

ISSN 2663-4228 (Print)
ISSN 2663-4236 (Online)

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан
в 1997 году*

Серия Г
Технические
науки

1/2021

Редакционная коллегия журнала

«Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки»

Главный редактор – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов**.

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, ст. науч. сотр. **А.П. Симоненко**.

Ответственный секретарь – канд. техн. наук **И.А. Третьяков**.

Члены редколлегии: канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. **П.В. Асланов**; д-р техн. наук, доц. **Н.И. Болонов**; д-р техн. наук, проф. **С.А. Горожанкин**; канд. техн. наук, доц. **В.Д. Коренев**; канд. техн. наук, ст. науч. сотр. **А.А. Курушин** (Национальный исследовательский университет «МЭИ», Российская Федерация); канд. техн. наук, доц. **И.А. Молоковский**; канд. техн. наук, доц. **В.В. Паслён**; канд. физ.-мат. наук, доц. **В.И. Тимченко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Завадская**; д-р техн. наук, доц. **С.А. Зори**; д-р техн. наук, проф. **М.Н. Чепцов**; канд. техн. наук **Т.В. Шарий**; д-р техн. наук, проф. **А.Б. Бирюков**; канд. техн. наук, доц. **С.В. Гридин**; д-р техн. наук, проф. **С.М. Сафьянц**; д-р физ.-мат. наук, д-р техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; канд. техн. наук, доц. **Т.С. Башевая**; д-р техн. наук, проф. **С.В. Борщевский**; д-р техн. наук, проф. **С.П. Высоцкий**; д-р техн. наук, проф. **Е.В. Горохов**; председатель Госкомэкополитики при Главе ДНР **Р.В. Кишкань**; д-р техн. наук, проф. **Н.Г. Насонкина**; д-р хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**; д-р архитектуры, доц. **Н.В. Шолух**.

The Editorial Board of the journal

«Bulletin of Donetsk National University. Series G: Technical Sciences»

The Editor-in-Chief – Dr. of tech., prof. **V.V. Danilov**.

The Deputy of the Editor-in-Chief – Dr. of tech., senior researcher **A.P. Simonenko**.

Assistant Editor – Cand. of tech. **I.A. Tretiakov**.

The Members of the Editorial Board: Cand. of phys. and math., senior researcher **P.V. Aslanov**; Dr. of tech., docent **N.I. Bolonov**; Dr. of tech., prof. **S.A. Gorozhankin**; Cand. of tech., docent **V.D. Korenev**; Cand. of tech., senior researcher **A.A. Kurushin** (National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Russian Federation); Cand. of tech., docent **I.A. Molokovskii**; Cand. of tech., docent **V.V. Paslyon**; Cand. of phys. and math., docent **V.I. Timchenko**; Cand. of tech., docent **T.V. Ermolenko**; Cand. of tech., docent **T.V. Zavadskaia**; Dr. of tech., docent **S.A. Zori**; Dr. of tech., prof. **M.N. Cheptsov**; Cand. of tech. **T.V. Sharii**; Dr. of tech., prof. **A.B. Biriukov**; Cand. of tech., docent **S.V. Gridin**; Dr. of tech., prof. **S.M. Safyants**; Dr. of phys. and math., Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Cand. of tech., docent **T.S. Bashevaia**; Dr. of tech., prof. **S.V. Borshchevskii**; Dr. of tech., prof. **S.P. Vysotskii**; Dr. of tech., prof. **E.V. Gorokhov**; Chairman of the State Committee on Ecological Policy at the Head of the DPR **R.V. Kishkan**; Dr. of tech., prof. **N.G. Nasonkina**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk**; Dr. of arch., docent **N.V. Sholukh**.

Адрес редакции: ГОУ ВПО «ДОННУ», 283001, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24

Тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Журнал 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 (**Перечень ВАК**) (Приказы МОН ДНР №440 от 06.03.2020 г., №42 от 26.01.2021 г.) по следующим группам научных специальностей (специальностям): **05.11.00** – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; **05.12.00** – Радиотехника и связь; **05.13.00** – Информатика, вычислительная техника и управление; **05.14.04** – Промышленная теплоэнергетика; **05.23.19** – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства.

Журнал включен в национальную информационно-аналитическую систему **РИНЦ** (Лицензионный договор № 378-06/2016 от 24.06.2016 г. в ред. от 27.03.2019 г.): <http://elibrary.ru/titles.asp?sortorder=0&titleName=2663-4228>

Печатается по решению Ученого совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»:

Протокол №2 от 26.03.2021 г.

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия Г: Технические науки № 1

Донецк, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

Вступительное слово	5
---------------------	---

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

Болонов Н.И., Романчук С.М., Силенко Е.М., Силенко С.Е., Казакова В.Е. Методы и средства поверки измерителей скорости потоков жидкости и газа	6
---	---

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

Третьяков И.А. Метод расширенного лингвистического описания спектрограмм радиочастот FM-диапазона	14
---	----

Банков С.Е., Давыдов А.Г., Калиничев В.И., Вьюгин П.А., Курушин А.А. Активная антenna-фильтр	20
--	----

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

Биленко А.Ю., Нестругина Е.С. Распознавание лиц на изображениях с использованием нейронных сетей	33
--	----

Мухамадиева К.Б. Обнаружение и распознавание неординарного текста из видеокадров	45
--	----

Улитин Г.М. Математическая модель динамической устойчивости бурильной колонны	58
---	----

Бабичева М.В., Данилов В.В., Борищевский С.В. Вероятностный подход к оптимизации нейронных сетей случайной редукцией нейронов	63
---	----

Щербов И.Л. Информационные технологии математического моделирования обработки данных траекторного контроля	71
--	----

Бизянов Е.Е., Гутник А.А., Погорелов Р.Н. Нечеткая искусственная нейронная сеть без правил для задач прогнозирования и управления	78
---	----

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

Володин Н.А. Минимизация термонапряженй и дисперсности в непрерывном слитке при ограничении на температуру	86
--	----

Беззуб А.А. Исследование воздействия конвективного движения расплава на футеровочный слой стенки ковша-печи	91
---	----

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

Рипная М.М., Башевая Т.С., Сердюк А.И. Закономерности влияния концентрации ПАВ и температуры на атмосферный воздух в борфтористоводородном электролите при 100 утилизации свинцовых аккумуляторов

Поздравление с успешной защитой диссертации	106
Правила для авторов	108

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Series G: Technical sciences

№ 1

Donetsk, 2021

CONTENTS

Opening remark	5
INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS	
<i>Bolonov N.I., Romanchuk S.M., Silenko E.M., Silenko S.E., Kazakova V.E.</i> Methods and means of verification of meters speed of liquid and gas streams	6
RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION	
<i>Tretiakov I.A.</i> Method of extended linguistic description of FM radio frequency spectrograms	14
<i>Bankov S.E., Davydov A.G., Kalinichev V.I., Viugin P.A., Kurushin A.A.</i> Active antenna-filter	20
COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT	
<i>Bilenko A.Iu., Nestrugina E.S.</i> Facial recognition on images using neural networks	33
<i>Mukhamadieva K.B.</i> Detecting and recognizing unusual text from video frames	45
<i>Ulitin G.M.</i> Mathematical model of the dynamic stability of the drill string	58
<i>Babicheva M.V., Danilov V.V., Borshchevskii S.V.</i> The probable approach to optimization of neural networks by neurons random dropout	63
<i>Shcherbov I.L.</i> Information technologies for mathematical modeling of trajectory control data processing	71
<i>Bizianov E.E., Gutnik A.A., Pogorelov R.N.</i> A fuzzy artificial neural network without rules for forecasting and control tasks	78
INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING	
<i>Volodin N.A.</i> Minimization of thermal stresses and dispersion in continuous ingot with temperature limited	86
<i>Bezzub A.A.</i> Research of the impact of convective motion of the melt on the lining layer of the ladle-furnace	91

ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES

Ripnaia M.M., Bashevaia T.S., Serdiuk A.I. Regularities of influence of SAS concentration and temperature on atmospheric air in hydroborfluoride electrolyte during disposal of lead accumulators 100

Congratulations on the successful defense of the dissertation 106

Instructions for authors 108

Уважаемые коллеги!

С гордостью сообщаем Вам, что Приказом Министерства образования и науки Донецкой Народной Республики №42 от 26 января 2021 года дополнен перечень специальностей научного журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки», по которым журнал 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».

Таким образом, журнал успешно прошел стадию становления и все рубрики журнала, соответствующие группам научных специальностей (специальностям), включены в Перечень ВАК. Это позволяет авторам статей нашего журнала указывать их в списке работ, в которых отражены основные научные результаты диссертаций. Следовательно, научные статьи наших авторов могут быть учтены в действующих на данный момент диссертационных советах:

- Д 01.016.03 на базе ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»;
- Д 01.023.03 на базе ГОУ ВПО «Донбасская академия строительства и архитектуры»;
- Д 01.024.04 на базе ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет» и ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет».

Также обращаем Ваше внимание, что на сегодняшний день журнал «Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки» является первым и единственным научным журналом в Донецкой Народной Республике, включенным в Перечень ВАК по специальности «05.14.04 – Промышленная теплоэнергетика».

Надеемся на привлечение новых авторов, а также на плодотворное сотрудничество с нашими постоянными авторами.

Главный редактор



В.В. Данилов

Ответственный секретарь



И.А. Третьяков

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ
И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ
ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

УДК 532.5.011

МЕТОДЫ И СРЕДСТВА ПОВЕРКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ СКОРОСТИ
ПОТОКОВ ЖИДКОСТИ И ГАЗА

© 2021 Болонов Н.И., Романчук С.М., Силенко Е.М., Силенко С.Е., Казакова В.Е.

В статье приводится описание аттестованных измерителей динамических характеристик потоков жидкости и газа и средств их поверки, созданных большей частью в СКТБ «Турбулентность» ДонНУ на основе результатов многолетних исследований и разработок.

Ключевые слова: измерительные преобразователи, скорость потока жидкости и газа, средства поверки, аттестация, гидродинамический стенд.

Введение. На протяжении ряда лет первостепенными направлениями исследований и разработок в СКТБ «Турбулентность» ДонНУ являются измерители скорости потоков жидкости и газов. Необходимым этапом процесса разработки является использование, а, в случае отсутствия, создание поверочных специальных стендов.

Для измерения динамических характеристик воздушных потоков в СКТБ «Турбулентность» были разработаны и в дальнейшем производились мелкосерийно термоанемометрические автономные измерители скорости и температуры, расхода и тяги. В СКТБ «Турбулентность» также разрабатывались различные модификации зондовых электромагнитных измерителей скорости жидкостных потоков, что и определило направленность разработок и изготовления средств поверки измерителей скорости жидкости и газа.

В 2015 году был заключен Договор (№67/12.1-36 от 11.09.2015 г.) о научно-техническом сотрудничестве ГП «Донецкстандартметрология» и ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет».

