архитектура декодера на основе нейронной сети показана на рис. 2.

Набор примеров, используемых для обучения нейронной сети, показан в табл. 5. Десятибитное кодовое слово используется в качестве входных данных, а 5-битное сообщение используется для обучения декодера на основе нейронной сети. Подобно декодеру, алгоритм выполняется в течение определенного числа итераций. Параметры обучения и импульса

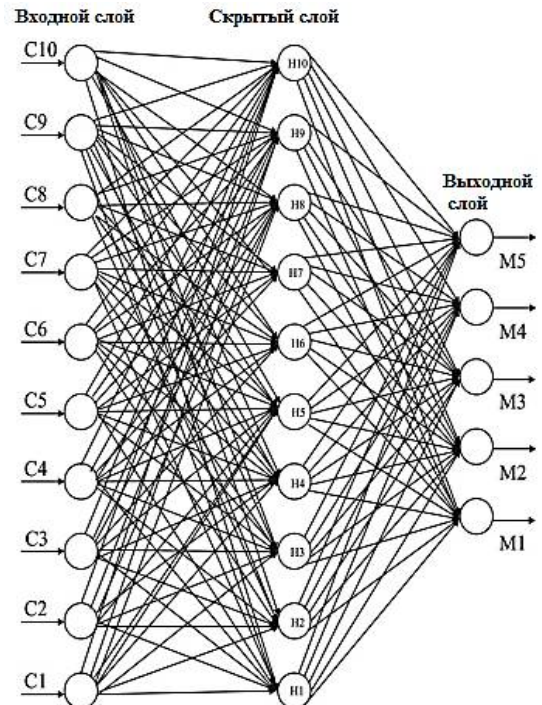


Рис. 2. Предлагаемый LDPC-декодер на основе нейронной сети

Таблица 5

Примерный набор кодовых слов, используемых для обучения декодера

Входное кодовое слово										Выходное сообщение			
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	1	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0	0	0	1
0	0	1	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1
1	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	1	0
0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	0	0	1	0
0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1
0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	0	0
1	1	0	1	1	0	1	0	0	1	0	1	0	0
1	1	1	0	1	0	1	0	1	0	0	1	0	0
0	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	1
1	0	0	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0
0	1	1	1	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1
0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0
1	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0
1	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	0	0
1	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	1	0	0
0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	1	0	0	1
1	1	1	1	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1
1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
0	0	1	0	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0
1	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1
0	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	1	0	0
1	0	1	1	0	1	1	0	1	0	1	0	1	0
0	1	0	1	0	1	1	0	1	1	1	0	1	1
1	1	0	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0
0	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	1
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Из соответствующих столбцов (фактические (A) и желаемые (D) выходы) табл. 6 обнаружено, что существует небольшое различие между желаемыми и фактическими битами сообщения.

Таблица 6

Соотношение между желаемыми и фактическими результатами

	M5		M4		M3		M2		M1	
D	A	D	A	D	A	D	A	D	A	
0	0	0	0	0	1	0	1	0	1	
0	1	0	0	0	1	0	1	1	0	
0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	
0	0	0	1	0	1	1	1	1	0	
0	0	0	0	1	0	0	1	0	1	
0	0	0	1	1	1	0	0	1	1	
0	0	0	1	1	0	1	1	0	0	
0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	
0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	
0	1	1	1	0	0	0	1	1	1	
0	1	1	0	0	0	1	1	0	1	
0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	
0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	
0	1	1	0	1	1	0	0	1	1	
0	0	1	1	1	0	1	0	0	1	

Продолжение табл. 6

0	1	1	1	1	0	1	1	1	0
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
1	1	0	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
1	0	0	1	0	1	1	0	1	0
1	0	0	1	1	0	0	1	0	1
1	1	0	0	1	1	0	0	1	0
1	1	0	0	1	0	1	0	0	1
1	0	0	1	1	1	1	1	1	1
1	1	1	1	0	1	0	0	0	1
1	0	1	0	0	1	0	1	1	0
1	0	1	0	0	0	1	1	0	0
1	0	1	1	0	0	1	0	1	0
1	1	1	1	1	1	0	1	0	1
1	1	1	1	1	0	0	0	1	1
1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
1	1	1	1	1	1	1	1	1	0

LDPC-коды на основе нейронной сети

Доказано, что предложенный метод обучения менее сложен как с точки зрения вычислений, так и с точки зрения применения, и обладает высокой точностью, также была принята попытка разработать прототип архитектуры для LDPC-кодера / декодера с использованием нейронной сети. Архитектура показана на рис. 3.

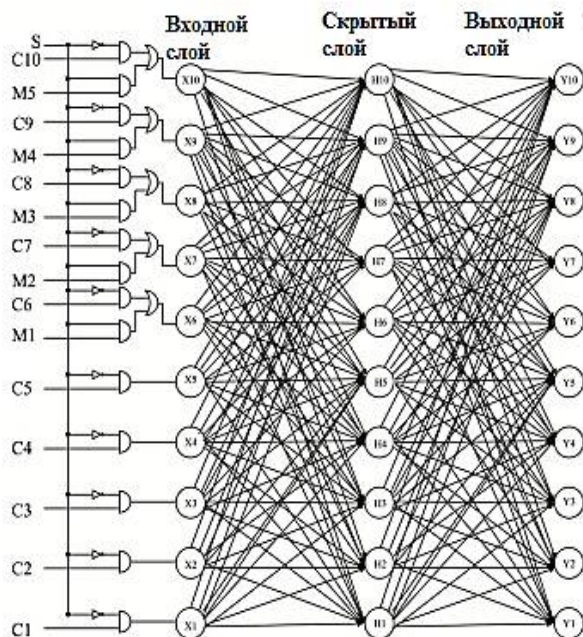


Рис. 3. Архитектура экспериментального образца

Бит выбора s используется для выбора предлагаемого кодера/декодера для конкретной функции, т.е. в качестве кодера или декодера. Если s=0, он действует как кодер, а если s=1 – как декодер. В этой работе разработан модифицированный, менее сложный, высоко-

точный алгоритм обучения для LDPC-декодирования. Также была успешно разработана модель для кодирования/декодирования LDPC. Точность предлагаемой системы намного выше, чем у традиционных алгоритмов обучения.

Заключение

В этой статье был предложен новый алгоритм обучения для LDPC-кода. Предлагаемый алгоритм вычислительно менее сложен, чем адаптивное обучение с естественным градиентом (AGLN), и обладает высокой точностью, чем обычное градиентное обучение (OGLN). Также предлагается эффективная архитектура для того, чтобы нейронная сеть действовала как универсальный LDPC-кодек, выбирая 0/1 для установленного бита. Как видно на примере разработанной модели, для реализации архитектуры требуются определенного объема аппаратные ресурсы, соответственно, с увеличением размера кода и поступающими данными их размер увеличивается. Необходимо решать проблемы конвейерного поступления данных и распараллеливания памяти, что явля-

ется мотивацией для будущих исследований и разработок.

Литература

1. Хорошайлова М.В. Разработка и реализация симметричного самоорганизующегося нейросетевого декодера // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2020. Т. 16. № 3. С. 60-64.
2. Hua Xiao, Mehdi Karimi. Error Rate Estimation of Low-Density Parity-Check Codes Decoded by Quantized Soft-Decision Iterative Algorithms // IEEE transactions on communications. 2013. Vol. 61. № 2. P. 474.
3. Chu-Hsiang Huang, Yao Li and Lara Dolecek Galager B. LDPC Decoder with Transient and Permanent Errors // IEEE Transactions on Communications. 2014. Vol. 62. № 1. P. 15-28.
4. Хорошайлова М.В. Архитектура канального кодирования на основе ПЛИС для 5G беспроводной сети с использованием высокоуровневого синтеза // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2018. Т. 14. № 2. С. 99-105.
5. Хорошайлова М.В. Реализации нейронной сети на ПЛИС с использованием аппаратных ресурсов // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2021. Т. 17. № 3. С. 127-134.
6. Khoroshaylova M.V. LDPC code and decoding algorithms // Антропоцентрические науки: инновационный взгляд на образование и развитие личности: материалы II междунар. науч.-практ. конф.: в 2 ч.; под ред. Э. П. Комаровой. Воронеж, 2015. С. 227-228.

Поступила 26.04.2022; принята к публикации 16.06.2022

Информация об авторах

Хорошайлова Марина Владимировна – канд. техн. наук, старший преподаватель, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: pmv2205@mail.ru, ORCID: orcid.org/0000-0001-9167-9538

CONVERGENCE ALGORITHM FOR LDPC CODEC OF LOW COMPLEXITY BASED ON NEURAL NETWORK

M.V. Khoroshaylova

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the paper describes a modified soft-computing technique for a less computationally complex LDPC encoder/decoder. This learning technique is computationally less complex than the conventional gradient learning method and is highly accurate. I used two forms of approximate lower triangle calculation to change the H-matrix, namely systematic Gaussian elimination coding and coding with complexity that grows linearly with block size. The performance of the developed technique is compared with traditional methods in terms of maximum error, minimum error and computational complexity. I developed an LDPC encoder/decoder based on an artificial neural network to emulate the codec. A neural network has three layers, namely an input layer, one hidden layer and an output layer. The number of neurons in the input and output layers depends on the size of the parity check matrix of the LDPC encoder. I compared the performance of the proposed LDPC codec with the performance of conventional codecs in terms of the learning algorithm. The proposed learning algorithm has X-L multiplication as opposed to X² and X multiplication of conventional methods. I also propose an efficient architecture for the neural network to act as a generic LDPC codec by choosing either 0/1 for a set bit

Key words: backpropagation algorithm, LDPC codec, computational complexity, perceptron

References

1. Khoroshaylova M.V. “Development and implementation of a symmetric self-organizing neural network decoder”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2020, vol. 16, no. 3, pp. 60-64
2. Hua Xiao, Mehdi Karimi “Error rate estimation of low-density parity-check codes decoded by quantized soft-decision iterative algorithms”, *IEEE transactions on communications*, 2013, vol. 61, no. 2, pp. 474.
3. Chu-Hsiang Huang, Yao Li, Lara Dolecek Gallager B. “LDPC decoder with transient and permanent errors”, *IEEE Transactions on Communications*, 2014, vol. 62, no. 1, pp.15-28.
3. Khoroshaylova M.V. “Architecture of FPGA based channel coding for 5G wireless network using high-level synthesis”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, vol. 14, no. 2, pp. 99-105.
4. Khoroshaylova M.V. “Implementation of a neural network on FPGA using hardware resources”, *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2021, vol. 17, no. 3, pp. 127-134.
5. Khoroshaylova M.V. “LDPC code and decoding algorithms”, *Proc. of the 2nd Int. Sci.-Practical Conf.: Anthropocentric Sciences: an Innovative Look at Education and Personal Development*, 2015, pp. 227-228.

Submitted 26.04.2022; revised 16.06.2022

Information about the author

Marina V. Khoroshaylova, Cand. Sc. (Technical), Assistant Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: pmv2205@mail.ru, tel.: 8-910-732-66-13, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9167-9538>

Машиностроение и машиноведение

DOI 10.36622/VSTU.2022.18.3.018

УДК 621.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОМПОЗИТНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ УСТАНОВОК АЭС, ВОССТАНОВЛЕННЫХ МЕТОДОМ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯО.В. Уразов¹, В.Г. Егоров², А.Д. Данилов³, И.Г. Дроздов³¹Филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция», г. Нововоронеж, Россия²Воронежский государственный университет инженерных технологий, г. Воронеж, Россия³Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: на Нововоронежской атомной электростанции была разработана уникальная методика и спроектировано оборудование для восстановления поврежденных композитных сварных соединений (СС) трубопроводов различных диаметров методом *поверхностного пластического деформирования* (ППД) без остановки ядерного блока. Приведены результаты исследования физико-механических характеристик восстановленных СС для подтверждения их соответствия эксплуатационным требованиям. Для этого был изготовлен полномасштабный тест-образец сварного соединения дыхательного трубопровода АЭС с энергоблоком ВВЭР-1000. Измерение остаточного смещения поверхностного слоя выполнили на 3D цифровом микроскопе Keyence VHX-600. Анализ деформации поверхностного слоя показал высокую сходимость расчетных и экспериментальных данных. С целью сравнения значений твердости для исходной и обработанной поверхности методом ППД были проведены измерения твердости по Виккерсу с помощью твердомера Zwick ZHU2,5. По результатам измерения твердости был сделан вывод, что значения твердости для однопроходного и двухпроходного режима отличаются незначительно. Измерение микротвердости металла вырезки проводили в соответствии с ГОСТ 9450-76 на полуавтоматическом твердомере Zwick ZHV10, который позволяет измерять твердость по Виккерсу при нагрузках от 10 г до 10 кг. Для определения значений твердости поверхности был использован метод инструментального индентирования (регламентируется ГОСТ Р 8.748) с помощью прибора ТЕСТ-5У. Исследование остаточных напряжений по глубине материала было выполнено методом Соуэтта и Ванкромбрюгге. Сопоставление результатов испытаний на циклическую прочность образцов, прошедших обработку методом ППД при $\sigma_a=(194-208)$ МПа, показало их преимущество по долговечности более чем в 10 раз

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, остаточное напряжение, микротвердость, кинетическое индентирование

Введение

Опыт эксплуатации производственных и энергетических объектов показывает, что абсолютно на всех типах эксплуатируемого оборудования имеются проблемные критические элементы (сварные соединения (СС), узлы, зоны), подверженные образованию и ускоренному развитию эксплуатационных повреждений. В таких случаях возникает необходимость проведения компенсирующих мероприятий, приводящих к восстановлению служебных свойств до приемлемого уровня в целях обеспечения эксплуатационной надежности благодаря повышению прочности деталей машин и конструкций в течение всего срока службы или хотя бы до срока планируемой замены оборудования. Наиболее сложными, в плане прове-

дения ремонтных работ, являются регулярные случаи повреждения сварных соединений трубопроводов под действием циклических растягивающих напряжений [1-4].

На Нововоронежской атомной электростанции была разработана методика и спроектировано оборудование для восстановления поврежденных поверхностей трубопроводов различных диаметров методом *поверхностного пластического деформирования* (ППД), приводящего к изменению распределения напряжений по толщине [5-10].

Изготовление тест-образца

Для апробации метода роликовой накатки на примере сварных соединений дыхательного трубопровода АЭС с энергоблоком ВВЭР-1000 был изготовлен полномасштабный тест-образец. Этот образец был использован для от-

работки технологии накатки композитных сварных соединений.

Было изготовлено 2 сварных соединения (рис. 1) 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 (КД) с трубопроводом Ду 350 ($\varnothing 426 \times 40$ мм).

Сварку и наплавку выполняли в соответствии с Технологической инструкцией № ТИ 10818.25 2 90.00001 на наплавку и сварку трубопроводов из плакированных труб $\varnothing 351 \times 36$ мм и $\varnothing 426 \times 40$ мм из стали 10ГН2МФА+08Х19Н10Г2Б для В-1000.

Измерение остаточного смещения поверхностного слоя

Исследования выполняли на 3D цифровом микроскопе Keyence VHX-600, обеспечивающем вывод информации на компьютер и последующую обработку изображений.

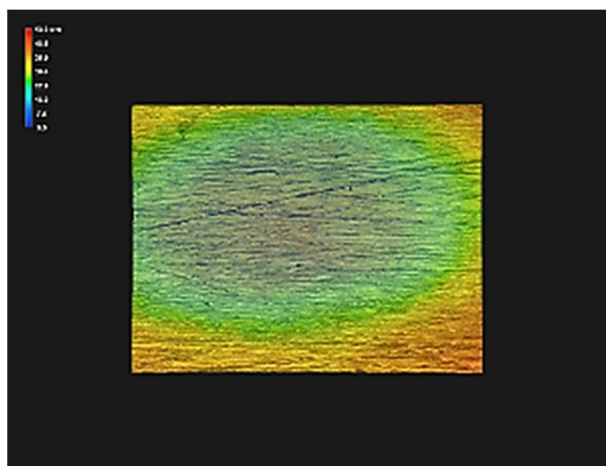
С помощью функции построения 3D профиля измерены остаточные смещения поверхностного слоя для следующих режимов обработки: одиночное вдавливание роликом,

нагрузкой, однопроходный и двухпроходный режимы с нагрузкой 2500 Н (рис. 2).

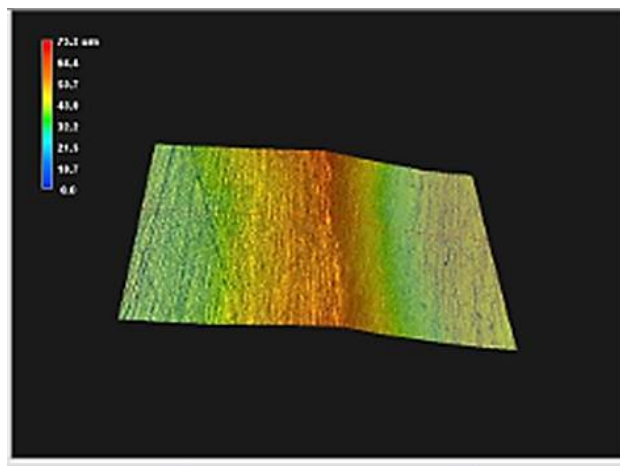


Рис. 1. Модельное композитное сварное соединение

Результаты измерений представлены в табл. 1.



а)



б)

Рис. 2. Измерение деформации поверхностного слоя: после одиночного вдавливание ролика нагрузкой 2500 Н без прохода (а); после однопроходной обработки с нагрузкой 2500 Н (б)

Таблица 1

Результаты измерения деформации 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

Расчетное значение остаточного смещения поверхностного слоя для однопроходного режима с нагрузкой 2500 Н составляет 28 мкм, что говорит о хорошей сходимости расчетных и экспериментальных данных. Также проведенный анализ состояния поверхности зоны наклепа показал отсутствие проскальзывания, залипания ролика на обрабатываемой поверхности, что указывает на правильный выбор рабочих параметров и хорошее исполнение рабочего узла.

Измерение твердости по Виккерсу

С целью сравнения значений твердости для исходной и обработанной поверхности методом ППД были проведены измерения твердости по Виккерсу с помощью твердомера Zwick

ZHU2,5, позволяющего определять твердость по Роквеллу, Бринеллю, Мартенсу, Виккерсу, Кнуппу с записью диаграмм индентирования и имеющего совмещенный оптический микроскоп для измерения полученного отпечатка.

Измерения проведены в соответствии с ГОСТ 2999-75 [11] при нагрузке 294,2 Н (30 кг). Вид диаграмм индентирования представлен на рис. 3. Также на рис. 4 представлены полученные отпечатки исходной и обработанной поверхностей. Результаты измерения значений твердости представлены в табл. 2.

Следует обратить внимание на топографию зоны вокруг отпечатка (рис. 4), где происходит пластическое деформирование при внедрении индентора.

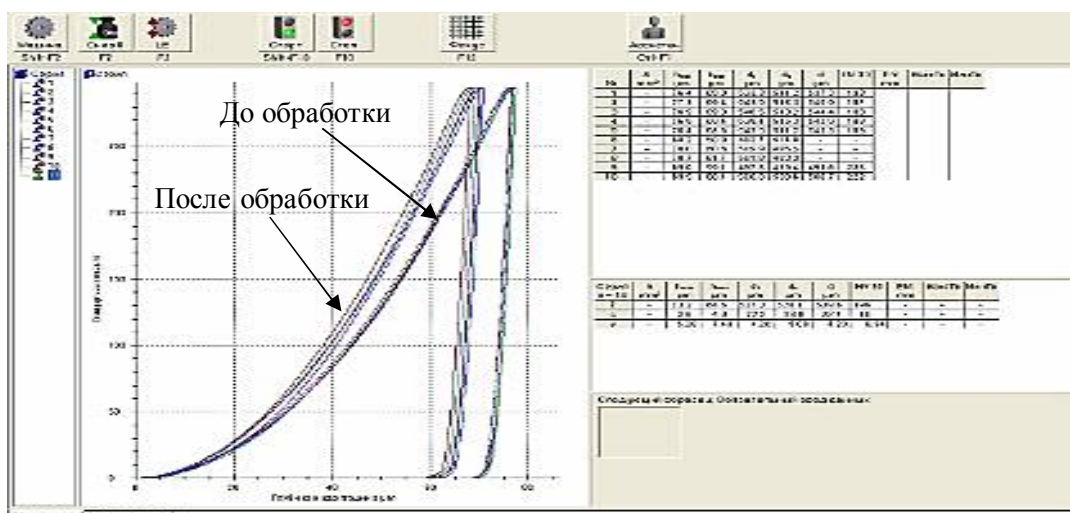


Рис. 3. Вид диаграмм индентирования при измерении твердости по Виккерсу до и после обработки

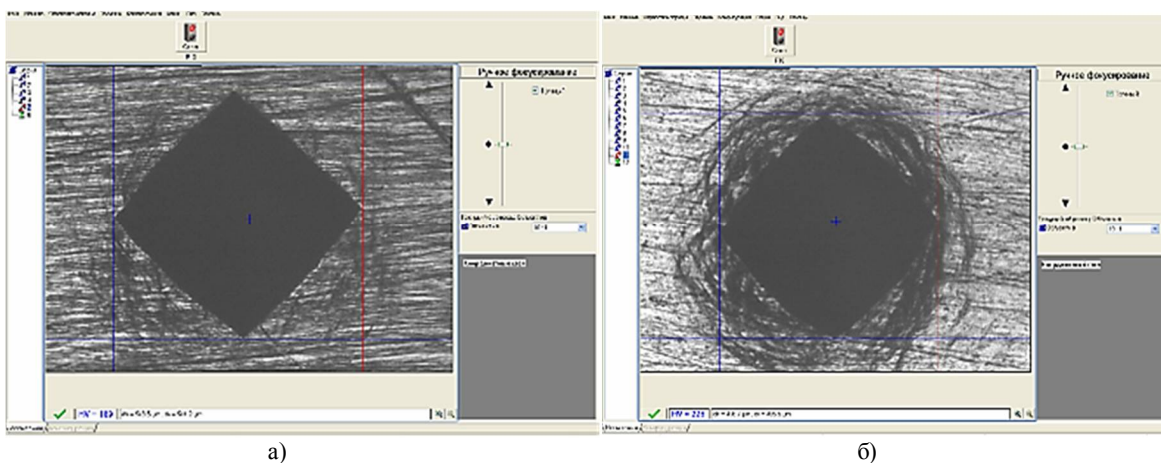


Рис. 4. Вид отпечатка: исходная поверхность (а); обработанная поверхность (б)

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

Величина и форма наплыва, а также топография наращивания позволяют оценить упрочняемость стали и предел текучести без изготовления разрывных образцов. Предварительный анализ отпечатков показывает высокий уровень стесненности металла в поверхностных слоях, что, в свою очередь, указывает на высокие остаточные деформации сжатия металла поверхности, а поднятие краев отпечатка по сравнению с исходным состоянием - на снижение упрочняемости.

По результатам измерения твердости можно сделать вывод, что значения твердости для однопроходного и двухпроходного режимов отличаются незначительно. Однако данный вывод нельзя сделать при сравнении значений твердости исходной и обработанной поверхностей, так как разница средних значений составляет около 17%.

Измерение микротвердости

Измерение микротвердости металла вырезки проводили в соответствии с ГОСТ 9450-76 на полуавтоматическом твердомере Zwick ZHV10, который позволяет измерять твердость по Виккерсу, Кнупу, Бринеллю при нагрузках от 10 г до 10 кг.