Предметом этого Договора являлось научно-техническое сотрудничество сторон, совместное использование на безплатной основе исходных эталонов и оборудования в качестве рабочих мест поверителей. Примером такого совместного использования являются рабочие эталоны ДонНУ, приведенные в Приложении к Договору, таблица 1, и аэродинамическая труба АТ ГДС-200/25 разработки Всесоюзного научно-исследовательского института метрологии (ВНИИМ) им. Д.И. Менделеева (г. Санкт-Петербург, Россия) с реализуемым диапазоном скорости потока 0,5...40,0 м/сек, с ошибкой $\delta = \pm(0,1 + 0,02 \cdot V)$ м/сек, необходимость и актуальность аттестации которой отвечает интересам как ГП «Донецкстандартметрология», так и ДонНУ.

В настоящей статье приводится описания экспериментальных метрологически аттестованных приборов и стендов, в том числе и указанных в таблице 1, разработанных и изготовленных большей частью в СКТБ «Турбулентность» ДонНУ. Аттестованные стены предназначены как для исследования новых типов измерительных преобразователей, первичной и периодической метрологической

проверки измерителей, так и для использования приборов и стендов в качестве лабораторных установок при проведении физических практикумов на кафедре физики неравновесных процессов, метрологии и экологии (ФНПМиЭ) им. И.Л. Повха в соответствие с программами по курсам «метрология и стандартизация, техносферная безопасность и техническая физика».

Приведенные в статье описания приборов и стендов являются развитием и продолжением темы, затронутой в статье [1], и частью, создаваемого на кафедре ФНПМиЭ совместно с СКТБ «Турбулентность», учебно-исследовательского лабораторного комплекса для изучения динамики жидкости и газа.

Таблица 1. Исходные эталоны ГОУ ВПО «ДонНУ»

№ п/п	Наименование	Величина, единица измерения	Метрологические характеристики: (диапазон, погрешность или неопределенность)
1	Специальная градуировочно-испытательная установка СГИУ-1	Скорость водного потока	От 0,015 м/с до 2,20 м/с, $\delta = \pm 0,3\%$
2	Специальная градуировочная установка СГУ-1	Расход воздушного потока и тяги	От 12 м ³ /ч до 120 м ³ /ч, $\delta = \pm (3-6)\%$; От 2 Па до 9 Па, $\Delta_{\text{доп}} = \pm 0,3$ Па

Основная часть. Известный ГОСТ 8.571-2000 «Измерители скорости жидкостных потоков. Методы и средства поверки» определяет: «При проведении поверки (первичной и периодической) измерителей должны быть применены следующие средства измерительной техники и устройства:

–прямолинейный измерительный бассейн типа специальной градуировочно-испытательной установки СГИУ-1, диапазон воспроизводимых скоростей от 0,02 до 5,0 м/с, класс точности 0,5 при проведении поверки посредством перемещения измерителей с заданной скоростью относительно неподвижной водной среды;

–гидродинамическая установка (ГДУ) типа ГДС-60/25, диапазон воспроизводимых скоростей от 0,2 до 25 м/с, класс точности 0,5 при проведении поверки в набегающем на неподвижный измеритель водном потоке с нормированными характеристиками».

Такие средства поверки и установки были созданы в СКТБ «Турбулентность» еще задолго до принятия и введения в действие вышеуказанного ГОСТа. Разработке и введению в действие этого ГОСТа предшествовало непосредственное участие его авторов в комиссии по аттестации средств поверки измерителей скорости жидкостных потоков созданных в СКТБ «Турбулентность» ДонНУ. ГОСТ 8.571-2000 разработан Харьковским государственным научно-исследовательским институтом метрологии Госстандарта Украины и принят Межгосударственным советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 22.06.2000 г., №17). Разработчики: В.Б. Большаков, доктор техн. наук; Н.И. Косач, доктор техн. наук.

Для аттестации и поверки измерителей динамических характеристик воздушных потоков используется аэродинамическая труба образцовая ГП «Донецкстандартметрология» и специальная градуировочная установка (СГУ), разработанная и созданная в СКТБ «Турбулентность», впоследствие аттестованная ГП «Донецкстандартметрология» в качестве рабочего эталона для передачи размера единицы расхода воздуха и разрежения рабочему средству измерения.

Автономные измерители скорости и температуры (АИСТ), рис.1, предназначены для измерения средних значений скорости неизотермических воздушных потоков при контроле технологических процессов, обследовании систем

вентиляции, аспирации и кондиционирования, измерении параметров микроклимата в производственных и жилых помещениях, для проведения аэрофизических исследований [2]. Аттестуемый диапазон измерений скоростей потоков (0,1...20 м/сек) удовлетворяет требованиям СНиП 41-01-2003 «Отопление, вентиляция и кондиционирование», ДСН 3.3.6.42-99 «Санитарные нормы микроклимата производственных помещений».



Рис.1. Автономный измеритель скорости и температуры

Настройка и контроль параметров измерителей АИСТ осуществляется на принадлежащих СКТБ «Турбулентность» аэродинамических трубах фирмы DISA-DANTEC и АТ ГДС-200/25. В настоящее время эти оба стенда переданы на баланс кафедры ФНПМиЭ и используются в учебном процессе.

Аттестация измерителей производится на образцовом аэродинамическом стенде ГП «Донецкстандартметрология». Данные измерители используются в ГП «Донецкстандартметрология» в качестве эталонного средства измерения скорости. Стабильность метрологических характеристик измерителей АИСТ периодически подтверждается их аттестацией во ВНИИМ им. Д.И.Менделеева.

В ДНР эти приборы используются на таких градообразующих предприятиях, как концерн «Стирол» г. Горловка, Харцызский трубный и канатный заводы, Зуевская, Старобешевская ТЭС и др.

Несколько таких приборов были переданы СКТБ «Турбулентность» на кафедру ФНПМиЭ им. И.Л. Повха, где используются в качестве рабочего эталона скорости в процессе проведения исследований и при контроле параметров аэродинамических стендов и установок учебно-исследовательского комплекса, созданного на кафедре.

Измерители расхода и тяги (ИРиТ), рис.2, разработаны в соответствие с «Региональной программой по охране жизни и здоровья людей на производстве и в быту» по заказу Донецкой госинспекции охраны труда в газовом и жилищно-коммунальном хозяйстве.

Приборы предназначены для измерения расхода воздуха в вентиляционных каналах и разрежения в дымовых каналах газифицированных жилых и производственных помещений на соответствие государственным нормативным актам, строительным нормам и правилам [3].

Концепция разработки основывалась на связи расхода воздуха в вентиляционных каналах и разрежения в дымовых каналах с локальной скоростью потока в заданной точке сечения. В этой концепции заложена научная новизна предлагаемого метода, а именно – оба вида измерения (расход и разрежение) и определение направление потока осуществляются с использованием одного первичного измерительного преобразователя скорости потока [3].



Рис.2. Измеритель расхода и тяги

Необходимо отметить, что измерение разрежения в существующих системах дымоудаления жилых помещений, вследствие его малого значения (2 Па), другими методами довольно затруднительно и требует применения высокоточных микроманометров, которые используются, в основном, только в лабораторных условиях.

Метрологическое обеспечение прибора по расходу и разрежению, которое включает в себя как первичную аттестацию, так и периодическую поверку в процессе его эксплуатации, осуществлялось на разработанной в СКТБ «Турбулентность» **специальной градуировочной установке (СГУ)**, схема которой представлена на рис.3. Такая схема установки позволяет при использовании достаточно простого оборудования обеспечить градуировку прибора в единицах контролируемых параметров. Метрологические характеристики прибора определяются для шести величин расхода 15, 30, 45, 60, 75, 90 м³/час и разрежения 2 Па.

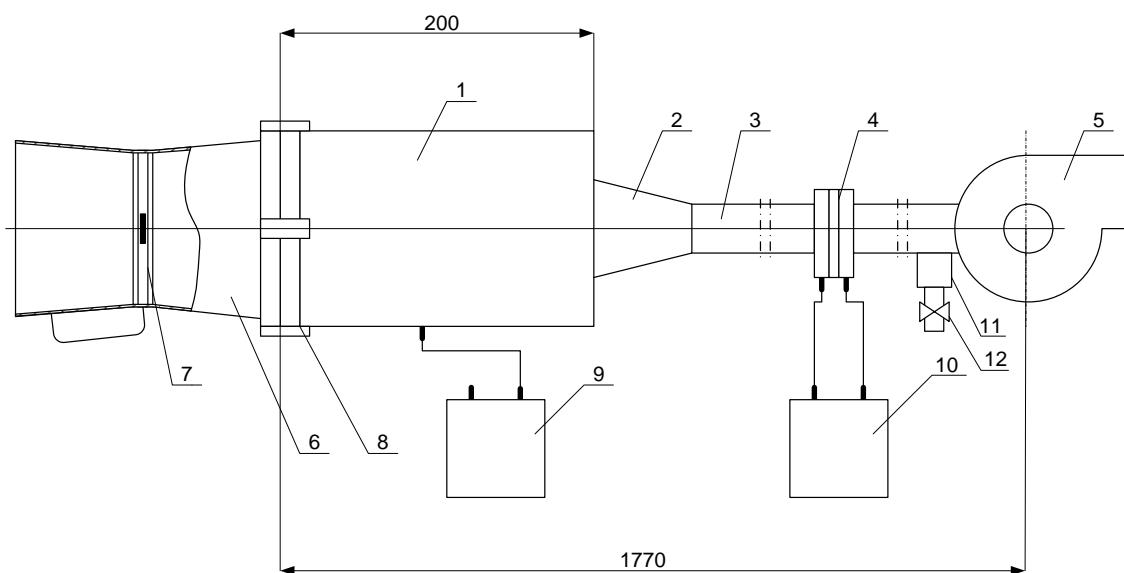


Рис. 3. Схема специальной градуировочной установки СГУ-1:
 1—измерительная камера; 2—конфузор; 3—труба; 4—расходомерная диафрагма; 5—вентилятор;
 6—прибор ИРiT; 7—датчик прибора; 8—прижимной замок; 9—микроманометр ММ 02/10-2;
 10—микроманометр МКВ-250; 11—байпас; 12—вентиль

Измерение статического давления в измерительной камере осуществляется микроманометром ММ 0,2/10-2, один штуцер которого подключен к измерительной камере, а второй контактирует с атмосферой. Таким образом, микроманометр измеряет разрежение, создаваемое вентилятором в измерительной камере.

Для измерения расхода используется стандартная диафрагма, изготовленная согласно правилам РД 50-213-80 по ГОСТ 26969-86. Перепад давления на диафрагме измеряется с помощью микроманометра типа МКВ-250.

Регулирование расхода воздуха через установку происходит путем управления оборотами двигателя вентилятора за счет изменения питающего напряжения.

Данная установка была передана СКТБ «Турбулентность» на кафедру ФНПМиЭ и используется совместно с ГП «Донецкстандартметрология» для периодической поверки существующих приборов ИРiT, которыми оснащены практически все газовые хозяйства Украины, жилищно-коммунальные предприятия и обслуживающие управляющие компании всех районов г. Донецка и других городов. Установка

используется также при проведении физического практикума на кафедре ФНПМиЭ по методике выполнения измерений расхода (ГОСТ 8.563.2-97) с помощью сужающих устройств, в основу которойложен принцип работы и расчет диафрагм для измерения расхода воздуха.