Испытания проводили путем вдавливания в образец алмазного наконечника в форме правильной четырехгранной пирамиды Виккерса под действием нагрузки в 200 грамм. Время выдержки под нагрузкой составляет 12 секунд для полного прохождения процессов пластической деформации. Измерение отпечатка проводилось оптическим методом на экране

компьютера с последующим переводом размера отпечатка в единицы твердости с применением программного обеспечения твердомера. Результаты измерения микротвердости для однопроходного режима и двухпроходного режима с нагрузкой 250 кг представлены в табл. 3 и 4 соответственно и проиллюстрированы на рис. 5.

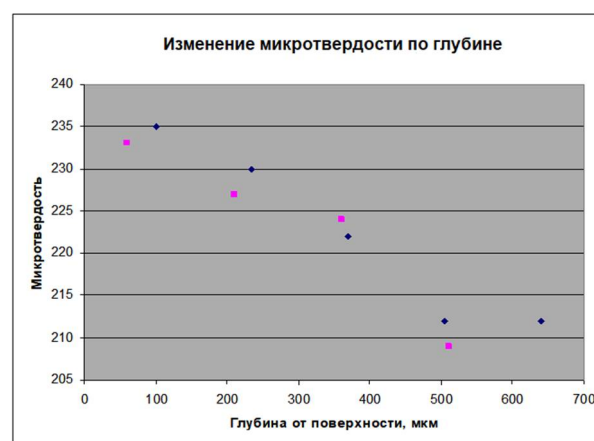


Рис. 5. Изменение микротвердости по глубине: □ – однопроходный режим, ◇ - двухпроходный режим

На рис. 6 представлены фотографии микроструктуры стали 10ГН2МФА для исходного состояния и в приповерхностном слое после обработки методом ППД.

Исходя из представленных фотографий можно сделать вывод, что микроструктура под зоной обработанной поверхности особенно не отличается по сравнению с исходной.

Таблица 3

Результаты измерения микротвердости для однопроходного режима

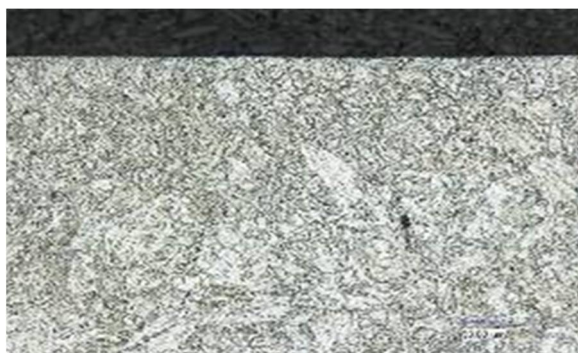
Измеряемая зона образца, мкм от обработанной поверхности	HV0,2	Среднее значение HV0,2
Исходная область металла	207; 210; 212; 212; 210	210±2
60	231; 229; 243; 233; 229	233±6
210	230; 223; 228; 225; 226	227±3
360	228; 217; 218; 232; 223	224±6
510	204; 206; 212; 207; 215	209±5

Результаты измерения микротвердости для двухпроходного режима

Измеряемая зона образца, мкм от обработанной поверхности	HV0,2	Среднее значение HV0,2
Исходная	197; 205; 208; 206; 210	205±5
100	225; 246; 228; 237; 240	235±9
235	230; 233; 224; 231; 231	230±3
370	219; 225; 223; 227; 217	222±4
505	202; 215; 217; 210; 218	212±7
640	206; 215; 220; 204; 211	212±7



а)



б)

Рис. 6. Микроструктура стали до (а) и после (б) обработки соответственно

Кинетическое индентирование

Для определения значений твердости поверхности (глубины и силы вдавливания) был использован метод инструментального индентирования (регламентируется ГОСТ Р 8.748), реализующий процедуру вдавливания жесткого индентора в испытуемый материал с непрерывной записью получаемых значений (прибор ТЕСТ-5У). На исследуемом образце стали 10ГН2МФА были проведены процедуры роликовой обработки в один и два прохода, затем методом кинетического индентирования шара диаметром 1мм получена запись многоцикло-вой диаграммы (рис. 7).

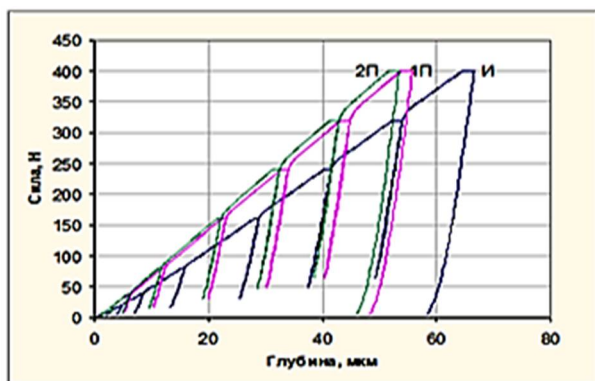


Рис. 7. Вид диаграмм индентирования шара диаметром 1мм в разные участки поверхности образца стали 10ГН2МФА

Произведено по три вдавливания в материал на различных участках поверхности образца: исходной (И), обработанной в 1 проход (1П), обработанной в 2 прохода (2П).

Анализ диаграммы растяжения, восстановленной по диаграмме индентирования, показал, что разница между результатами, полученными на поверхностях, обработанных в один и два прохода, мало различаются между собой, и это различие находится в пределах погрешности измерения. Полученные результаты сопоставлены с диаграммой растяжения. Предполагается, что в результате обработки материал поверхности образца деформируется и его свойства могут быть описаны посредством сдвига исходной диаграммы одноосного растяжения на величину пластической деформации. При этом результаты восстановления механических свойств хорошо ложатся на продолжение диаграммы одноосного растяжения исходного материала, сдвинутой по оси деформаций на абсолютную величину 15%.

Измерение остаточных напряжений по глубине материала методом Соуэтта и Ванкромбрюгге

Для определения остаточных напряжений был использован метод ступенчатого сверления отверстий, предложенный Соуэттом и Ванк-

ромбрюгге, позволяющий определять картины распределения напряжений по глубине материала с использованием дополнительных техник анализа. Суть данного метода заключается в позиционировании оси сверла с центром розетки тензорезисторов. При ступенчатом увеличении глубины отверстия происходит запись показаний тензорезисторов на каждом этапе сверления. В нашем случае результаты численных расчетов говорят о существовании неоднородного по глубине поля напряжений (рис. 8). Для измерения диаметра, глубины и эксцентрисите-

та отверстия (рис. 9) использовался цифровой микроскоп VHX-600.

Результаты проведенных экспериментов для трех образцов материала (ОМ) и двух сварных соединений (СС) с указанием глубин шагов сверления представлены на рис. 10.

По результатам расчетных исследований была проведена калибровка расчетной модели МКЭ, позволяющая произвести расчет процесса упруго-пластической деформации материала при различных режимах нагружения.

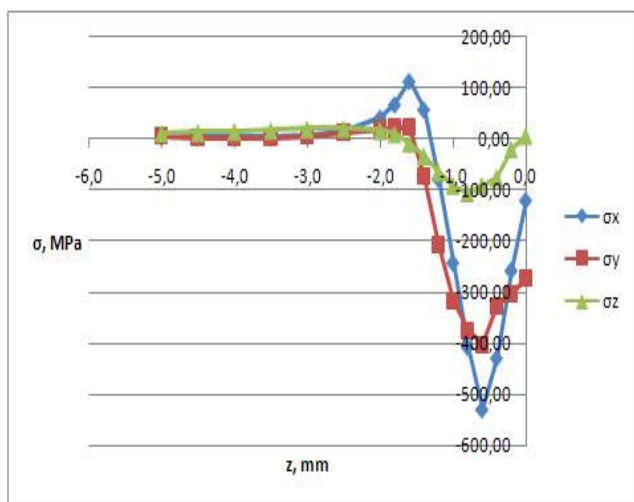


Рис. 8. Распределение остаточных напряжений по глубине материала для однопроходной обкатки роликом $R_{HP}=4.0\text{мм}$

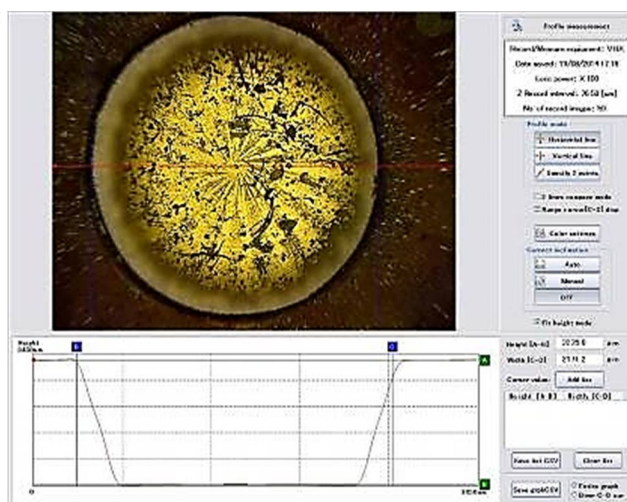
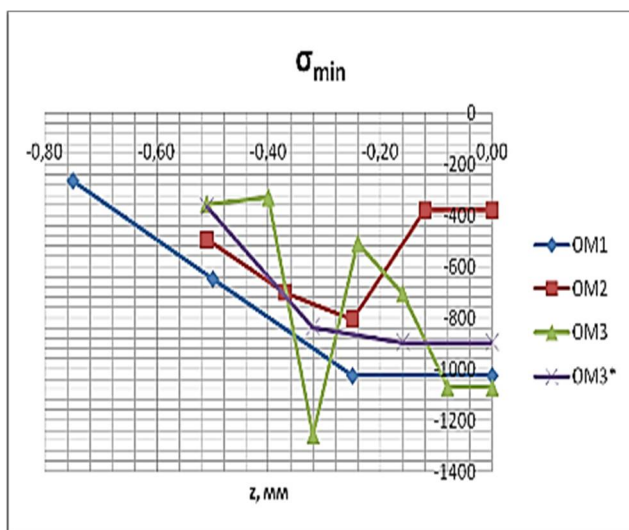
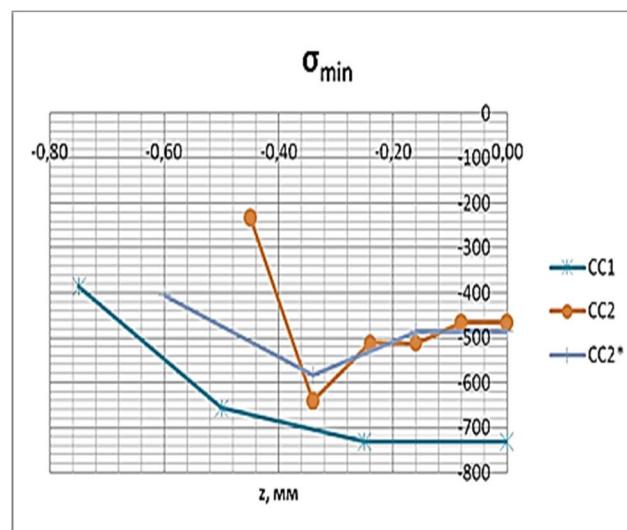


Рис. 9. Измерение профиля и глубины отверстия



а)



б)

Рис. 10. Распределения остаточных напряжений по глубине: а) для обкатанного основного металла; б) для обкатанного сварного соединения. * Эксперимент с увеличенными значениями шагов сверления

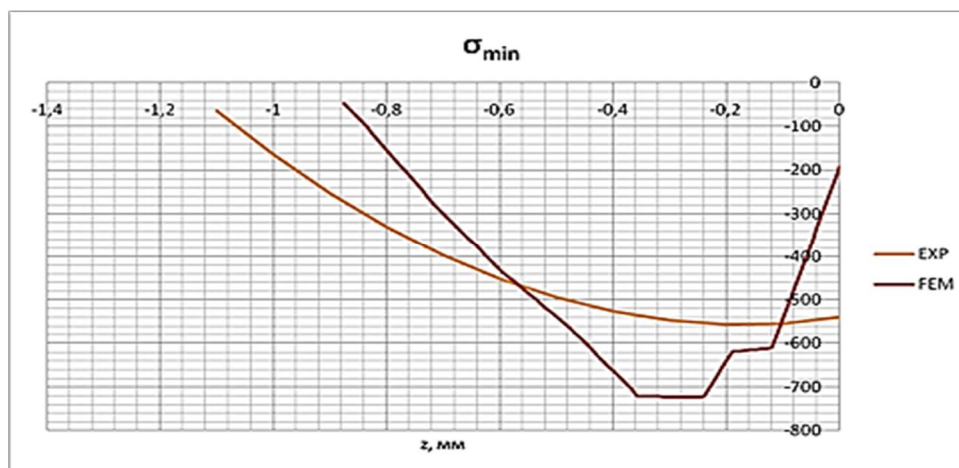


Рис. 11. Распределения остаточных напряжений после калибровки расчетной модели по глубине обкатки для сварного соединения

Для этого варьировались глубины обкатки до момента совпадения глубин распределения остаточных напряжений, полученных МКЭ и экспериментально методом ступенчатого расщепления для основного металла.

Проведенные расчетно-экспериментальные исследования показали хорошую сходимость расчетных данных (рис. 11) по распределению остаточных напряжений с экспериментальными результатами прямых измерений методом сверления отверстия.

Сопоставление результатов испытаний на циклическую прочность исходных полномасштабных образцов и полномасштабных образцов, прошедших обработку методом ППД, при $\sigma_a = (194-208)$ МПа показало преимущество по долговечности более чем в 10 раз: $N=3,05 \cdot 10^4$ циклов для исходных и $N=3 \cdot 10^5$ циклов для образцов, прошедших ППД. Следует отметить, что в образцах после ППД, прошедших тестовые испытания, трещин выявлено не было.

Заключение

Анализ результатов экспериментальных исследований физико-механических характеристик восстановленных поверхностей на соответствие их эксплуатационным требованиям позволил сделать вывод: значения твердости для однопроходного и двухпроходного режимов отличаются незначительно; микроструктура под зоной обработанной поверхности практически не отличается от исходной; результаты восстановления диаграммы одноосного растяжения по диаграмме индентирования исходного материала хорошо согласуется с экспери-

ментально полученной диаграммой растяжения; сходимость расчетных данных по распределению остаточных напряжений с экспериментальными результатами прямых измерений методом сверления отверстия говорит об их высоком совпадении; при испытании на циклическую прочность образцы после ППД показали значительное увеличение долговечности восстановленных СС по сравнению с исходными.

Данные исследования позволили сделать вывод о соответствии восстановленных поверхностей эксплуатационным требованиям, что подтверждает высокую эффективность разработанной на Нововоронежской АЭС технологии восстановительного ремонта поврежденных поверхностей и сварных соединений энергетических трубопроводов различного диаметра без остановки ядерного блока. Данная разработка за счет сокращения срока простоя оборудования ежегодно на 14 суток позволяет при дополнительно произведенной электроэнергии увеличить выручку предприятия более чем на 400 млн. рублей в год [6,10].

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. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018". 2018. P. 2009.

4. Data support system for controlling decentralised nuclear power industry facilities through uninterruptible condition monitoring / V. Povarov, A. Danilov, V. Burkovsky, K. Gusev // MATEC Web of Conferences. "13th International Scientific-Technical Conference on Electromechanics and Robotics "Zavalishin's Readings" - 2018". 2018. P. 2012.

5. Расчетно-экспериментальная оценка влияния термической стратификации на эксплуатационную нагрузку 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. 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.

7. Restoration of metal properties of the 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. P. 762-769.

8. The rolling simulation for cold work metal hardening / V. Urazov, A.D. Danilov, K.Yu. Gusev, P.Yu. Gusev, D.N. Meshkov // Journal of Physics: Conference Series. Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations. Krasnoyarsk, Russia, 2021. P. 42023.

9. Technology of nuclear power plant pipelines' joint welds' reconditioning repair by surface cold working method / O.V. Urazov, A.D. Danilov, K.Yu. Gusev, P.Yu. Gusev, I.A. Aksenov // AIP Conference Proceedings. Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences. Melville, New York, United States of America, 2021. P. 60007.

10. Уразов О.В., Данилов А.Д. Технический комплекс для восстановительного ремонта поверхностных повреждений трубопроводов методом поверхностного наклепа // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2022. Т. 18. № 1. С. 140-146.

11. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учеб. пособие. Иваново: Иван. гос. хим.-технол. ун-т, 2009. 64 с.

Поступила 15.04.2022; принята к публикации 14.06.2022

Информация об авторах

Уразов Олег Владимирович – заместитель директора, филиал АО «Концерн Росэнергоатом» «Нововоронежская атомная станция (396072, Россия, Воронежская обл., г. Нововоронеж, Промышленная зона Южная, 1), e-mail: urazovov@nvnpp1.rosenergoatom.ru

Егоров Владислав Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный университет инженерных технологий (394036, Россия, г. Воронеж, пр-т Революции, 19), e-mail: danilov-ad@yandex.ru

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

Дроздов Игорь Геннадьевич – д-р техн. наук, профессор, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, 20-летия Октября, 84), e-mail: drozdov_ig@mail.ru

STUDY OF THE PHYSICAL AND MECHANICAL CHARACTERISTICS OF THE COMPOSITE WELDED JOINTS OF NPP INSTALLATIONS RESTORED BY THE METHOD OF SURFACE PLASTIC DEFORMATION

O.V. Urazov¹, V.G. Egorov², A.D. Danilov³, I.G. Drozdov³

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

²Voronezh State University of Engineering Technologies, Voronezh, Russia

³Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: at the Novovoronezh nuclear power plant, a unique technique was developed and equipment was designed for the restoration of damaged composite welded joints of pipelines of various diameters by the method of surface plastic deformation (SPD) without shutting down the nuclear unit. The article presents the results of a study of the physical and mechanical characteristics of the restored joints to confirm their compliance with operational requirements. For this, we made a full-scale test sample of the welded joint of the NPP breathing pipeline with the VVER-1000 power unit. We measured the residual displacement of the surface layer on a Keyence VHX-600 3D digital microscope. An analysis of the deformation of the surface layer showed a high convergence of the calculated and experimental data. In order to compare the hardness values for the original and processed surface by the SPD method, we carried out Vickers hardness measurements using a Zwick ZHU2.5 hardness tester. Based on the results of hardness measurements, we concluded that the hardness values for single-pass and double-pass modes differ insignificantly. We measured the microhardness of the cut metal in accordance with GOST 9450-76 on a Zwick ZHV10 semi-automatic hardness tester, which makes it possible to measure the Vickers hardness at loads from 10 g to 10 kg.

To determine the surface hardness values, we used the instrumental indentation method (regulated by GOST R 8.748) using the TEST-5U instrument. We carried out the study of residual stresses along the depth of the material by the Sowett and Vancrombrugge method. Comparison of the results of testing for cyclic strength of the samples that have been processed by the PPD method at $\sigma_a = (194-208)$ MPa showed their advantage in durability by more than 10 times

Key words: surface plastic deformation, residual stress, microhardness, kinetic indentation

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" ("Avtomatizirovannaya sistema mnogoparametricheskogo monitoringa parametrov sostoyaniya energeticheskikh ustanovok AES"), Voronezh: Nauchnaya kniga, 2017, 276 p.
2. Povarov V.P., Bakirov M.B., Danilov A.D. "Data processing in the system of continuous monitoring of operational damage of critical elements of power plants", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2018, 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 uninterrupted 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. 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.
7. Povarov V.P., Urazov O.V., Bakirov M.B., Pakhomov S.S., Belunik I.A. "Restoration of metal properties of the circulation pump blades by the method of surface ultrasonic impact treatment", *Thermal Engineering*, 2017, vol. 64, no. 10, pp. 762-769.
8. Urazov O.V., Danilov A.D., Gusev K.Yu., Gusev P.Yu., Meshkov D.N. "The rolling simulation for cold work metal hardening", *Journal of Physics: Conference Series*, Krasnoyarsk Science and Technology City Hall of the Russian Union of Scientific and Engineering Associations, 2021, pp. 42023.
9. Urazov O.V., Danilov A.D., Gusev K.Yu., Gusev P.Yu., Aksenov I.A. "Technology of nuclear power plant pipelines' joint welds' reconditioning repair by surface cold working method", *AIP Conference Proc.*, Krasnoyarsk Scientific Centre of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Melville, New York, United States of America, 2021, pp. 60007.
10. Urazov O.V., Danilov A.D. "Technical complex for restoring repair of surface damage to pipelines by the method of surface hardening", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2022, vol. 18, no. 1, pp. 140-146.
11. Stepanova T.Yu. "Technologies of surface hardening of machine parts" ("Tekhnologii poverkhnostnogo uprochneniya detaley mashin"), study guide, Ivanovo State Chemical-Technological University, 2009, 64 p.

Submitted 15.04.2022; revised 14.06.2022

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
Vladislav G. Egorov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State University of Engineering Technologies (19, Revolutsii Ave., Voronezh 394036, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru
Aleksandr D. Danilov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: danilov-ad@yandex.ru
Igor' G. Drozdov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: drozdov_ig@mail.ru

ИССЛЕДОВАНИЕ КИНЕМАТИЧЕСКИХ УГЛОВ ФРЕЗЫ-ПРОТЯЖКИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ЭКСЦЕНТРИКОВЫХ ВАЛОВ

В.В. Куц, Ю.А. Мальнева, А. Бейе

Юго-Западный государственный университет, г. Курск, Россия

Аннотация: для повышения эффективности обработки эксцентриковых шеек вала был предложен способ, суть которого заключается в использовании фрез-протяжек при их базировании по оси вала. Предполагается, что направление вращения и частоты вращения вала и фрезы-протяжки совпадают и формообразование эксцентриковой шейки вала будет выполнено за один оборот инструмента. При реализации данного способа обработки ключевой задачей является создание инструмента, для чего необходимо выполнение комплекса теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку методов назначения его геометрических характеристик и режимов обработки. Получены формулы исходной инструментальной поверхности, режущих кромок, передней и задней поверхностей режущих зубьев фрезы. Показан результат моделирования установки плоскости передней поверхности для одного зуба и для всех режущих зубьев фрезы. С применением разработанного программного обеспечения было выполнено исследование изменения заднего угла в процессе фрезерования при различных величинах поперечной подачи, заднего угла от продольной подачи при различных значениях частот вращения вала и фрезы. Проведенные исследования позволили установить, что зубья фрезы работают в различных условиях. Применение разработанного программного обеспечения позволило определить значения задних углов, изготавливаемых на фрезе с позиции обеспечения равенства их кинематических значений в процессе контакта зубьев с припуском при обработке

Ключевые слова: фреза-протяжка, кинематические углы, формообразование, эксцентриковый вал, моделирование

Благодарности: работа выполнена при поддержке гранта Президента Российской Федерации на 2022-2023 годы. Номер проекта - МК-264.2022.4

Введение

В настоящее время эксцентриковые валы широко применяются в промышленности, например в таких изделиях, как кривошипные прессы и эксцентриковые насосы и пр. Однако существующие технологии изготовления этих валов обладают низкой эффективностью в условиях серийного и массового производства, что, в первую очередь, связано с необходимостью формирования технологических баз [1].

Для повышения эффективности обработки эксцентриковых шеек вала в работах [2,3] был предложен способ, суть которого заключается в использовании фрез-протяжек при его базировании по оси вала (рис. 1). Предполагается, что направление вращения и частоты вращения вала и фрезы-протяжки совпадают, и обработка эксцентриковой шейки вала будет выполнена за один оборот инструмента.