Для настройки и контроля параметров электромагнитных измерителей **скорости потока жидкости** [4] используется гидродинамический стенд ГДС-60/20, представляющий собой замкнутый гидродинамический контур, основной частью которого является затопленная струя диаметром 60 мм, истекающая в рабочий участок – затопленный объем без свободной поверхности. Скорость потока в стенде может регулироваться в пределах 0,5...20 м/сек. В зависимости от расстояния до среза сопла степень турбулентности для этих скоростей изменяется от 0,4 до 2%.

Рабочий участок, рис.4, состоит из конфузора 5 с радиусом выходного сечения R_0 , профиль которого построен по формуле Витошинского [5], корпуса 4, вдоль которого перемещается каретка 3. Каретка снабжена координатником, обеспечивающим перемещение исследуемого преобразователя в осевом и радиальном направлениях. Точность определения перемещения в осевом направлении $\pm 0,1$ мм, в радиальном $\pm 0,01$ мм. Стенки рабочего участка снабжены смотровыми окнами, что позволяет дополнительно проводить и оптические измерения. Для регулирования интенсивности турбулентных пульсаций перед рабочим участком установлен спрямляющий аппарат 6, внутри которого расположены съемные сотовый выпрямитель 1 и сетки 2. Принято считать, что рабочий участок с конфузором, профиль которого построен по формуле Витошинского, обеспечивает воспроизведение потока с равномерным полем скоростей в рабочей зоне.

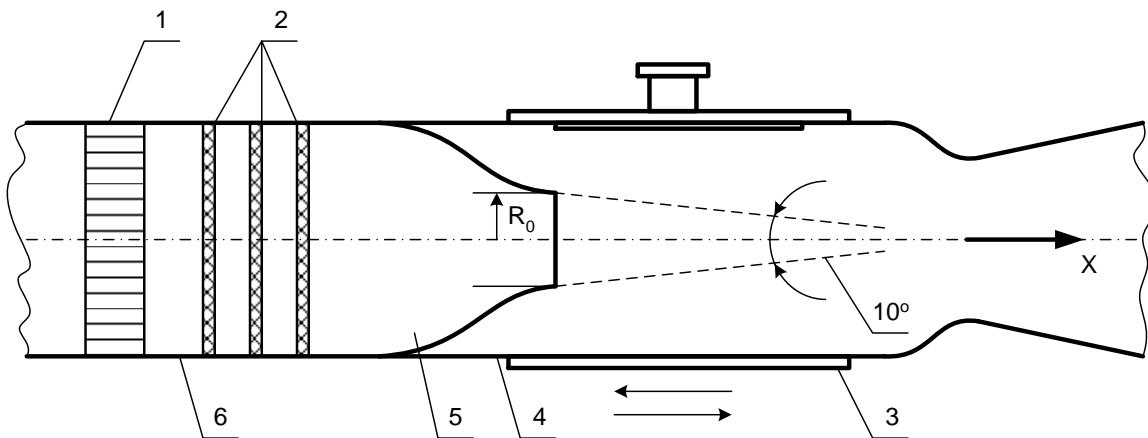


Рис. 4. Рабочий участок ГДС

Предварительными экспериментами было определено оптимальное место установки в гидростенде ГДС-60/20 градуируемых преобразователей. Их необходимо устанавливать только на оси струи в зоне «равных» скоростей. Исследование поля скоростей в рабочем участке позволило установить угол сужения зоны «равных скоростей» равный 10° [6], рис.4.

К основным метрологическим характеристикам гидродинамических стендов типа ГДС 20/0,06 относятся однородность поля скоростей, погрешность измерения скорости потока, воспроизводимость интенсивности и спектров турбулентных пульсаций скорости потока в рабочем участке ГДС. Настоящий гидродинамический стенд (разработка ВНИИМ им. Д.И. Менделеева) изначально был аттестован по осредненным и пульсационным скоростям.

В работе [6] было проведено экспериментальное исследование зависимости средней скорости на срезе конфузора от размеров преобразователя ($R = 10, 15$ и 20 мм) установленного в рабочем участке. Там же показано, что допустимый коэффициент загрузки рабочего участка гидродинамического стенда ГДС-60/20 в 4-5 раз больше коэффициентов загрузки рабочих участков других типов. Это обеспечивает возможность градуировки измерителей скорости потока указанных размеров без увеличения размеров как рабочего участка, так и размеров гидродинамического стенда.

В процессе реконструкции стенд был оборудован ультразвуковым расходомером жидкости «АКРОН-01», позволяющим измерять расход воды и проводить сравнительный анализ результатов с показаниями испытуемого электромагнитного измерителя.

Первичный преобразователь расходомера «АКРОН-01» устанавливается на горизонтальном участке трубопровода гидродинамического стендса. Расходомер обеспечивает измерение объемного расхода. При диаметре условного прохода трубопровода ГДС-60/20 $D_y = 200$ мм диапазон измеряемых расходов – $20\dots1000$ м³/час (0,18…10 м/сек).

Специальная градуировочно-испытательная установка (СГИУ) предназначена для воспроизведения и передачи размера единицы скорости жидкостных потоков.

На СГИУ осуществляется градуировка, метрологическая аттестация и поверка измерительных преобразователей средней скорости (ИПСС), а также проведение испытаний и исследований различных модификаций первичных измерительных преобразователей средней скорости потока.

Принцип действия СГИУ основан на методе перемещения с известной скоростью аттестуемого ИПСС относительно неподвижной среды.

Перемещение ИПСС осуществляется посредством буксируемой тележки с координатно-поворотным устройством для установки аттестуемого ИПСС. Неподвижная вода находится в соответствующем измерительном бассейне – металлическом лотке.



Рис. 5. Специальная градуировочно-испытательная установка

СГИУ, рис.5, состоит из:

- измерительного бассейна;
- буксируемой тележки с координатно-поворотным устройством;
- механического привода буксируемой тележки;
- системы измерения скорости протяжки тележки.

Измерительный бассейн – металлический лоток прямоугольной формы с размерами $10,5 \times 0,8 \times 0,8$ м заполненный водой.

Буксируемая тележка с координатно-поворотным устройством предназначена для

буксировки (реверсивно) ИПСС в продольном направлении лотка, а также обеспечения поворота вокруг вертикальной оси и наклона в двух взаимно перпендикулярных плоскостях градуируемого или исследуемого ИПСС. Координатно-поворотное устройство позволяет устанавливать градуируемый или исследуемый ИПСС в любом положении относительно продольной оси лотка, вдоль которой производится буксировка тележки.

Механический привод буксируемой тележки предназначен для приведения в движение с заданной скоростью буксируемой тележки вдоль металлического лотка (реверсивно). Скорость буксируемой тележки устанавливается в пределах от 0,015 м/с до 2,2 м/с и может регулироваться в этом диапазоне.

Система измерения скорости протяжки тележки предназначена для контроля и регистрации скорости протяжки тележки с установленным на ней в координатно-поворотном устройстве ИПСС, в процессе его градуировки, аттестации, поверки, исследования или испытания.

Система измерения скорости состоит из оптической линейки, блока формирования импульсов опто-электронного нониуса, стандартного электронно-счетного частотомера и подключенного персонального компьютера.

Специальная градуировочно-испытательная установка размещена в лабораторном помещении по улице 2-я Александровка, 36.

Подробно СГИУ описана в отчете по научно-исследовательской работе [7].

Имеющиеся градуировочные установки уникальны сами по себе и, в таком случае, их техническое обслуживание, периодичность аттестации, дооснащение современными средствами измерительной техники должно быть обязательным и регулярным, что, по большому счету, отвечает интересам не только ДонНУ, но и ГП «Донецкстандарт-метрология».

Заключение. Описанные в статье аттестованные приборы и средства поверки составляют часть лабораторного научно-исследовательского комплекса созданного на базе кафедры ФНПМиЭ им. И.Л. Повх и СКТБ «Турбулентность» ДонНУ. Данное оборудование используется как в учебном процессе, так и в проектах прикладных исследований. На этих стендах (рабочих эталонах) осуществляется первичная и периодическая поверка измерителей скорости потока жидкости и газа.

Сотрудничество ДонНУ с ГП «Донецкстандартметрология» в рамках совместного Договора позволяет предоставлять практическую помощь ДонНУ во время поверки (калибровки) средств измерительной техники, аттестации научно-исследовательских стендов и лабораторий, руководить их работой в интересах обеих сторон. В этой связи, актуальной является пролонгация вышеуказанного Договора о научно-техническом сотрудничестве ГП «Донецкстандартметрология» и ДонНУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пометун Е. Д. Экспериментальные стенды для исследования динамических характеристик измерительных преобразователей температуры / Е. Д. Пометун, Н. И. Болонов, В. Н. Лебедев // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2017. – № 1. – С. 4–12.
2. Особенности метрологической аттестации и методики выполнения измерений расхода воздуха в системах вентиляции с использованием прибора «АИСТ-5» и измерительной воронки / А. С. Бодня, Н. А. Пригода, В. Г. Чеплюков, Е. М. Силенко // Материалы научной конференции профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и аспирантов Донецкого национального университета по итогам научно-исследовательской работы за период 2009-2010 гг. / под ред. П. В. Егорова, С. В. Беспаловой. – Донецк : Цифровая типография, 2011. – С. 147.
3. Инструментальный метод обследования вентиляционных и дымовых каналов в газифицированных помещениях жилых и общественных зданий / Е. М. Силенко, С. Е. Силенко, А. С. Бодня, В. Е. Силенко // Journal of Instrument Engineering. – 2018. – Vol. 61, № 1. – P. 66–71.
4. Электромагнитные измерительные преобразователи скорости потоков жидкости – итоги исследований и разработок / С. М. Романчук, Е. М. Силенко, С. Е. Силенко, В. Е. Казакова // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 9–20.

5. Кузьмин В. А. Влияние удлинения конфузора на гидродинамическое поле скоростей в образцовых установках / В. А. Кузьмин // Исследования в области гидрофизических измерений : сборник научных трудов НПО «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева». – Ленинград : Энергоиздат, 1982 – С. 29–31.
6. Кузьмин В. А. Определение допустимой неоднородности поля скоростей в рабочих участках поверочных гидродинамических стендов / В. А. Кузьмин // Измерительная техника. – 1975. – № 2. – С. 60–62.
7. Разработка информационно-аналитической системы управления жизнеобеспечением городов и состоянием окружающей среды: отчет о НИР №17-1вв/1 (промежуточный) / Донецк. нац. ун-т ; рук. : В. В. Данилов ; исполн. : С. М. Романчук [и др.]. – Донецк, 2017. – 169 с. – № ГР 0117D000066.

Поступила в редакцию 12.02.2021 г.

METHODS AND MEANS OF VERIFICATION OF METERS SPEED OF LIQUID AND GAS STREAMS

Bolonov N.I., Romanchuk S.M., Silenko E.M., Silenko S.E., Kazakova V.E.

The article provides a description of the certified meters of dynamic characteristics of liquid and gas streams and means of their verification, created mostly in SDTB "Turbulence" DonNU on the basis of the results of many years of research and development.

Keywords: measuring transducers, liquid and gas streams speed, means of verification, certification, hydrodynamic stand.

Болонов Николай Иванович

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры физики неравновесных процессов метрологии и экологии им. И.Л. Повх ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

E-Mail: n.bolonov@donnu.ru

Bolonov Nikolai Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor of the Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povkh of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Романчук Сергей Михайлович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

E-Mail: s.romanchuk@donnu.ru

Romanchuk Sergei Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Силенко Евгений Михайлович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

E-Mail: e.silenco@donnu.ru

Silenco Evgenii Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Силенко Сергей Евгеньевич

ведущий инженер ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

E-Mail: s.silenco@donnu.ru

Silenco Sergei Evgenievich

Lead Engineer of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Казакова Виктория Евгеньевна

кандидат физико-математических наук, старший преподаватель ГОУ ВО МО «Государственный гуманитарно-технологический университет», Российская Федерация, Московская обл., г. Орехово-Зуево.

Kazakova Victoria Evgenevna

Candidate of Physico-Mathematical Sciences, Senior Lecturer of Moscow Regional Institution of Higher Education "University for Humanities and Technologies", Russian Federation, Moscow region, Orekhovo-Zuevo.

Р А Д И О Т Е Х Н И К А И С В Я З Ъ

УДК 621.377.037.3:004.67

МЕТОД РАСШИРЕННОГО ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СПЕКТРОГРАММ РАДИОЧАСТОТ FM-ДИАПАЗОНА

© 2021 Третьяков И.А.

В настоящей работе проведено расширение функциональности разработанной ранее автоматизированной системы научных исследований. Предлагается метод более расширенного лингвистического описания спектрограмм радиочастот, позволяющий составлять эти описания с учетом местоположения участков кривой на оси абсцисс. Полученные расширенные лингвистические описания кривых будут отражать не только классы выделенных на ней элементарных событий, но и их фазы. Расширенные описания достаточно точно описывают характер поведения исследуемых кривых.

Ключевые слова: спектрограммы радиочастот, лингвистический анализ, экспериментальные кривые, анализ данных, сегментация, классификация.

Введение. В современном мире стремительно развивается научное направление анализ данных [1-3], ориентированное на формирование и исследование специальных методов и вычислительных алгоритмов анализа, фильтрации, преобразования и классификации экспериментальных данных как средства обоснования принимаемых решений и выводов. Значительная часть этого направления уделяется анализу данных, представленных в виде экспериментальных кривых, которые являются одним из способов представления результатов в автоматизированных системах научных исследований. Однако, возрастающие объемы обрабатываемой информации и результаты научных исследований в виде массивов экспериментальных данных содержат все большее количество компонентов. Автоматизированная обработка и анализ таких массивов является актуальной научно-технической задачей.

Постановка задачи. Данная статья является продолжением исследований работ [4-5], а именно расширением функциональности разработанной автоматизированной системы научных исследований, реализованной на языке программирования Python на основе методов и алгоритмов [6-7]. В работах [4-5] проведены эксперименты, исходной информацией для которых послужили экспериментальные кривые спектрограмм радиочастот FM-диапазона, полученные на лабораторном макете. Общее количество зарегистрированных и проанализированных кривых – 60, по 15 кривых для разных состояний (без частотного подавления, с подавлением 1-го, 2-х и 3-х сигналов). В результате работы разработанной автоматизированной системы участки кривых в соответствии с полученными эталонами были классифицированы на 3 класса, каждому из которых присвоен символ из сформированного алфавита.

Полученные лингвистические описания экспериментальных кривых представляют короткие и надежные правила для анализа спектрограмм радиочастот, однако в таких описаниях не сохраняется информация о местоположении участков кривой на оси аргумента. Такая информация может оказаться необходимой для более глубокого анализа представленной кривой. Например, при анализе спектрограмм важно учитывать, на какую из частот приходится пик амплитуды. Кроме этого имеется

большой класс экспериментальных кривых, для анализа которых необходима информация о характере поведения как на отдельных информативных участках, так и информация о положении этих участков на оси аргумента. Далее для более расширенного лингвистического описания экспериментальных кривых предлагается составлять это описание с учетом местоположения участков кривой на оси абсцисс.

Метод расширенного лингвистического описания спектрограмм радиочастот. Для составления такого расширенного лингвистического описания, которое позволяет учитывать положение участков на исследуемой кривой, предлагается следующая процедура. Область определения кривой разбивается на $l=12$ зон, каждая длиной в 200 КГц. Алфавит языка описания кривых дополняется символом b – background. Таким образом алфавит состоит из четырех символов $A = \{L, C, R, b\}$, в котором участки характеризуются следующим образом: L – левый фронт, C – центральная часть, R – правый фронт, b – не информативные фоновые участки. Исходя из этого, каждому участку будет присвоен символ, либо характеризующий его поведение на кривой, либо характеризующий фоновое и не информативное возмущение. Полученное расширенное лингвистическое описание кривой будет отражать не только классы выделенных на ней элементарных событий, но и их фазы. Таким образом, цепочка символов $\langle L C C L C \rangle$ представляется в виде $\langle b L C b C b b L C b b \rangle$. При этом расширенные описания разных экспериментальных кривых с одинаковой длиной будут иметь одинаковое количество символов.

При нахождении конечного подмножества \hat{L} в множестве всех таких цепочек L – трансформационная грамматика сможет состоять из одной элементарной трансформации, а именно заменой одного символа другим. Минимальное количество элементарных трансформаций, переводящих цепочку символов T_1 в T_2 , будет являться мерой отличия этих цепочек друг от друга. Введем метрику на множестве всех цепочек длины l , приводящей к числу несовпадающих символов на одинаковых местоположениях:

$$r(T_1, T_2) = \sum_{i=1}^l |a_i^1, a_i^2|, |a_i^1, a_i^2| = \begin{cases} 0, & a_i^1 = a_i^2 \\ 1, & a_i^1 \neq a_i^2 \end{cases}. \quad (1)$$

Таким образом формируются символные цепочки фиксированной длины, которые можно сравнивать посимвольно, например, как сравнивают числовые векторы одинаковой размерности.

Для ядра языка, состоящего из одной символьной цепочки \hat{T} степень принадлежности произвольной символьной цепочки T к этому языку определяется монотонной убывающей функцией расстояния в метрическом пространстве L от этой цепочки T до эталонной цепочки \hat{T} . Пусть имеется выборка экспериментальных кривых одной группы, представленная расширенными описаниями $T_j = \langle a_1 \dots a_l \rangle$, $j = 1, \dots, n$, где n – количество кривых в данной выборке. Для того чтобы найти символьную цепочку $\hat{T} = \langle \hat{a}_1 \dots \hat{a}_l \rangle$, для которой выполняется условие:

$$\phi(T) = \sum_{j=1}^n r(T, T_j) = \min, \quad (2)$$

необходимо подставить критерий $\phi(T)$ в (1) и изменить порядок суммирования на:

$$\phi(T) = \sum_{i=1}^l \sum_{j=1}^n |\hat{a}_i, a_i^j|. \quad (3)$$

Минимум критерия обеспечивается в случае, когда \hat{a}_i будет являться символом из расширенного алфавита A , который чаще других оказывается на i -м месте в символьных цепочках T_j , $j=1,\dots,n$.

Применим вышеописанную процедуру к тем же экспериментальным кривым спектрограмм радиочастот FM-диапазона, которые исследовались в работах [4-5]. В таблице 1 представлены расширенные лингвистические описания этих спектрограмм.

Таблица 1. Расширенные лингвистические описания исследуемых кривых

Группы	Описания кривых	Эталоны групп и расстояние $r(\hat{T}, T_j)$			
		1	2	3	4
		bLCbCbbbLCbb	LLCRCbbbbCbb	CCCCCCRbbCbb	LCCCCCCCR
1 группа	bLCbCbbbLCbb	0	6	10	14
	bLCbCbbbLCbb	0	6	10	14
	bbCbCbbbLCbb	2	10	10	18
	bLCbCbbbLCbb	0	6	10	14
	bLCbCbbbLCbb	0	6	10	14
	LLCRCbbbLCbb	4	8	10	14
	bLCRCbbbLCbb	4	8	10	14
	bLCbCbbbLCbb	0	6	10	14
	bLCbCbbbLCbb	0	6	10	14
	bLCbCbbbCbb	2	6	10	14
	bLCbCbbbLCbb	0	6	10	14
	bLCbCbbbLCbb	0	6	10	14
	bLCbCbbbLCRb	2	6	10	12
2 группа	bLCbCbbbLCbb	0	6	10	14
	LLCRCbbbbCbb	6	0	10	14
	LLCRCbbbCbb	6	0	10	14
	LLCRCbbbCbb	6	0	10	14
	bLCRCbbbCbb	4	2	10	14
	bLCRCbbbCbb	4	2	10	14
	LLCRCbbbCbb	6	0	10	14
	LLCRCbbbLCbb	8	4	12	14
	LLCRCbbbLCbb	8	4	12	14
	bLCRCbbbLCbb	4	2	10	14
	LLCRCbbbCbb	6	0	10	14
	LLCRCbbbCbb	6	0	10	14
	LLCRCbbbCbb	6	0	10	14
	LLCRCbbbCRb	8	2	8	14
	LLCRCbbbCbb	6	0	10	14
	LLCRCbbbCbb	6	0	10	14

Группы	Описания кривых	Эталоны групп и расстояние $r(\hat{T}, T_j)$			
		1	2	3	4
		bLCbCbbbLCbb	LLCRCbbbbCbb	CCCCCCRbbCbb	LCCCCCCCCR
3 группа	CCCCCCRbbCbb	10	8	0	10
	CCCCCCRbbCbb	10	8	0	10
	CCCCCCRbbCbb	10	8	0	10
	CCCCCCRbbRbb	10	10	2	12
	bCCCCCCRbLCbb	10	12	2	12
	bCCCCCCRbbCbb	10	10	2	12
	CCCCCCRbbRbb	10	10	2	12
	CCCCCCRbbCbb	10	8	0	10
	CCCCCCRbbCbb	10	8	0	10
	bCCCCCCRbLCbb	10	12	2	12
	CCCCCCRbbCbb	10	8	0	10
	CCCCCCRbbCbb	10	8	0	10
	bCCCCCCRbbCRb	10	12	4	12
	CCCCCCRbbCbb	10	8	2	10
	CCCCCCRbbCbb	10	8	0	10
4 группа	LLCCCCCCCCR	18	14	12	2
	LLLCCCCCCCR	20	16	14	4
	bLLLLCCCCCCCR	14	14	10	0
	bLLLLCCCCCCCR	14	14	10	0
	bLLLLCCCCCCCR	14	14	10	0
	bLLLLCCCCCCRR	14	14	10	2
	bLLLLLLCCCR	18	14	12	4
	bLCCCCCCCR	14	14	10	2
	bLCCCCCCCR	14	14	10	0
	bLCCCCCCCR	14	14	10	0
	bLCCCCCCCR	14	14	10	0
	bLCCCCCCCR	14	14	10	0
	bLCCCCCCCR	14	14	10	0
	bLCCCCCCCRb	12	12	8	2
	bLCCCCCCCCR	14	14	10	0

Положение символов описаний кривых в таблице 1 соответствуют естественным положениям участков на этих кривых. Каждой группе соответствует усредненная расширенная цепочка символов (эталон группы) полученные по формулам (2) и (3), а справа для каждой кривой указаны расстояния $r(\hat{T}, T_j)$ от соответствующей ей расширенной цепочки до эталонов всех четырех групп, вычисленные по формуле (1), отражающие минимальное число элементарных трансформаций, переводящих эталон в эту цепочку.