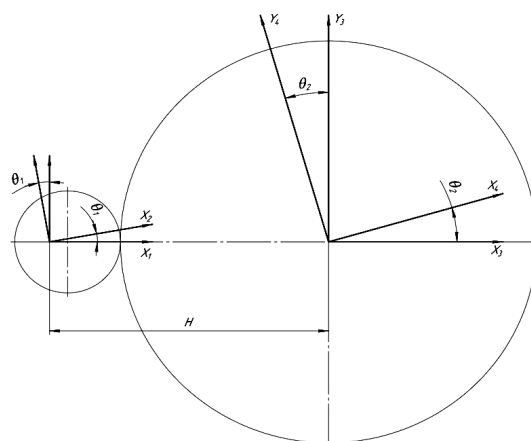


Рис. 1. Схема обработки эксцентриковой шейки фрезой-протяжкой

Построение модели фрезы-протяжки

При реализации данного способа обработки ключевой задачей является создание инструмента, для чего необходимо выполнение комплекса теоретических и экспериментальных исследований, направленных на разработку методов назначения его геометрических характеристик и режимов обработки. Начальным этапом подобного исследования является построение математической фрезы-протяжки, описания её исходной инструментальной поверхности, режущих кромок, передней и задней поверхностей режущих зубьев [4].

Уравнение исходной инструментальной поверхности может быть получено путем построения основного уравнения формообразования [5-7]

$$r_1(\theta, z) = A_{\Sigma} \cdot \bar{r}_f(\theta, z), \quad (1)$$

где $r_1(\theta, z)$ – уравнение эксцентриковой шейки в системе координат вала; θ – параметрический угол профиля шейки вала; z – параметр длины шейки вала; $\bar{r}_f(\theta, z)$ – уравнение исходной инструментальной поверхности; A_{Σ} – матрица, описывающая движение формообразования и установку фрезы-протяжки относительно обрабатываемого вала (рис. 1)

$$A_{\Sigma} = A^{\{6\}}(\theta_1) \cdot A^{\{1\}}(H) \cdot A^{\{6\}}(\theta_2), \quad (2)$$

где $A^{\{6\}}(\theta_1)$ – матрица поворота вала вокруг оси Z

$$A^{\{6\}}(\theta_1) = \begin{bmatrix} \cos \theta_1 & \sin \theta_1 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_1 & \cos \theta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

θ_1 – угол поворота вала; $A^{\{1\}}(H)$ – матрица, определяющая межосевое расстояние между фрезой-протяжкой и валом

$$A^{\{1\}}(H) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & H \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

H – величина межосевого расстояния между фрезой-протяжкой и валом; $A^{\{6\}}(\theta_2)$ – матрица поворота вала вокруг оси Z

$$A^{\{6\}}(\theta_2) = \begin{bmatrix} \cos \theta_2 & \sin \theta_2 & 0 & 0 \\ -\sin \theta_2 & \cos \theta_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

θ_2 – угол поворота фрезы-протяжки.

Уравнение обрабатываемой поверхности эксцентриковой шейки вала можно определить как (рис. 2)

$$\bar{r}_1(\theta, z) = A^{\{1\}}(e) \cdot \bar{r}_0(\theta, z) = [R \cos \theta + e, R \sin \theta, z, 1], \quad (3)$$

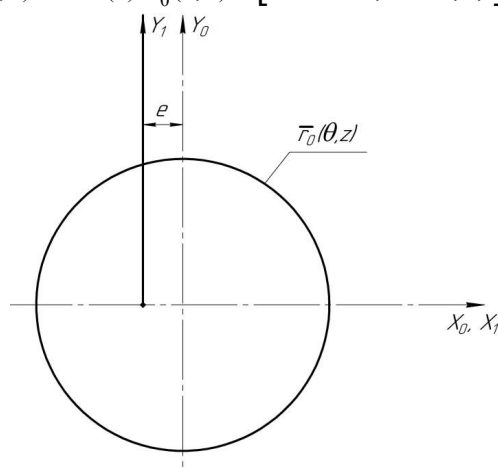


Рис. 2. Моделирование поверхности эксцентрикового вала

где $A^{\{1\}}(e)$ – матрица, задающая смещение образующей окружности эксцентрикового вала относительно оси вала на величину эксцентриситета e

$$A^{\{1\}}(e) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & e \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

e – эксцентриситет; $\bar{r}_0(\theta, z)$ – уравнение образующей окружности шейки вала

$$\bar{r}_0(\theta, z) = [R \cos \theta, R \sin \theta, z, 1];$$

R – радиус обрабатываемой шейки вала.

Искомое уравнение $\bar{r}_f(\theta, z)$ получим из (1) как

$$\bar{r}_f(\theta, z) = A_{\Sigma}^{-1} \cdot \bar{r}_1(\theta, z),$$

принимая $\theta_2 = -\theta$ и $\theta_1 = \theta_2$ в матрице A_{Σ} (2), получим

$$\bar{r}_f(\theta, z) = [e + (R - H) \cos \theta, (R - H) \sin \theta, z, 1]^T.$$

Для моделирования режущих зубьев построим уравнение плоскости передней поверхности, проходящей через точку производящей поверхности фрезы $\bar{r}_f(\theta, z)|_{\theta=\theta_k, z=0}$ и об-

разующей заданный передний угол зуба фрезы γ и угол наклона режущих кромок фрезы ω

$$\bar{r}_p(\theta, z, u, v) = A_0^{-1}(\theta) \cdot A^{(6)}(\omega) \cdot A^{(5)}\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot A^1(u) \cdot A^2(v) \cdot \bar{e}^4 \Big|_{\theta=\theta_k, z=0} \quad (4)$$

где $A_0(\theta)$ - матрица плоскости передней поверхности, которую определяем по трем векторам [5-7]:

$$\bar{j}_{0f} = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T,$$

$$\bar{k}_{0f} = \left[\begin{array}{c} \bar{r}_{fXY}(\theta, z) \Big|_{\theta=\theta_k, z=0} \\ \bar{r}_{fXY}(\theta, z) \Big|_{\theta=\theta_k, z=0} \end{array} \right];$$

$$\bar{i}_{0f} = \bar{r}_{fXY}(\theta, z) \Big|_{\theta=\theta_k, z=0},$$

где \bar{r}_{fXY} - проекция вектора производящей поверхности на координатную плоскость XOY ; θ_k - угловой параметр определения положения k -го зуба фрезы.

Уравнение режущей кромки фрезы определим путем решения уравнения

$$\bar{r}_p(u, v) = \bar{r}_f(\theta, z), \quad (5)$$

где $\bar{r}_p(u, v) = \bar{r}_p(\theta, z, u, v) \Big|_{\theta=\theta_k, z=0}$

относительно параметров u, v, θ и подстановки полученного решения $u=u(z), v=v(z), \theta=\theta(z)$ в уравнение (4)

$$\bar{r}_{fpk}(z) = \bar{r}_{pk}(u(z), v(z)).$$

Векторы нормали к передней и задней поверхностям зубьев фрезы зададим как:

$$\bar{N}_\Pi(\theta_k) = -A_0^{-1}(\theta_k) \cdot A^{(6)}(\omega) \cdot A^{(5)}\left(\frac{\pi}{2} + \gamma\right) \cdot \bar{k}_f, \quad (6)$$

где $\bar{k}_f = [0 \ 0 \ 1 \ 0]^T$.

$$\bar{N}_3(\theta) = -A_0^{-1}(\theta_k) \cdot A^{(6)}(\omega) \cdot A^{(5)}(\alpha) \cdot \bar{k}_f, \quad (7)$$

где α - задний угол зуба фрезы.

На рис. 3, а показан результат моделирования установки плоскости передней поверхности для одного зуба фрезы, а на рис. 3, б показан результат моделирования всех режущих зубьев фрезы.

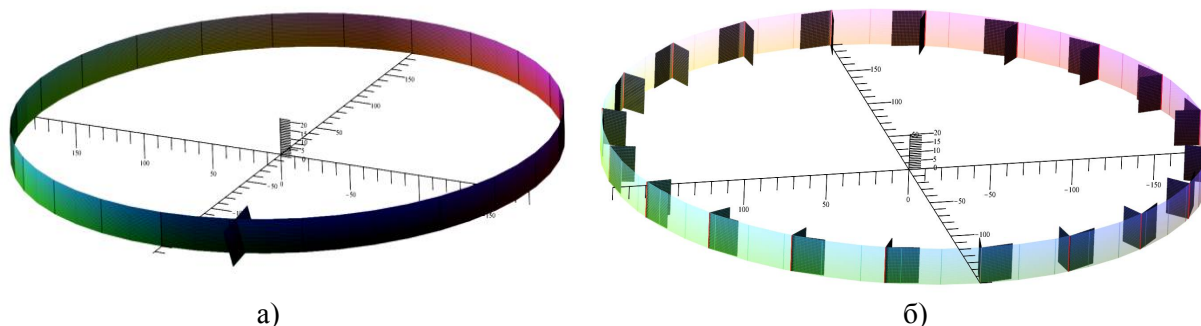


Рис. 3. Моделирование зубьев фрезы при $\gamma = 10^\circ, \omega = 15^\circ$:
а) установка плоскости передней поверхности для одного зуба фрезы;
б) моделирование всех режущих зубьев фрезы

Исследование кинематических углов фрезы-протяжки

Так как в процессе работы фрезы углы и изменяются и зависят от режимов обработки и геометрических параметров фрезы и эксцентрикового вала, то целесообразно установить соответствующие пределы их варьирования. Данная оценка выполнена на основании математического моделирования с применением геометрической теории проектирования режущего инструмента [5].

В соответствии с [5], кинематический передний угол для k -го зуба определялся по формуле:

$$\gamma(\theta_k, z, t) = \arcsin(-\bar{N}_\Pi(\theta) \cdot \bar{N}_p(\theta_k, z, t)), \quad (8)$$

где

$$\bar{N}_p(\theta_k, z, t) = \frac{\bar{V}(\theta_k, z, t) \cdot [\bar{N}_3(\theta_k) \cdot \bar{N}_\Pi(\theta_k)]}{|\bar{V}(\theta_k, z, t) \cdot [\bar{N}_3(\theta_k) \cdot \bar{N}_\Pi(\theta_k)]|} \cdot \text{sgn}(-\bar{V}(\theta_k, z, t) \cdot [\bar{N}_3(\theta_k) \cdot \bar{N}_\Pi(\theta_k)] \cdot \bar{N}_\Pi(\theta_k)),$$

где $\bar{V}(\theta_k, z, t)$ - вектор скорости резания

$$\bar{V}(\theta_k, z, t) = A_{\Sigma}^{-1} \Big|_{\theta=\theta(t), H=H(t)} \cdot \frac{\partial \bar{Q}(\theta_k, z, t)}{\partial t};$$

где $\bar{Q}(\theta_k, z, t)$ - поверхность резания, описываемая режущими кромками зубьев фрезы в процессе обработки

$$\bar{Q}(\theta_k, z, t) = A_{\Sigma} \Big|_{\theta=\theta(t); H=H(t)} \cdot \bar{r}_{fk}(\theta, z) \Big|_{\theta=\theta_k},$$

где $\theta(t)$ - функция изменения угла поворота фрезы и заготовки от времени

$$\theta(t) = \frac{N \cdot \pi \cdot t}{30},$$

где N - число оборотов фрезы и вала (об/мин);

$H(t)$ - функция, описывающая сближение фрезы и вала в процессе обработки.

$$H(t) = \begin{cases} H_0 - \frac{S_m \cdot t}{60}, & \text{при } H_0 - \frac{S_m \cdot t}{60} > H; \\ H_0, & \text{при } H_0 - \frac{S_m \cdot t}{60} \leq H, \end{cases}$$

где $\theta(t)$ - начальное межосевое расстояние между фрезой и валом, мм; S_m - подача сближения, мм/мин; t - время обработки, с.

С применением разработанного программного обеспечения было выполнено исследование изменения заднего угла в процессе фрезерования. На рис. 4 видно, что при номинальном значении заднего угла на первом зубе равном 10° его величина изменяется в процессе резания от 11° до $8,5^\circ$ и наименьшее значение угла соответствует моменту выхода режущего зуба из материала заготовки.