Для удобства восприятия расширенных лингвистических описаний и наглядности, на рисунке 1 на кривых из разных групп (при 4 состояниях: без подавления (рис. 1 а), с подавлением 1-го (рис. 1 б), 2-х (рис. 1 в) и 3-х (рис. 1 г) сигналов соответственно) отмечены символы, присвоенные каждому анализируемому участку.

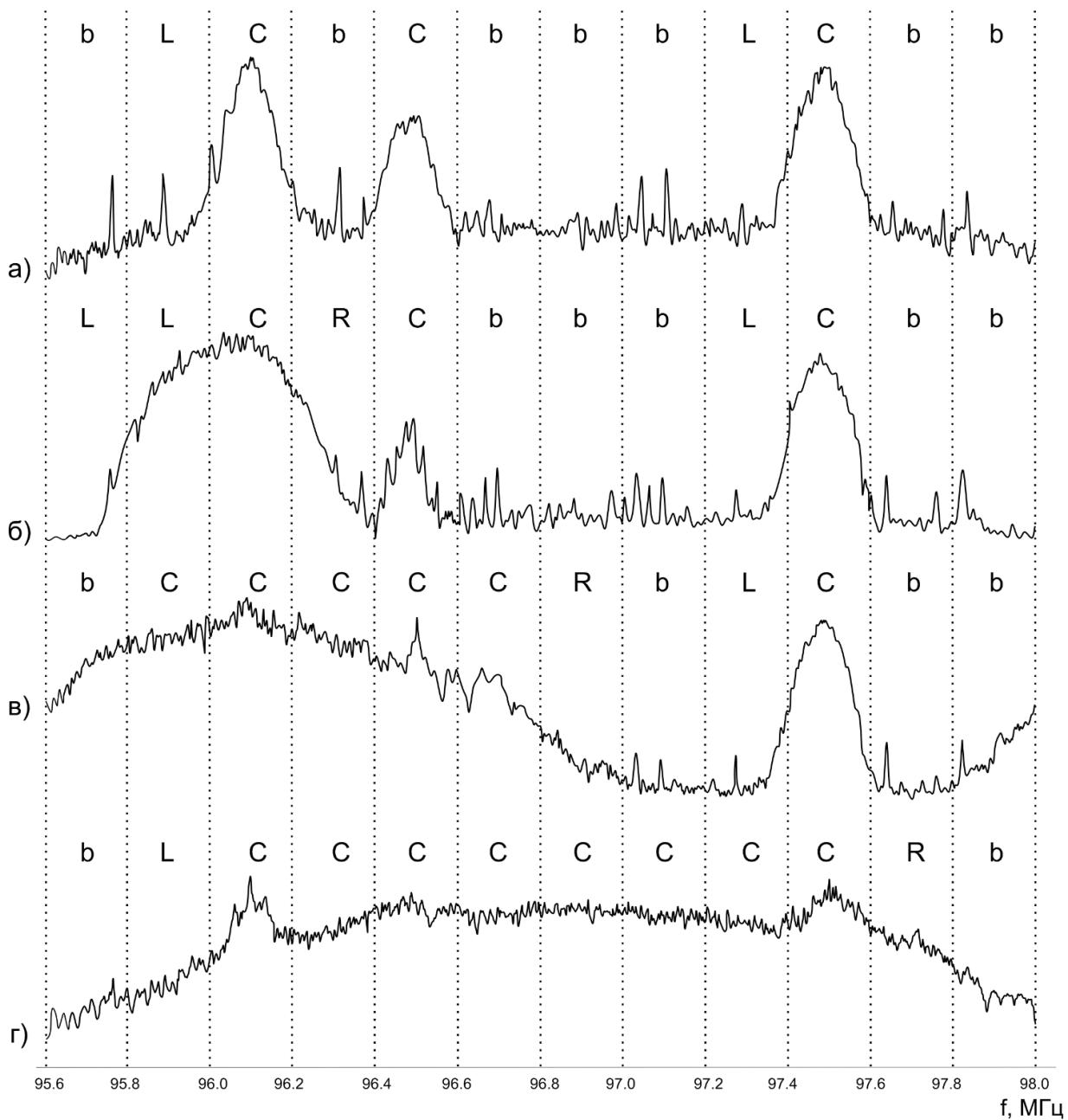


Рис. 1. Экспериментальные кривые спектрограмм радиочастот FM-диапазона и их расширенные лингвистические описания

Выводы. Полученные расширенные лингвистические описания спектрограмм дают представление о характере поведения кривых и позволяют понимать в каком из состояний исследуемого процесса они находится. Более детальное описание

исследуемых кривых возможно получить путем изменения длины участков и шага их следования на этапе сегментации, что в случае с анализом приведенных спектrogramм не является необходимым. Полученные расширенные описания спектrogramм радиочастот достаточно точно описывают характер поведения исследуемых кривых.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Григорьев Е. А. Разведочный анализ данных с помощью PYTHON / Е. А. Григорьев, Н. С. Климов – Текст : электронный // Научный электронный журнал E-SCIO. – 2020. – № 2. – URL: http://e-scio.ru/wp-content/uploads/2020/04/E-SCIO-2_2020.pdf (дата обращения: 10.10.2020).
2. Мандрикова О. В. Автоматизированный метод вычисления Dst-индекса на основе вейвлет-модели вариаций геомагнитного поля / О. В. Мандрикова, А. А. Степаненко. – DOI 10.18287/2412-6179-CO-709 // Компьютерная оптика. – 2020. – Т. 44, № 5. – С. 797-808.
3. Некратюк А. А. Использование метода MAPREDUCE в BIG DATA / А. А. Некратюк, О. А. Сафарьян // Молодой исследователь Дона. – 2020. – № 3 (24). – С. 174–179.
4. Третьяков И. А. Исследование применимости автоматизированной системы лингвистического анализа экспериментальных кривых / И. А. Третьяков. – Текст : электронный // ЛОМОНОСОВ-2020 : материалы Международного молодежного научного форума. – Москва : МАКС Пресс, 2020. – URL: https://lomonosov-msu.ru/archive/Lomonosov_2020/index.htm (дата обращения: 10.10.2020).
5. Третьяков И. А. Автоматизация метода лингвистического анализа спектrogramм радиочастот / И. А. Третьяков // Донецкие чтения 2020: образование, наука, инновации, культура и вызовы современности: Материалы V Международной научной конференции (Донецк, 17-18 ноября 2020 г.). – Том 1: Физико-математические и технические науки. Часть 2 / под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Донецк: Изд-во ДонНУ, 2020. – С. 170-173.
6. Алгоритмы идентификации переходных участков экспериментальных кривых с применением аппроксимации / В. В. Данилов, И. А. Третьяков, А. В. Шалаев, Я. И. Рушечников // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 48. – С. 19–23.
7. Данилов В. В. Алгоритмизация присвоения символов анализируемым участкам экспериментальных кривых / В. В. Данилов, И. А. Третьяков, Я. И. Рушечников // Сборник научных трудов Донецкого института железнодорожного транспорта. – 2018. – № 51. – С. 15–22.

Поступила в редакцию 04.12.2020 г.

METHOD OF EXTENDED LINGUISTIC DESCRIPTION OF FM RADIO FREQUENCY SPECTROGRAMS

Tretiakov I.A.

In this paper, the functionality of the previously developed automated system of scientific research is expanded. A method for a more extended linguistic description of radio frequency spectrograms is proposed, which makes it possible to make these descriptions taking into account the location of the curve sections on the abscissa axis. The resulting extended linguistic descriptions of the curves will reflect not only the classes of elementary events highlighted on it, but also their phases. Extended descriptions accurately describe the behavior of the curves under study.

Keywords: radio frequency spectrograms, linguistic analysis, experimental curves, data analysis, segmentation, classification.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, заведующий учебной лабораторией кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,

ДНР, г. Донецк.

E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Deputy Dean for Research, Head of laboratory at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

АКТИВНАЯ АНТЕННА-ФИЛЬТР

© 2021 *Банков С.Е., Давыдов А.Г., Калиничев В.И., Вьюгин П.А., Курушин А.А.*

Исследуется антenna-фильтр (АФ) в диапазоне 1-2 ГГц. Эта антenna принимает электромагнитные волны с круговой поляризацией и одновременно выполняет функцию полосового фильтра второго порядка. Конструкция состоит из печатной резонансной антены, связанной с двумя неизлучающими резонаторами, которые питаны через квадратурный балансный делитель мощности. Результаты численного моделирования с использованием программы HFSS ANSYS представлены в сравнении с экспериментальными характеристиками макета АФ из керамики с высокой диэлектрической проницаемостью. Предложенная антenna характеризуется почти двукратным увеличением рабочей полосы частот по сравнению с самой резонансной антенной при сохранении низкого уровня кросс-поляризации в полосе пропускания. Также показано, что антenna имеет частотную характеристику полосового фильтра второго порядка. Для повышения усиления антены в структуру внедрены два малошумящих усилителя. Это позволило улучшить коэффициент шума АФ.

Ключевые слова: антenna-фильтр, моделирование, согласование, керамика, облучатель, многослойная интегральная схема, HFSS ANSYS, косимуляция, схемотехнический анализ, коэффициент шума.

Введение. В последние годы наблюдается повышенный интерес к научным исследованиям и разработке многофункциональных антенн. К ним относятся, в частности, антenna-фильтры (АФ). Использование таких антенн расширяет функциональные возможности связи и навигационных систем, обеспечивая уменьшение размера модуля приемопередатчика и упрощение технологии производства.

Согласно традиционному подходу, антenna и полосовой фильтр рассматриваются как два разных несвязанных устройства, выполняющих разные функции. Антenna обеспечивает прием и излучение электромагнитных волн и в идеале не влияет на частотную характеристику (АЧХ) устройства. Фильтр формирует частотную характеристику и не излучает.

Во многих случаях постоянно возрастающие требования к размеру всех СВЧ элементов приходят в противоречии с традиционной концепцией. Действительно, уменьшение размера антены неизбежно приводит к увеличению её добротности и, следовательно, к снижению рабочей полосы частот [1]. В результате требования к полосе рабочих частот не могут быть удовлетворены для заданного КНД антены. Решение возможно за счет использования реактивных согласующих цепей, которые расширяют полосу пропускания антены. Так как сама малогабаритная антenna и её согласующая цепь являются комбинацией узкополосных резонаторов [2], то вся структура антены с согласующей схемой представляет собой полосовой фильтр, обеспечивающий передачу сигнала в заданном диапазоне частот. В этом случае нет необходимости использовать фильтр как дополнительный элемент, так как частотная фильтрация выполняется непосредственно в антenne. Таким образом, концепция АФ согласуется с требованиями миниатюризации радиочастотных модулей.

В целом, АФ можно классифицировать как структуры двух типов.

В конструкциях первого типа используется комбинация антены и фильтра. Электрически это несвязанные элементы, соединенные через их выводы. В структурах второго типа антenna и фильтр интегрированы конструктивно и электрически. В этом

случае антенна является одним из резонаторов, излучающим в полосе пропускания фильтра. Структуры этого типа представляют больший интерес для приложений.

Большинство работ, посвященных АФ, относятся к линейным поляризованным структурам первого типа. В [3] однослойный фильтр на П-образных резонаторах и печатный излучатель совмещены в многослойной объемной интегральной схеме. Аналогичная конструкция рассмотрена в [4], в которой используется Т-образная антенна и фильтр, выполненные на связанных микрополосковых линиях. Более сложный двух-диапазонный фильтр рассмотрен в [5]. Его выход соединен со входом излучателя сложной формы и работает в двух разделенных полосах частот. Антенна круговой поляризации с частотной избирательностью исследована в [6]. Она использует режекторный фильтр в полосе запирания, который подавляет резонансы более высокого порядка. АФ в [7] включает фильтр, выполненный из четырех печатных резонаторов сложной формы. Эта конструкция обеспечивает АЧХ эллиптического типа с нулями коэффициента передачи в полосе запирания и высоким уровнем подавления сигнала вне полосы пропускания.

АФ второго типа также представлены в литературе достаточно широко (см., например, [8-12]). Линейно-поляризованный вариант АФ рассмотрен в [8]. Он состоит из двух квадратных резонансных контуров, связанной линии и микрополосковой антенны. Эта антенна выполняет роль не только излучателя, но и резонатора полосового фильтра.

Планарная микрополосковая антенна расположена над системной платой и подходит для встраивания в выходную часть радиочастотного тракта. В [9] представлена конструкция АФ третьего порядка с линейной поляризацией. L-образная антенна совмещает функции излучателя и резонатора. Она состоит из излучающего резонатора (radiating resonator (RR)), который соединен с двумя полосковыми резонаторами на разрезанных кольцах. Полосковые резонаторы изготовлены на тонкой подложке и имеют незначительные потери излучения. Они представляют собой неизлучающие резонаторы (non-radiating resonators (NRR)). Такая интеграция RR и NRR характерна для АФ второго типа.

Антенны с круговой поляризацией имеют два независимых канала, каждый из которых работает на линейно поляризованных волнах. Патч-антенна с правосторонней круговой поляризацией, с фильтрующей схемой питания и высоким внеполосным уровнем подавления излучения, предложена в [10]. Высокая селективность делителя мощности достигается путем использования двух полосовых фильтров. Регулировка длины двух выходов фильтрующего делителя мощности обеспечивает разность фаз 90° . Патч-антенна и схема питания соединены металлическими перемычками (via). Измеренное отношение осей эллипса поляризации находится ниже 3 дБ в рабочей полосе с центральной частотой 2 ГГц.

Структура в [11] описывает многовходовую АФ в форме многослойной печатной схемы, которая изготовлена с использованием технологии SIW (substrate integrated waveguides). Она содержит двухмодовый RR, работающий на ортогональных линейных поляризациях. Круговая поляризация обеспечивается с помощью квадратурного балансного делителя мощности.

Аналогичная схема используется в [12], где описан вариант АФ с круговой поляризацией с одним NRR. Она работает аналогично печатной антенне круговой поляризации с одной точкой питания [13]. Недостатком таких антенн является ухудшение их поляризационных характеристик в полосе частот, которая оказывается существенно более узкой, чем полоса коэффициента усиления. Схема с двумя

независимыми каналами способна поддерживать круговую поляризацию в более широкой полосе частот.

Характеристики АФ могут быть улучшены с помощью малошумящих усилителей, включаемых в тракт. Эти вопросы исследуются в [15,16].

Статья организована следующим образом: предложенная конструкция АФ описана в разделе 2. В разделе 3 предложена эквивалентная схема для АФ с круговой поляризацией, которая описывает основные особенности настройки, обеспечивающие частотную характеристику Чебышевского типа. В разделе 4 представлены результаты электромагнитного моделирования. Раздел 5 содержит измеренные характеристики макета и сравнение с результатами численного моделирования.

Проектирование антенны-фильтра. Конструкция предложенной АФ схематично показана на рис. 1. Планарная антенна (RR) выполнена в виде печатного полуволнового излучателя. Два NRR представляют собой четвертьволновые печатные неизлучающие резонаторы.

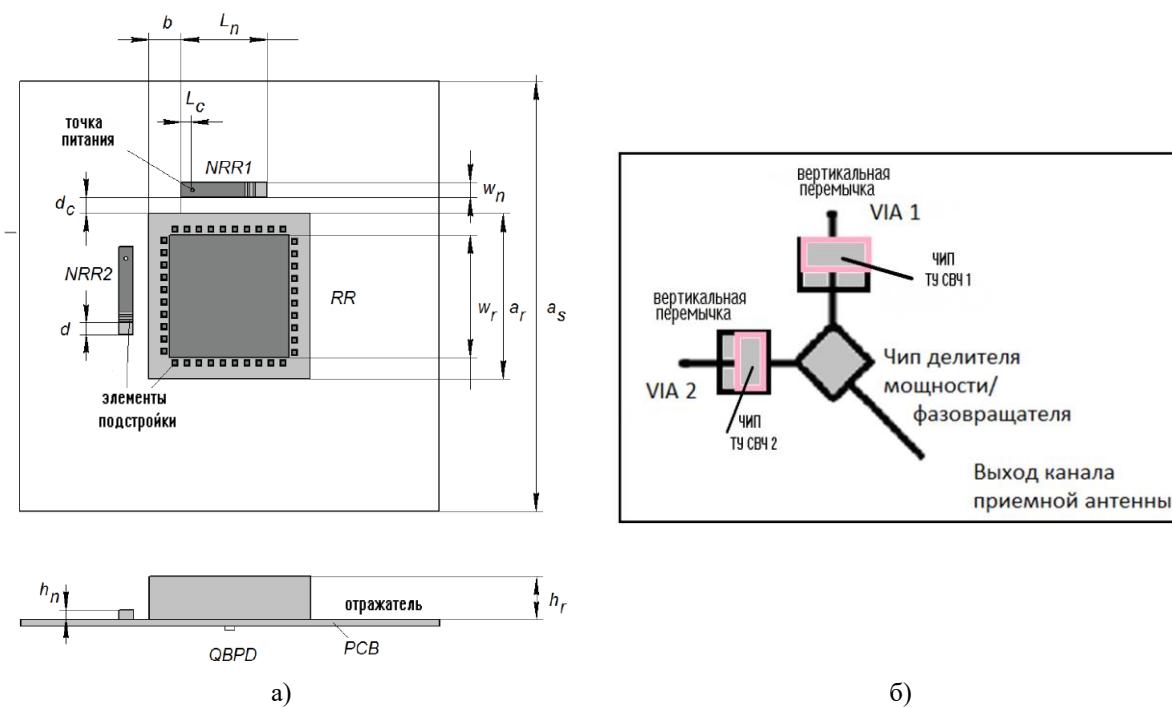


Рис. 1. Структура АФ на излучающей (а) и на обратной (б) стороне платы

Толщина диэлектрической подложки h_r , используемой в RR, должна быть больше, чем толщина h_n диэлектрической подложки NRR. В этом случае добротность RR значительно меньше, чем добротность NRR. Это означает, что диаграмма излучения АФ практически полностью определяется диаграммой направленности RR. Для минимизации размеров АФ в качестве подложки используются диэлектрические материалы с высокими значениями диэлектрической проницаемости $\epsilon > 40$.

Антенна (RR) и облучатели (NRR) размещены на верхней металлизированной поверхности печатной платы, а чип, распределяющий мощность и сдвигающий фазы, помещен снизу на нижней диэлектрической поверхности. Его выходы подключены к точкам питания NRR 1,2 через металлические перемычки. Связь между RR и NRR обеспечивается за счет перекрытия их близких полей и определяется в основном расстоянием d_c . Параметр L_c определяет расположение точек питания обоих NRR, а d – длина не металлизированной области на верхней поверхности NRR.

Модель АФ в виде эквивалентной схемы, применяемая в традиционном синтезе [2], в данном случае не дает удовлетворительных результатов. Причина в том, что классическая теория синтеза фильтров предполагает идентичность резонаторов и их высокую добротность Q , в то время как в АФ рис. 1 RR и NRR сильно отличаются по своей структуре и электрическим параметрам. Объем RR может превышать объем NRR на несколько порядков. Следовательно, их добротности $Q_{01,02}$, обусловленные тепловыми потерями в материалах, существенно отличаются. Как правило, $Q_{02} \gg Q_{01}$, где Q_{01}, Q_{02} определяются тепловыми потерями NRR и RR, соответственно. В данной конструкции имеем $Q_{01} = 100$, $Q_{02} = 600$. Таким образом, коэффициент тепловых потерь значительно влияет на частотные характеристики АФ и должен быть принят во внимание при выборе его параметров.

В то же время настройка АФ с помощью численной модели или в прототипе довольно сложная и трудоемкая. Чтобы ее облегчить, необходимо использовать относительно простую модель для определения потенциально достижимых характеристик. Для упрощения анализа рассмотрим модель АФ в виде схемы замещения на рис. 2.

Элементы L_1, C_1, g_1 образуют первый резонансный контур, моделирующий NRR. Элементы L_2, C_2, g_2 образуют второй резонансный контур, соответствующий RR. Емкость C_c описывает элемент связи между двумя контурами. Проводимость g_r моделирует передачу энергии в пространство через излучение RR. Сопротивление $Z_0 = 1/g_0$ является внутренним сопротивлением источника напряжения E .