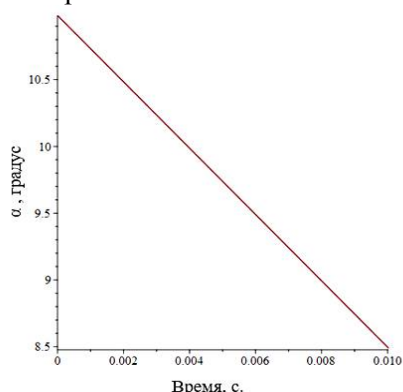


Рис. 4. Изменение заднего угла для 1-го режущего зуба фрезы при $R=20$ мм, $e=10$ мм, $S_m=1$ мм/мин, $N=40$ об/мин

На рис. 5 показаны графики изменения величины заднего угла для зубьев фрезы в

момент выхода зуба при различных величинах поперечной подачи S_m .

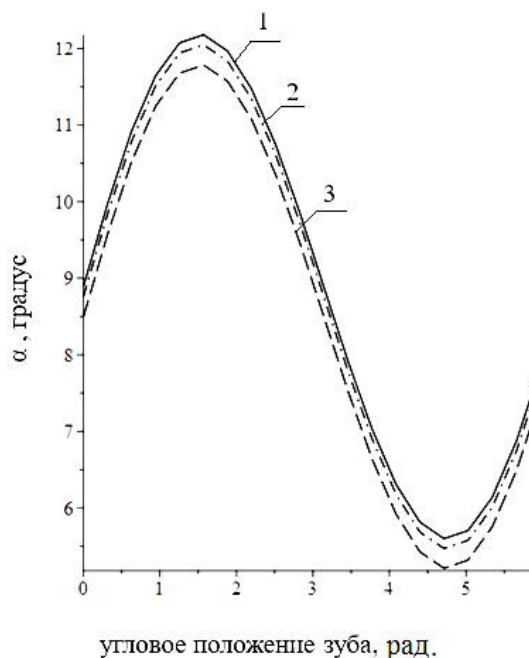


Рис. 5. Изменение заднего угла для зубьев фрезы при $H=200$ мм, $R=20$ мм, $e=10$ мм, $N=40$ об/мин при подаче S_m равной: 1) 5 мм/мин; 2) 10 мм/мин; 3) 20 мм/мин.

Из графиков видно, что зубья фрезы работают в разных условиях, так при подаче $S_m=5$ мм/мин наименьшее значение заднего угла изменяется в пределах от $12,2^\circ$ до $5,5^\circ$. Также из графиков видно, что при различных величинах поперечной подачи наименьшая величина заднего угла соответствует зубу, занимаемому угловое положение 270° , а наибольшее 90° .

На рис. 6 показан результат расчета изменения заднего угла от продольной подачи при различных значениях частот вращения вала и фрезы для зуба, занимающего угловое положение 270° .

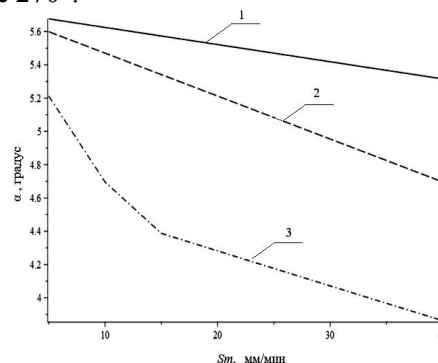


Рис. 6. Изменение заднего угла для зубьев фрезы от подачи S_m при $H=200$ мм, $R=20$ мм, $e=10$ мм при числе оборотов равно: 1) 100 об/мин; 2) 40 об/мин; 3) 20 об/мин

Выводы

Проведенные исследования позволили установить, что зубья фрезы работают в различных условиях, перепады задних углов составляют до $6,7^\circ$. Применение разработанного программного обеспечения позволило определить значения статических задних углов на фрезе, обеспечивающих их изменение в пределах контакта с припуском в заданных одинаковых диапазонах.

Литература

1. Игнатъев Н.П. Проектирование механизмов: справочно-методическое пособие. Азов: АзовПечать, 2015. 268 с.
2. Куц В.В., Разумов М.С., Мальнева Ю.А. Моделирование производящих поверхностей фрез с конструктивной радиальной подачей для обработки эксцентриковых валов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2016. № 8-1. С. 126-131.
3. Куц В.В., Ивахненко А.Г., Сторублев М.Л. Синтез производящих поверхностей фрез - протяжек для обработки валов с равноосным контуром // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2012. № 8. С. 42-48.
4. Пат. RU 2631576 С РФ. Способ обработки эксцентриковых валов / Куц В.В., Шитиков А.Н.; 25.09.2017; заявл. 28.11.2016; опубл. 25.09.2017, Бюл. №27. 9с.

5. Лашнев С.И., Борисов А.Н., Емельянов С.Г. Геометрическая теория формирования поверхностей режущими инструментами: монография. Курск: Курск. гос. техн. ун-т, 1997. 391 с.

6. Ивахненко А.Г., Куц В.В. Предпроектные исследования металлорежущих систем: монография. Курск: Юго-Западный государственный университет, 2013. 177 с.

7. Методология структурно-параметрического синтеза металлорежущих систем: монография/ А.Г. Ивахненко, В.В. Куц, О.Ю. Еренков, А.В. Олейник, М.Ю. Сариллов. Комсомольск-на-Амуре: Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет, 2015. 282с.

8. Кузьменко А.П., Куц В.В., Максименко Ю.А. Моделирование режущих кромок дисковой фрезы с переменным радиусом, предназначенной для обработки РК-профильных валов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2012. №1(40). Ч.1. С.116-120.

9. Максименко Ю.А., Куц В.В. Моделирование различных конструктивных исполнений режущих кромок фрезы с переменным радиусом для обработки валов с равноосным контуром // Поколение будущего: Взгляд молодых ученых. Курск: Закрытое акционерное общество "Университетская книга", 2012. С. 97-101.

10. Максименко Ю.А. Создание метода проектирования дисковых фрез с конструктивным исполнением радиальной подачи для обработки валов с РК- и К-профилем: автореф. дис.... канд. техн. наук. Курск: Юго-Зап. гос. ун-т, 2014. 20с.

Поступила 13.04.2022; принята к публикации 14.06.2022

Информация об авторах

Куц Вадим Васильевич – д-р техн. наук, профессор кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru
Мальнева Юлия Андреевна – канд. техн. наук, доцент, заведующая кафедрой дизайна и индустрии моды, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: yuliyamaximencko2010@yandex.ru
Абрахаман Бейе – аспирант кафедры машиностроительных технологий и оборудования, Юго-Западный государственный университет (305040, Россия, г. Курск, ул. 50 лет Октября, 94), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

INVESTIGATION OF CHANGES IN THE KINEMATIC ANGLES OF THE MILLING CUTTER DURING THE PROCESSING OF ECCENTRIC SHAFTS

V.V. Kutz, Yu.A. Mal'neva, A. Beye

Southwest State University, Kursk, Russia

Abstract: to increase the efficiency of processing eccentric shaft necks, we propose a method, the essence of which is to use milling cutters when basing it along the shaft axis. We assumed that the direction of rotation and the rotation frequency of the shaft and the broach cutter coincide, and the shaping of the eccentric shaft neck will be performed in one turn of the tool. When implementing this processing method, the key task is to create a tool, for which it is necessary to perform a set of theoretical and experimental studies aimed at developing methods for assigning its geometric characteristics and processing modes. We obtained formulas of the initial tool surface, cutting edges, front and back surfaces of the cutter teeth. We show the result of modeling the installation of the plane of the front surface for one tooth and for all the cutting teeth of the cutter. Using the developed software, we carried out a study of the changes in the rear angle during milling at different values of the transverse feed, the rear angle from the longitudinal feed at different values of the rotational speeds of the shaft and the milling cutter. The conducted research allowed us to establish that the teeth of the milling cutter work in various conditions. The application of the developed software will allow one to determine the values of the static rear angles on the milling cutter ensuring their change within the contact with the allowance in the specified ordinates of the range.

Key words: broach cutter, kinematic angles, shaping, eccentric shaft, modeling

Acknowledgements: the work was supported by a grant from the President of the Russian Federation for 2022-2023. Project number - МК-264.2022.4

References

1. Ignat'ev N.P. "Mechanism design: reference manual" ("Proektirovanie mekhanizmov: cpravochno-metodicheskoe posobie"), Azov: AzovPechat', 2015.
2. Kuts V.V., Razumov M.S., Mal'neva Yu.A. "Modeling of the producing surfaces of cutters with constructive radial feed for processing eccentric shafts", *New of Tula State University. Technical science. (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.)*, 2016, no. 8-1, pp. 126-131.
3. Kuts V.V., Ivakhnenko A.G., Storublev M.L. "Synthesis of producing surfaces of cutters - broaches for processing shafts with an equiaxed contour", *New of Tula State University. Technical science. (Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki.)*, 2012, no. 8, pp. 42-48.
4. Kuts V.V., Shitikov A.N. "Method for processing eccentric shafts" ("Sposob obrabotki ekstsentrkovykh valov"), patent RU 2631576 C RF, 09/25/2017, dec. 11/28/2016, publ. 09/25/2017, bull. 27, 9 p.
5. Lashnev S.I., Borisov A.N., Emel'yanov S.G. "Geometric theory of surface formation by cutting tools" ("Geometricheskaya teoriya formirovaniya poverkhnostey rezhushchimi instrumentami"), monograph, Kursk State Technical University, 1997, 391 p.
6. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V. "Pre-project studies of metal-cutting systems" ("Predproektnye issledovaniya metallorezhushchikh sistem"), monograph, Kursk, Southwest State University, 2013, 177 p.
7. Ivakhnenko A.G., Kuts V.V., Erenkov O.Yu., Oleynik A.V., Sarilov M.Yu. "Methodology of structural-parametric synthesis of metal-cutting systems" ("Metodologiya strukturno-parametricheskogo sinteza metallorezhushchikh sistem"), monograph, Komсомolsk-on-Amur State Technical University, 2015, 282p.
8. Kuz'menko A.P., Kuts V.V., Maksimenko Yu.A. "Modeling of the cutting edges of a disk cutter with a variable radius, designed for processing RK-profile shafts", *News of Southwest State University (Izvestiya Yugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta)*, 2012, no. 1 (40), pp. 116-120.
9. Maksimenko Yu.A., Kuts V.V. "Modeling of various designs of cutting edges of a cutter with a variable radius for processing shafts with an equiaxed contour", *Generation of the Future: A View of Young Scientists (Pokolenie budushchego: Vzglyad molodykh uchennykh)*, Kursk: Universitetskaya kniga, 2012, pp. 97-101.
10. Maksimenko Yu.A. "Creation of a method for designing disk cutters with a radial feed design for processing shafts with a RK- and K-profile" ("Sozdanie metoda proektirovaniya diskovykh frez s konstruktivnym ispolneniem radial'noy podachi dlya obrabotki valov s RK- i K-profilem"), Cand. of Tech. Sciences diss., Kursk: Southwest State University, 2014, 20 p.