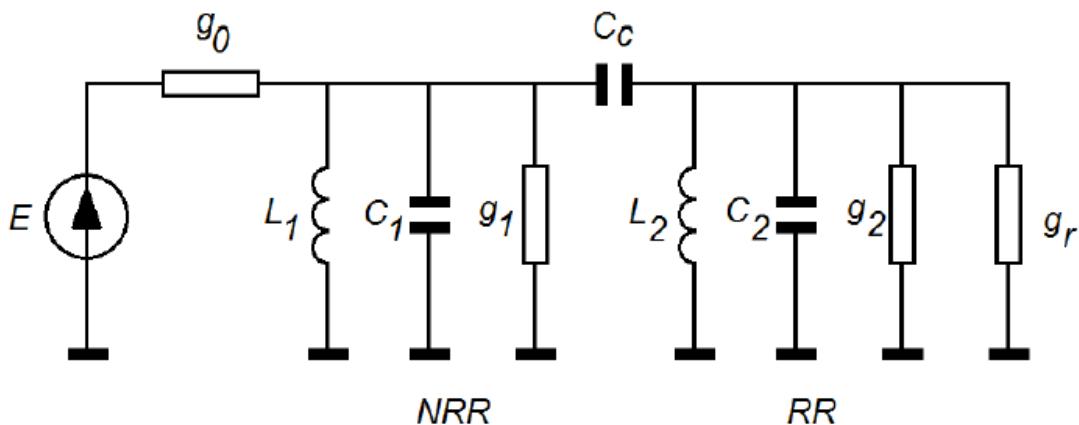


Рис. 2. Эквивалентная схема АФ

Параметры схемы замещения, показанные на рис. 2, неудобны для описания, из-за сложности их измерения. Ниже мы будем использовать обобщенные параметры, традиционно используемые в теории синтеза фильтров на основе связанных резонаторов [2]. К ним относятся: собственные резонансные частоты $f_{01,2}$ несвязанных резонаторов и ненагруженные добротности $Q_{01,2}$, нагруженные добротности $Q_{L1,2}$, коэффициент связи k_c и характеристические сопротивления контуров $\rho_{1,2}$. При заданном g_0 параметр ρ_1 для NRR однозначно определяется величинами f_{01} и Q_{L1} . Таким образом, только параметр ρ_2 является независимой переменной, определяемой с помощью коэффициента связи $k_p = \rho_2/\rho_1$, который, в свою очередь, находится через собственные резонансные частоты связанных резонаторов $f_{01,2}$ [2]. Заметим, что обобщенные параметры, за исключением коэффициента k_p , могут быть относительно просто определены из измерений или путем численного моделирования. Как будет показано ниже, частотная характеристика синтезированной АФ практически не зависит от k_p и,

следовательно, является функцией переменных, которые могут быть определены для реальной структуры АФ. Пусть f_0 - центральная частота, δf - ширина полосы пропускания АФ, R - неравномерность ЧХ АФ в полосе пропускания, L_m - минимальные вносимые потери в полосе пропускания, а K - наклон частотной характеристики вне полосы пропускания. Параметр K определяется как отношение значений АЧХ на краях полосы и при смещении на 0.1 ГГц. Цель состоит в достижении частотной характеристики Чебышевского типа с заданным значением параметра R . Для такой частотной характеристики полоса пропускания определяется стандартным способом в зависимости от уровня L_m+R .

Параметры АФ по-разному изменяются при настройке. Некоторые из них можно изменять довольно просто. К ним относятся собственные частоты $f_{01,2}$, которые управляются элементами настройки (рис. 1), нагруженная добротность Q_{L1} NRR, определяемая расстоянием L_c , и коэффициентом связи k_c , зависящий от расстояния d_c . Предположим, что они являются свободными параметрами, в то время как другие настраиваются. Варьируя обобщенные параметры, можем удовлетворить нижеследующим условиям, наложенным на АЧХ схемы замещения. При этом частотная характеристика определяется как амплитуда коэффициента передачи T от источника с внутренним сопротивлением Z_0 к нагрузке g_r .

Потребуем, чтобы функция $T(f)$ удовлетворяла следующим условиям: центральная частота полосы пропускания равна f_0 , частотная характеристика имела симметричную форму относительно центральной частоты, ширина полосы пропускания δf , а величина вносимых потерь L_m должна быть минимальной. Математически задача сводится к решению системы трансцендентных уравнений. Здесь можем сделать некоторые важные выводы. Требование симметрии может удовлетворяться при различных собственных частотах $f_{01,2}$. Основным фактором, определяющим их различие, является отношение характеристических сопротивлений контуров k_p . При $k_p=1$ имеем $f_{01}=f_{02}$.

Существует оптимальное значение Q_{L1} , обеспечивающее минимальное значение L_m . Это оптимальное значение Q_{L1} существенно меньше, чем значение Q_{L2} , относящееся к RR, в отличие от классической теории фильтров, предполагающей равенство добротностей Q .

Параметры АФ при оптимальном значении Q_{L1} в зависимости от нормированной полосы пропускания показаны на рис. 3. Эти характеристики получены для $f_0=1.6$ ГГц, $Q_{01}=100$ (кривая 1), 150 (кривая 2), 200 (кривая 3), $Q_{02}=1000$, $Q_r=60$, где Q_r - добротность RR. Как отмечалось выше, результаты, показанные на рис. 3, не зависят от k_p . Они также не зависят от Q_{02} , предполагая $Q_{02}>>Q_r$.

Из рис. 3 видим, что некоторые зависимости, описывающие свойства АФ, имеют нестандартное поведение. В частности, потери возрастают при увеличении полосы пропускания, в то время как в обычных неизлучающих фильтрах они уменьшаются. Также можно видеть существенные вариации частотной характеристики в пределах полосы пропускания от 0.1 дБ до 1 дБ. При $R<1$ ЧХ можно считать скорее максимально плоской, чем Чебышевского типа.

Потери в полосе пропускания зависят от Q_{01} и Q_r . Потери уменьшаются с увеличением добротности NRR Q_{01} и увеличиваются с увеличением параметра Q_r , который, в основном, определяет значение добротности RR, при условии $Q_{02}>>Q_r$. Такое поведение обусловлено принятым методом настройки, который использует только ограниченный набор параметров. Например, мы не можем свободно изменять нагруженную добротность Q_{L2} RR, зависящую от его размера.

В отличие от этого параметра, резонансная частота может быть настроена и управляться довольно просто с помощью регулировочных винтов.

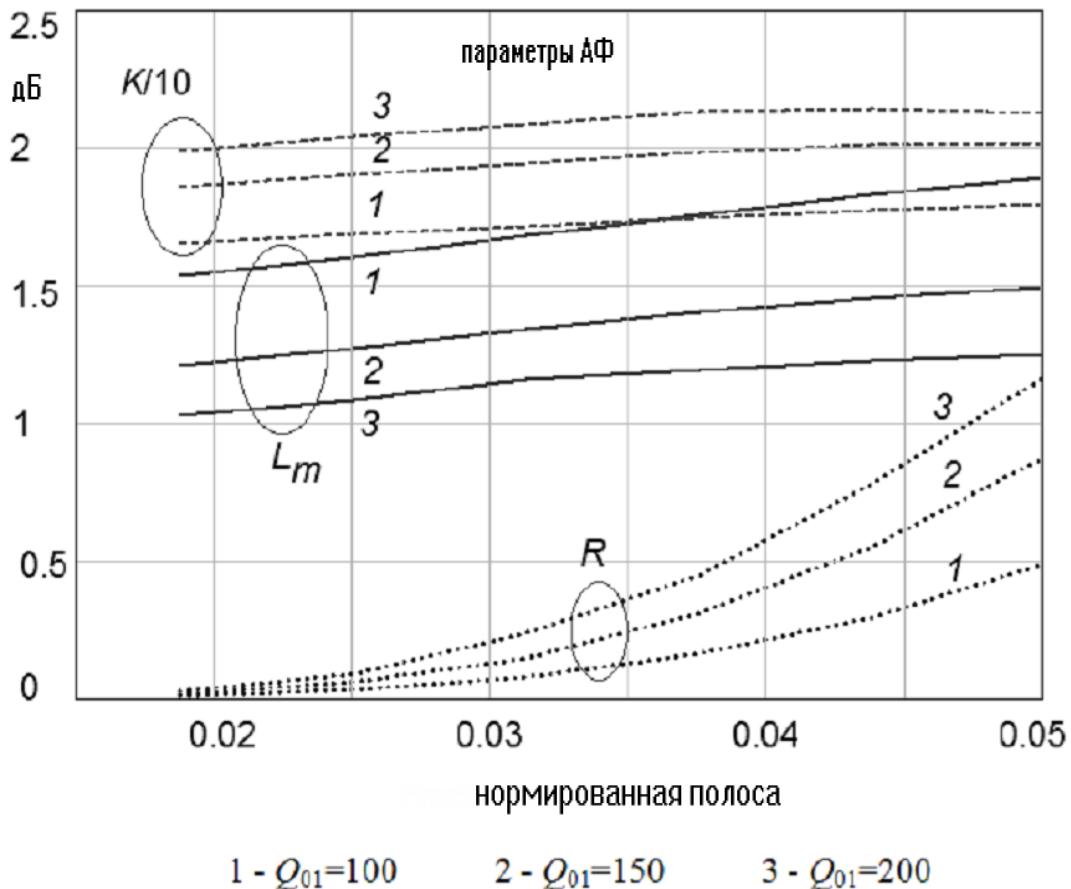


Рис. 3. Зависимость параметров АФ (наклон K , неравномерность АЧХ и потери R) от нормированной ширины полосы частот на частоте $f_0=1.6$ ГГц, при $Q_{02}=1000$, $Q_r=60$, $Q_{01}=100$ (кривая 1); 150 (кривая 2); 200 (кривая 3)

Зависимости на рис. 3 дают предварительные результаты оценки характеристик АФ, достигнутые на типовых параметрах резонаторов. Например, при полосе пропускания $\delta f = 60$ МГц можно достичь наклон $K \approx 18$ дБ/ГГц при значении потерь $L_m=1,2$ дБ и неравномерности $R=0,2$ дБ.

Электродинамическое моделирование. Для уменьшения размера АФ использовался керамический материал с высокой добротностью и диэлектрической проницаемостью $\epsilon=45$ и $tg\delta=10^{-3}$. Некоторые из размеров резонатора были фиксированными: $h_r=8$, $h_n=2$, $w_n=2$, $a_r=19$. Цель электродинамического моделирования состояла в том, чтобы определить параметры АФ, которые могут обеспечить следующие характеристики: $\delta f > 60$ МГц, $f_0=1,6$ ГГц, минимальные потери в полосе пропускания, минимальное излучение перекрестной поляризации LHCP и обеспечение RHCP как основной поляризации.

В первую очередь были проведены исследования характеристик несвязанных NRR и RR для того, чтобы настроить их на центральную рабочую частоту и определить нагруженные добротности и добротности излучения. При настройке изменялись параметры L_n , d и w_r (рис.1). Электродинамическое моделирование было выполнено с использованием HFSS ANSYS. При этом собственные комплексные частоты были

рассчитаны для резонаторов, окруженных воздушным боксом с граничными условиями PML (perfect matched layers). Минимальная часть собственной частоты определяет добротность Q резонатора. В общем случае значение ненагруженной добротности определяется двумя составляющими $Q^{-1} = Q_r^{-1} + Q_h^{-1}$, где Q_r и Q_h соответствуют потерям на излучение и тепловым потерям.

Моделирование показывает, что в окрестности резонансной частоты 1.6 ГГц ненагруженная добротность NRR, определяемая тепловыми потерями на излучение, равна $Q_L = 112$.

Параметр C определен как $C = PLHCP / PRHCP$, где $PLHCP$, $PRHCP$ - мощности излучения соответственно на кросс- и ко-поляризации в направлении вертикальной оси Z . На рис. 4 показаны частотные характеристики G_{real} , S_{11} , C , AR при различных значениях положения L_c точек возбуждения NRR. Кривые на рис. 4 были рассчитаны для трех положений $L_c = 0.9, 1.1, 1.3$; другие параметры $d_c = 3.5$, $L_n = 11$, $a_r = 19$, $a_r = 19$, $a_s = 100$, $w_r = 11.2$, $w_n = 2$, $h_r = 8$, $h_n = 2$, $d = 1.3$, $b = 4$, $\epsilon = 45$, $\operatorname{tg}\delta = 0$, $a_s = 100$, $w_r = 11.2$, $w_n = 2$, $h_r = 8$, $h_n = 2$, $d = 1.3$, $b = 4$, $\epsilon = 45$, $\operatorname{tg}\delta = 0.001$.