Submitted 13.04.2022; revised 14.06.2022

Information about the authors

Vadim V. Kuts, Dr. Sc. (Technical), Professor, Southwest State University (94, 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

Yuliya A. Mal'neva, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Head of the Department of DiIM, Southwest State University (94, 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: yuliyamaximencko2010@yandex.ru

Abdrahman Beye, graduate student, Southwest State University (94, 50 let Oktyabrya str., Kursk 305040, Russia), e-mail: kuc-vadim@yandex.ru

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТОЛЩИНЫ УЗКИХ КОЛЛЕКТОРНЫХ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

В.В. Шурупов, Д.И. Бокарев, В.П. Чумарный, С.В. Сафонов, М.Н. Давыдов

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: предложен способ, позволяющий определять толщину материала в изделиях сложной конструктивной формы, исключающий возможность применения обычных средств контроля, обеспечивающий высокие чувствительность и точность измерений и не требующий высокой квалификации специалиста. Способ относится к неразрушающим методам контроля и может быть использован при контроле толщины металлических материалов, а также для определения величины проплавления и (или) утонения сварных швов, выполненных преимущественно в труднодоступных для механических средств контроля местах изделий, имеющих, например, узкие коллекторные сварные соединения. При прохождении ионизирующего излучения через твердое тело часть энергии излучения теряется. Количество энергии излучения, прошедшего через материал, изменяется пропорционально его толщине. Таким образом, исследование зависимости изменения интенсивности рентгеновского излучения от наличия и размера несплошности явилось весьма актуальной задачей, решение которой позволило обеспечить одновременный контроль качества сварного соединения на наличие внутренних дефектов и произвести замер толщины соединения. Как показали проведенные исследования, необходимым и достаточным условием для оценки размера искомой величины (толщины соединения) является определение отношения интенсивностей излучений до и после объекта контроля

Ключевые слова: толщина, сварное соединение, ионизирующее излучение, интенсивность, фотометрирование, плотность почернения пленки, радиографирование, коллектор

Введение

Проведение неразрушающего контроля радиационными методами основано на способности ионизирующих излучений, генерируемых источником, проникать с определенной степенью ослабления через сварное соединение и воздействовать на регистрирующее устройство (рис. 1). При радиографии в качестве регистратора используется рентгеновская пленка. При радиоскопии излучение преобразуется в видимое изображение. А при радиометрическом методе ионизирующее излучение, прошедшее через объект контроля, считывается в виде электрического сигнала.

На практике при оценке качества сварных соединений и основного материала металлических конструкций применяют в основном радиографический контроль, при котором имеется возможность не только оценки, но и документирования результатов контроля.

Схема реализации процесса радиографии при оценке качества сварного соединения через одну стенку приведена на рис. 1.

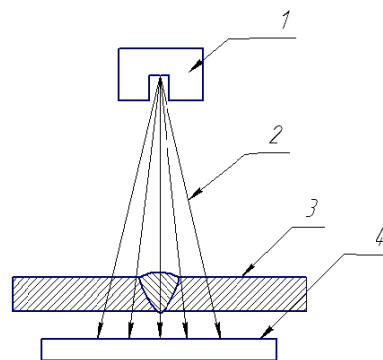


Рис. 1. Схема радиографического метода контроля: 1- источник излучения; 2-лучи; 3- контролируемое соединение; 4- детектор (рентгеновская пленка)

При прохождении излучения через вещество его интенсивность уменьшается, т.к. часть энергии теряется. Ослабление интенсивности узкого пучка излучения происходит в соответствии с законом ослабления интенсивности [1]:

$$J_d = J_0 \cdot e^{-\mu d}, \quad (1)$$

где J_0 – интенсивность излучения при отсутствии контролируемого изделия при выходе из источника, с^{-1} , м^{-2} ; J_d – интенсивность излучения после прохождения через изделие толщиной d ; μ – линейный коэффициент ослабления интенсивности излучения (зависит от материала объекта контроля).

После логарифмирования выражения (1) получим:

$$\ln J_d = \ln J_0 \cdot (-\mu d) \quad (2)$$

Отсюда

$$d = -\frac{\ln J_d}{\ln J_0 \cdot \mu} \quad (3)$$

Таким образом, из зависимости (3) следует, что толщина металла, через который проникает ионизирующее излучение, может быть установлена при условии определения интенсивности непосредственно со стороны источника излучения и интенсивности прошедшего через контролируемое сечение излучения.

Постановка задачи

Количественно данные интенсивности могут быть определены с помощью фотометрирования, например, при использовании денситометра. Однако, как показали проведенные исследования, достаточным условием для оценки размера искомой величины (толщины соединения) является определение отношения интенсивностей излучений до и после объекта контроля.

Известен способ определения размера дефекта в направлении просвечивания, включающий в себя радиографирование дефектного участка с применением канавочного эталона чувствительности [2], просмотр полученной рентгенограммы с созданием дополнительного светового потока переменной мощности в направлении наблюдателя и плавным повышением его интенсивности до исчезновения изображения дефекта и соответствующей канавки дефектометра. Размер дефекта при этом устанавливается по размеру наиболее глубокой канавки дефектометра, изображение которой пропадает при тех же условиях наблюдения [3]. Поскольку дефектом сварного шва является несплошность, то плотность

почернения пленки на этом участке будет большей по сравнению с плотностью почернения прилегающих участков.

Приведенный метод благодаря своей простоте позволяет достичь экспрессность при определении дефекта в материале. Однако существенным недостатком метода является то, что его практическое применение обуславливает дополнительную погрешность измерения, заключающуюся в следующем. Собственная толщина эталона чувствительности при наложении его на исследуемый материал суммируется с этим материалом. Таким образом, при реальной толщине исследуемого материала (фактической толщине материала под канавкой) появляется дополнительное изменение оптической плотности рентгеновского снимка за счет толщины самого эталона чувствительности под канавкой, имитирующей дефект. Кроме того, не рекомендуется оценка величины дефектов по протяженности в глубину сравнением почернения дефекта и канавки эталона на снимке [4].

Близким по технической сущности к предлагаемому является способ измерения толщины слоя кратного ослабления рентгеновского излучения [5], включающий экспонирование рентгеновской пленки, частично накрытой измерительным клином, и по почернению пленки на различных участках, определение слоя кратного ослабления, затем дополнительное экспонирование рентгеновской пленки, частично накрытой измерительным клином, остальная часть которой экранирована от излучения, например, с помощью свинцовой пластинки. При этом отношение первой и дополнительной экспозиций выбирается равным $1/(n-1)$, где n – требуемая кратность ослабления, а толщина слоя кратного ослабления определяется по одинаковой плотности почернения участков пленки под клином и открыто экспонированного в течение одной из экспозиций участка пленки.

Недостатком приведенного способа является снижение его чувствительности за счет существующего субъективного фактора: по известным данным [6] человек в состоянии обнаружить области, отличающиеся почернением, на 2 %.

Задача, решаемая при разработке предлагаемого метода, состояла в повышении точности контроля толщины металлических

материалов, а также определении величины утонения и (или) проплавления сварных швов с одновременным контролем качества соединений, выполненных в труднодоступных для механических средств контроля местах изделий, исключающих возможность такого контроля.

Методика исследований

Типичной конструкцией изделия с коллекторным сварным соединением является двухслойный сопловой элемент жидкостного ракетного двигателя, изображенный на рис. 2, и его коллекторное соединение, представленное на рис. 3.

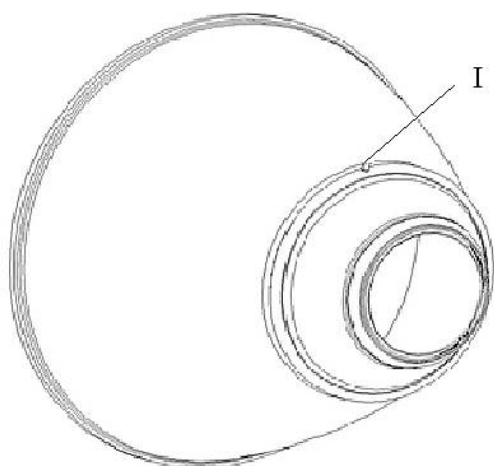


Рис. 2. Общий вид двухслойной оболочки жидкостного ракетного двигателя

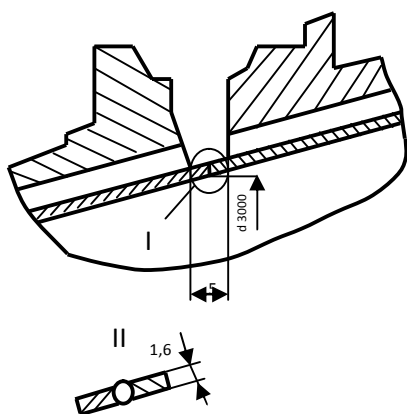


Рис. 3. Сечение коллекторной части

Поставленная задача была решена тем, что при выполнении ранее известных приемов (экспонирование контролируемого объекта, определение оптической плотности

полученных рентгенограмм и последующее сравнение найденных значений с целью определения слоя кратного ослабления толщины материала контролируемого объекта) для определения отношений плотности почернения рентгенограмм изготавливается эталон из материала, аналогичного исследуемому, представляющий собой пластину переменной дискретной толщины в виде ступенек с базовой (контрольной) толщиной в зависимости от номинальных значений толщины материала или предполагаемой величины, например, проплава и (или) утонения сварного шва контролируемого изделия с интервалом по толщине 0,1 мм и предельным отклонением от номинальной толщины $\pm 0,05$ мм. Выполняется рентгенограмма всех участков различной толщины в течение одной экспозиции. На имеющейся рентгенограмме с помощью фотометрирования определяется оптическая плотность соответствующих участков различной толщины эталона. По полученным данным составляется таблица отношений зависимостей плотности почернения пленки от соответствующих значений толщины эталона. В результате чего имеются количественные зависимости отношений плотности почернения пленки, соответствующие значениям известных толщин исследуемого (контролируемого) материала. Полученные таким образом данные могут быть накоплены и постоянно использоваться в процессе дальнейшей работы, т.к. именно отношения плотностей почернения пленки, соответствующие заданным толщинам для данного материала вне зависимости от режимов экспонирования, являются постоянной величиной.

Для сравнения отношений оптической плотности контролируемого участка изделия используется контрольная пластина толщиной равной номинальному значению толщины исследуемого материала или ее предполагаемой толщине, близкой по значению к одной из толщин эталонного образца. С целью обеспечения равномерности потоков рентгеновского излучения, проходящих через исследуемый участок и контрольную пластину, применяется делительное устройство, устанавливаемое на рентгеновскую трубку и представляющее собой на выходе из анодного отверстия трубки два раздвоенных цилиндра с углом между их расходящимися осями 30° , и изолированных

друг от друга свинцовой пластиной. А для исключения субъективного фактора и обеспечения точности определения отношений плотностей почернения рентгенограмм эталона, контрольной пластины и исследуемого материала применяется фотометрирование полученных рентгенограмм.

Как показали эксперименты, предпочтительным вариантом конструкции эталонного объекта является его ступенчатый профиль с постоянным шагом изменения толщины.

При этом совокупность признаков, отличительных от вышеприведенных [1, 3], сводится к следующим:

- использование фотометрирования с целью исключения субъективного фактора и повышения точности при определении оптической плотности рентгенограмм;

- определение истинных значений толщины контролируемого материала по отношениям плотностей почернения рентгенограмм эталонного объекта, контрольной пластины и исследуемого объекта;

- использование в качестве эталонного объекта пластины ступенчатого профиля с предельным отклонением от номинальных значений контролируемой толщины, составляющим $\pm 0,05$ мм, и постоянным шагом изменения толщины равным 0,1 мм;

- радиографирование исследуемого материала и контрольной пластины осуществляют одновременно, применяя при этом делительное устройство, обеспечивающее равномерное распределение потоков рентгеновского излучения и одинаковые фокусные расстояния до контрольной пластины и объекта контроля.

Как видно из представленной совокупности отличительных признаков, она включает в себя новую последовательность приемов определения толщины материала в изделиях, заключающуюся в применении эталонного объекта ступенчатого профиля с постоянным по величине шагом и использовании контрольной пластины толщиной равной или близкой по значению толщине испытуемого изделия, а также применении сравнения отношений оптических плотностей рентгенограмм, определенных с помощью фотометрирования.

Совершенно очевидно, что применяемые ранее способы определения толщины

материалов или размеров дефектов в направлении просвечивания с помощью рентгенографии, основанные на сравнении оптических плотностей почернения эталонных образцов (канавок и т.п.) и расположенных под ними контролируемых участков изделия, имеют невысокую точность из-за наличия ряда факторов, снижающих чувствительность контроля (изменение оптической плотности рентгенограмм за счет дополнительной толщины самих эталонов, визуального определения оптической плотности контролируемых участков, включающего роль субъективного фактора в появлении погрешности измерения), и, кроме того, не всегда удается наложить эталон чувствительности на контролируемый участок, расположенный в труднодоступном месте, например, узкое коллекторное сварное соединение, представленное на рисунке. Именно толщина такого соединения огневой стенки камеры жидкостного ракетного двигателя (ЖРД) определяет надежную и безаварийную его работу.

Однако использование именно отношений оптической плотности рентгенограмм (являющихся постоянной величиной для данных снимков вне зависимости от условий экспонирования), соответствующих экспонированию эталонного объекта, контрольной пластины и исследуемого материала, полученных с помощью фотометрирования, позволяет определить искомую толщину контролируемого материала изделия. Применение предлагаемого способа контроля позволяет определять толщину материала в изделиях сложных форм и конструкций, исключая возможность применения обычных средств контроля, причем чувствительность способа остается достаточно высокой.



Рис. 4. Сварное соединение огневой стенки камеры ЖРД

Значения параметров предлагаемого способа зависят от физических свойств и толщин контролируемых материалов. Они определены экспериментально с учетом

предварительных рекомендаций, изложенных в литературе.

В общем виде контроль толщины материала и (или) определение величины проплавления (утонения) сварного шва изделий осуществляется следующим образом. На рентгеновскую трубку устанавливается делительное устройство, обеспечивающее равномерное распределение потока излучения и одинаковые фокусные расстояния от торца трубки в двух направлениях, на одном из которых просвечивают контролируемый участок материала, на другом - контрольную пластину толщиной равной номинальному значению толщины исследуемого материала или участка сварного шва (если номинальное значение толщины материала или участка сварного шва не известно, то толщина контрольной пластины может быть выбрана равной одному из имеющихся значений толщины участка эталонного объекта) в течение одной экспозиции. После совместной фотообработки полученных рентгенограмм производится определение отношения оптической плотности места рентгенограммы, соответствующего исследуемому участку материала, и места рентгенограммы, соответствующего установке контрольной пластины. Затем по имеющимся отношениям плотности почернения пленки эталонного объекта и полученным значениям отношения плотности почернения исследуемого материала или участка сварного шва и контрольной пластины определяется значение толщины исследуемого материала или участка сварного шва.

Для иллюстрирования заявляемого способа приведем пример его конкретного осуществления.

При изготовлении камеры сгорания ракетного двигателя существует необходимость замера толщины кольцевого сварного шва коллекторного соединения, выполненного электронно-лучевой сваркой (см. рисунок). Из-за больших габаритов изделия и особенностей конструкции соединения для замера толщины сварного шва имеющиеся универсальные средства контроля применить невозможно. Изготовление специального мерительного инструмента представляет существенные технические трудности и значительные материальные затраты. Требование чертежа на данное изделие определяет толщину выполненного сварного шва $1,6 \pm 0,1$ мм, т.е. задача контроля

в данном случае сводится к определению фактической толщины сварного соединения.

Контроль толщины участка сварного шва производили следующим образом. Изготавливали эталонный объект из материала X18H10T (аналогичного исследуемому), представляющий собой пластину переменной толщины в виде ступенек с базовой толщиной 1,6 мм с интервалом по толщине 0,05 мм и предельным отклонением от номинальной толщины $\pm 0,2$ мм. Выполняли рентгенограмму данного эталона в течение одной экспозиции на следующих режимах: ускоряющее напряжение – 100 кВ, ток эмиссии – 10 мА, фокусное расстояние – 450 мм, время экспозиции – 3 минуты.

На полученной рентгенограмме с помощью фотометрирования определяли оптическую плотность соответствующих участков различной толщины.

По результатам фотометрирования определяли отношения плотностей почернения пленки, соответствующие заданным толщинам образца-имитатора. Полученные результаты составили следующие числовые значения (табл. 1).

Таблица 1

Отношения базовой и дискретных толщин образца-имитатора	Отношения оптической плотности р/пленки в местах базовой и дискретных толщин образца-имитатора
1,6 / 1,4	1,15
1,6 / 1,45	1,11
1,6 / 1,5	1,07
1,6 / 1,55	1,03
1,6 / 1,65	0,96
1,6 / 1,7	0,93
1,6 / 1,75	0,90
1,6 / 1,8	0,88

Непосредственно контроль коллекторного сварного соединения выполняли следующим образом. На рентгеновскую трубку устанавливали делительное устройство, обеспечивающее равномерное распределение потока излучения и одинаковые фокусные расстояния от торца трубки в двух направлениях, на одном из которых располагали контрольную пластину из стали X18H10T толщиной 1,6 мм, на другом торце трубки располагался контролируемый участок сварного шва. После одновременного экспонирования обеих пленок, выполненного на тех же режимах, что и экспонирование образца-имитатора, и последующей одновременной их фотообработки

производили фотометрирование пленок, располагавшихся, соответственно, за контрольной пластиной и за контролируемым участком сварного шва.

Полученные результаты составили следующие числовые значения (табл. 2).

Таблица 2

Отношение толщины контрольной пластины к искомой толщине сварного шва	Отношение оптической плотности ρ /пленки, соответствующей установке контрольной пластины и участка сварного шва
1,6 / X	0,96

Искомая толщина участка сварного шва X определялась из сравнения отношений плотностей почернения ρ /пленки, экспонированного образца-имитатора с соответствующим отношением плотности почернения ρ /пленки участка сварного шва и контрольной пластины.

В данном случае: X = 1,65 мм.

Последующее металлографическое исследование участка сварного шва позволило выполнить замер толщины материала с помощью лупы измерительной ЛИ-2-8* и штангенциркуля ШЦЦ-1-150-0,01 с цифровым индикатором и ценой деления 0,01 мм. Фактический размер составил 1,66 мм, что подтверждает эффективность контроля предложенным способом.

Выводы

1. Установлен характер изменения интенсивности ионизирующего излучения в зависимости от развития внутренних

несплошностей материала в направлении просвечивания.

2. Определены числовые значения плотностей почернения различных участков рентгеновской пленки, соответствующих изменениям номинальных размеров контролируемых металлических конструкций в направлении просвечивания.

3. Предложенный способ определения толщины материала с помощью рентгенографии позволяет достичь высокую точность контроля толщины металлического материала, а его применение в труднодоступных для обычных средств контроля местах позволит снизить затраты, связанные с изготовлением специальных дорогостоящих мерителей. Кроме того, для контроля предлагаемым способом не требуется высокая квалификация специалиста.

Литература

1. Алешин Н.П., Щербинский В.Г. Контроль качества сварочных работ. М.: Высш. шк., 1981. 144 с.
2. ГОСТ 7512-82 Контроль неразрушающий. Соединения сварные. Радиографический метод.
3. А.с. №577442 СССР, М. кл.² G01N 23/04. Способ определения размера дефекта в направлении просвечивания / Н.И. Загайнов, Д.Д. Михалицын. № 2373569/25; заявл. 21.06.76; опубл. 25.10.77, бюл. № 39.
4. Контроль качества сварки / под ред. В.Н. Волченко. М.: Машиностроение, 1975. С. 97.
5. А.с. №834472 СССР, М. кл.³ G01N 23/02. Способ измерения толщины слоя кратного ослабления рентгеновского излучения / Н.Г. Мишкинис. № 2819571/18-25; заявл. 07.09.79; опубл. 30.05.81, бюл. № 20.
6. А.с. №568877 СССР, М. кл.² G01N 23/00. Устройство для денситометрических и/или геометрических исследований / Б.Н. Епифанцев. № 2126348/25; заявл. 10.04.75; опубл. 15.08.77, бюл. № 30.

Поступила 31.03.2022; принята к публикации 14.06.2022

Информация об авторах

Шурупов Владимир Викторович - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: shurupov.svarka@yandex.ru, тел. (473)278-38-84.

Бокарев Дмитрий Игоревич – канд. техн. наук, доцент кафедры технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: bokareff@bk.ru, тел. (473)278-38-84.

Чумарный Владимир Петрович - канд. техн. наук, доцент кафедры технологии сварочного производства и диагностики, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: vchumarny@gmail.com, тел. (473)278-38-84.

Сафонов Сергей Владимирович - д-р техн. наук, профессор кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kafedra-ao@mail.ru, тел. (473)246-19-77.

Давыдов Максим Николаевич - аспирант кафедры автоматизированного оборудования машиностроительного производства, Воронежский государственный технический университет (394006 г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, 84), e-mail: kafedra-ao@mail.ru, тел. (473)246-19-77.

METHOD FOR DETERMINING THE THICKNESS OF NARROW COLLECTOR WELDED JOINTS USING IONIZING RADIATION

V.V. Shurupov, D.I. Bokarev, V.P. Chumarny, S.V. Safonov, M.N. Davydov

Voronezh State Technical University, Voronezh, Russia

Abstract: here we propose a method that allows you to determine the thickness of the material in products of complex structural shape, excluding the possibility of using conventional controls, providing high sensitivity and accuracy of measurements and not requiring high qualification of a specialist. The method relates to non-destructive testing methods and can be used to control the thickness of metal materials, as well as to determine the amount of penetration and (or) thinning of welds made mainly in places that are difficult to reach for mechanical controls of products that have, for example, narrow collector welded joint. When ionizing radiation passes through a solid, part of the radiation energy is lost. The amount of radiation energy transmitted through the material varies in proportion to its thickness. Thus, the study of the dependence of the change in the intensity of X-ray radiation on the presence and size of the discontinuity was a very urgent task, the solution of which allowed us to simultaneously control the quality of the welded joint for internal defects and measure the thickness of the joint. As the conducted studies showed, a necessary and sufficient condition for estimating the size of the desired value (the thickness of the joint) is to determine the ratio of radiation intensities before and after the object of control

Keywords: thickness, welded joint, ionizing radiation, intensity, photometry, film blackening density, radiography, collector

References

1. Aleshin N.P., Shcherbinskiy V.G. "Quality control of welding works" ("Kontrol' kachestva svarochnykh rabot"), Moscow: Vysshaya shkola, 1981, 144 p.
2. GOST 7512-82 "Non-destructive testing. The joints are welded. Radiographic method"
3. Zagaynov N.I., Mikhalitsyn D.D. "A method for determining the size of a defect in the direction of transillumination" ("Sposob opredeleniya razmera defekta v napravlenii prosvechivaniya"), author's certificate of the USSR No. 577442, M. kl. 2 G01N 23/04, no. 2373569/25, dec. 06/21/76, publ. 10/25/77, bul. 39, 1976.
4. Volchenko V.N. ed. "Welding quality control" ("Kontrol' kachestva svarki"), Moscow: Mashinostroenie, 1975, 97 p.
5. Mishkinis N.G. "A method for measuring the thickness of a layer of multiple attenuation of X-ray radiation" ("Sposob izmereniya tolshchiny sloya kratnogo oslableniya rentgenovskogo izlucheniya"), author's certificate no. 834472 USSR, M. kl. 3 G01N 23/02, no. 2819571/18-25, dec. 09/07/79, publ. 05/30/81, bul. 20.
6. Epifantsev B.N. "Device for densitometric and/or geometric studies" ("Ustroystvo dlya densitometricheskikh i/ili geometricheskikh issledovaniy"), author's certificate no. 568877 USSR, M. kl. 2 G01N 23/00, no. 2126348/25, dec. 04/10/75, publ. 08/15/77, bul. 30

Submitted 31.03.2022; revised 14.06.2022

Information about the authors

Vladimir V. Shurupov, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: shurupov.svarka@yandex.ru, tel.: +7(473)278-38-84.

Dmitriy I. Bokarev, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: bokareff@bk.ru, tel.: +7(473) 278-38-84.

Vladimir P. Chumarnyy, Cand. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: vchumarny@gmail.com, tel.: +7(473)278-38-84.

Sergey V. Safonov, Dr. Sc. (Technical), Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kafedra-ao@mail.ru, tel.: +7(473)246-19-77.

Maksim N. Davydov, graduate student, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kafedra-ao@mail.ru, tel.: +7(473)246-19-77.