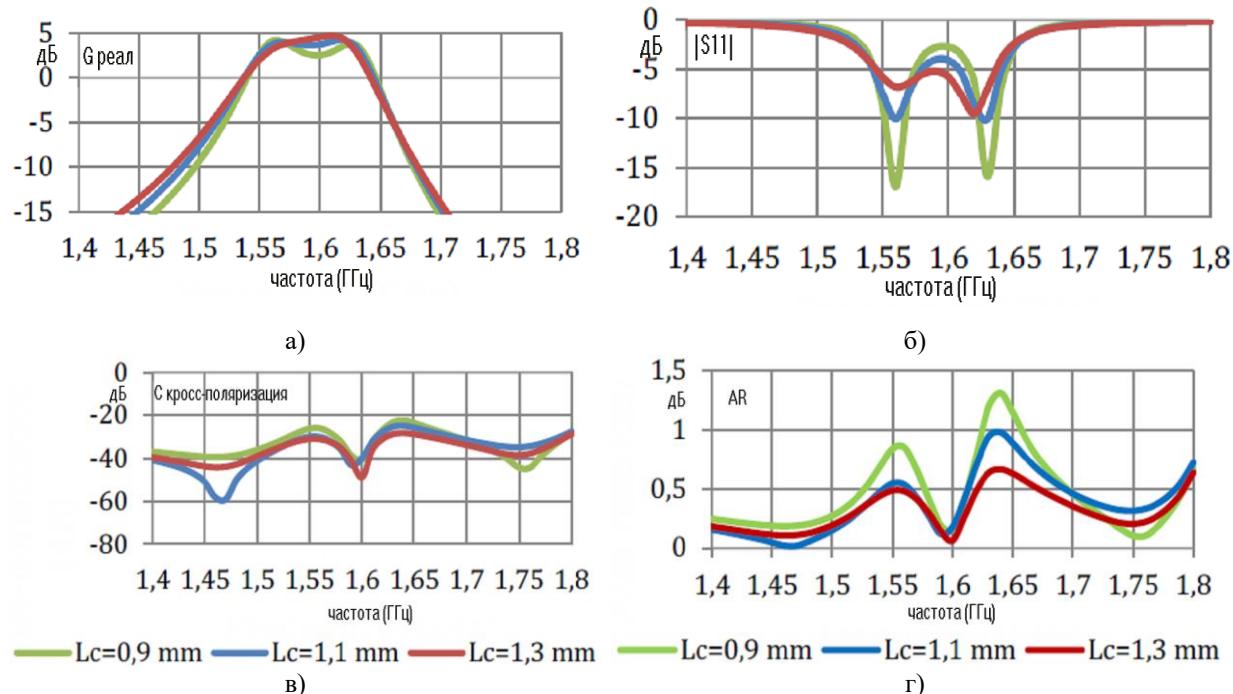


Рис. 4. Усиление (а), возвратные потери (б), перекрестная поляризация (в), осевое отношение (г) АФ в зависимости от частоты при $L_c = 0.9$ мм, 1.1мм, 1.3мм ($d_c = 3.5$ мм).

Частотные зависимости на рис. 4 имеют ожидаемую форму. Изменение положения точки питания изменяет нагруженную добротность Q_{LI} NRR, что в свою очередь приводит к изменению добротности связанный системы NRR-RR. Уменьшение добротности уменьшает пульсации в полосе пропускания и уменьшает скорость изменения ЧХ вне полосы пропускания. Обратим внимание на асимметрию частотной характеристики, возникающей при больших L_c . Это связано с влиянием положения точки питания на резонансную частоту NRR. Чтобы сохранить симметрию, нужно настроиться на резонансную частоту.

Расстояние d_c , в основном, влияет на связь между резонаторами, то есть на разницу между резонансными частотами NRR-RR. Этот параметр определяет ширину полосы пропускания. Расширение полосы пропускания, которое происходит при

меньших значениях d_c , приводит к большей неравномерности в полосе пропускания. Отметим, что все особенности в зависимостях характеристик АФ, полученные в электродинамическом моделировании, качественно совпадают с полученными в рамках упрощенной модели эквивалентной схемы.

Также отметим, что коэффициент отражения на центральной частоте довольно высокий. Это связано с относительно высоким значением добротности излучения патч-антенны $Q_{r2}=106$. При таком значении Q_r , требуемая полоса пропускания может быть получена только при некотором рассогласовании на центральной частоте, что приводит к увеличению вносимых потерь. Что касается поляризационных характеристик, то они слабо зависят от d_c и L_c и, в основном, определяются расстоянием b (рис. 1). Как видим из рис. 4 с, уровень перекрестной поляризации в полосе пропускания не превышает -25 дБ.

Экспериментальные результаты. Был изготовлен и протестирован макет антенны фильтра (рис. 5) со следующими параметрами: $L_c=1.1$ мм, $L_n=11$, $a_r=19$, $a_s=100$, $w_r=11.2$, $w_n=2$, $h_r=8$, $h_n=2$, $d=1.3$, $b=4$, $d_c=3.5$, $\varepsilon=45$.

Макет изготовлен на печатной плате из стекловолокна. На ее металлизированной стороне расположены RR и NRR. Квадратурный мост, выполненный на чипе QCN-19, помещается на обратной стороне.

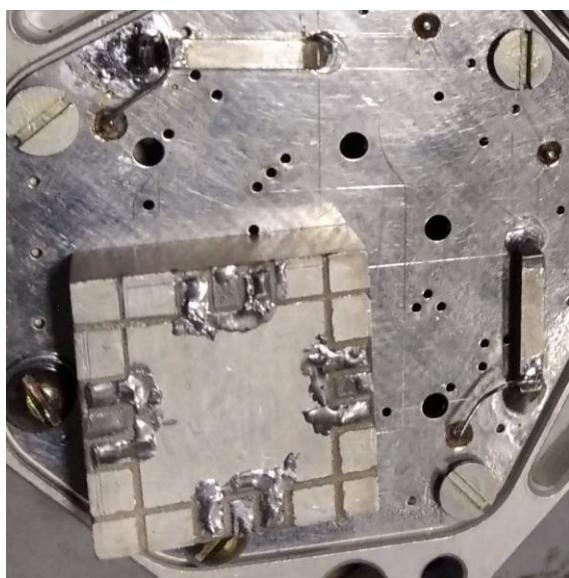


Рис. 5. Макет АФ (излучающая сторона)

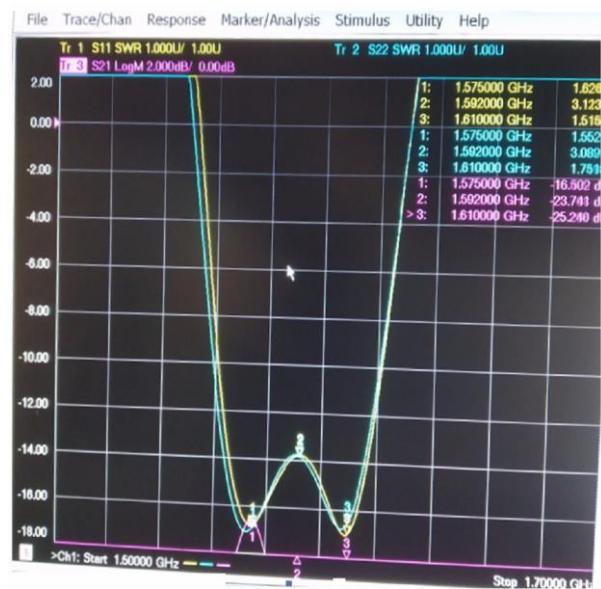


Рис. 6. Измеренная частотная характеристика АФ

Были измерены частотные характеристики усиления, возвратных потерь и поляризационные характеристики. Кроме того, измерялись ДН на центральной частоте и в диапазоне частот. Измерения проводились в безэховой камере. Результаты измерений возвратных потерь представлены на рис. 6.

Двух-поляризационная широкополосная антенна Lindgreen в режиме передачи и анализатор цепей Agilent VNA N5230C были использованы для одновременных измерений параметров АФ на двух ортогональных поляризациях. Для измерения коэффициента усиления АФ была использована стандартная методика, в основе которой лежит замена исследуемой антенны тестовой антенной с известным коэффициентом усиления. В данном случае был использован полуволновой вибратор.

На рис. 7-8 показаны результаты измерений (сплошные линии) в сравнении с результатами ЭМ моделирования (пунктирные линии). Частотная характеристика коэффициента усиления в полосе частот пропускания АФ показана на рис. 7. Нормированная диаграмма направленности направленности правосторонней поляризации на частоте 1,6 ГГц представлена на рис. 8.

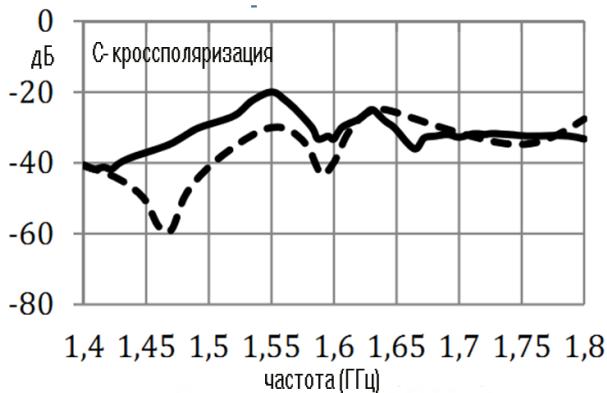


Рис. 7. Частотная зависимость кроссполяризации: сплошная линия - измерение, пунктирная - расчет

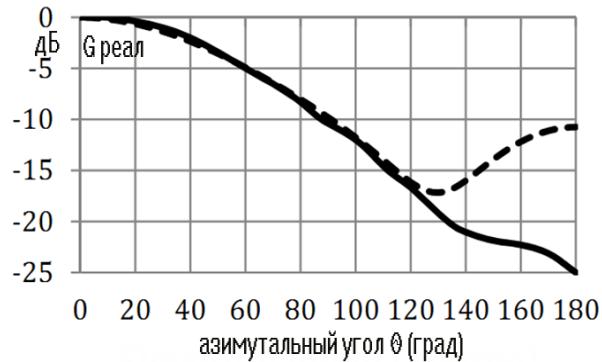


Рис. 8. Правосторонняя нормированная ДН на частоте 1,6 ГГц: сплошная линия - измерение, пунктир - расчет

Диаграмма излучения показана в зависимости от угла θ в угломестной плоскости и соответствует углу $\varphi = 0$ в азимутальной плоскости. Следует отметить, что ДН излучения практически не зависит от угла φ . Имея измеренные и рассчитанные данные, получаем максимальное значение направленности 6,6 dB_i при $\theta=0^\circ$. Измеренное значение усиления составляет 4,1 dB_i , что приводит к общим вносимым потерям 2,5 dB . С другой стороны, предполагаемые вносимые потери, полученные выше, составляют 2,25-2,4 dB . Оба значения потерь согласуются. Это может служить дополнительным подтверждением того, что эквивалентная схема АФ является не только качественно правильной, но и дающей правильное количественное описание.

Рассмотрим схему деления мощности и распределения фаз вместе с излучающей антенной в режиме линейной поляризации, находящейся в малогабаритной безэховой камере (рис.9).

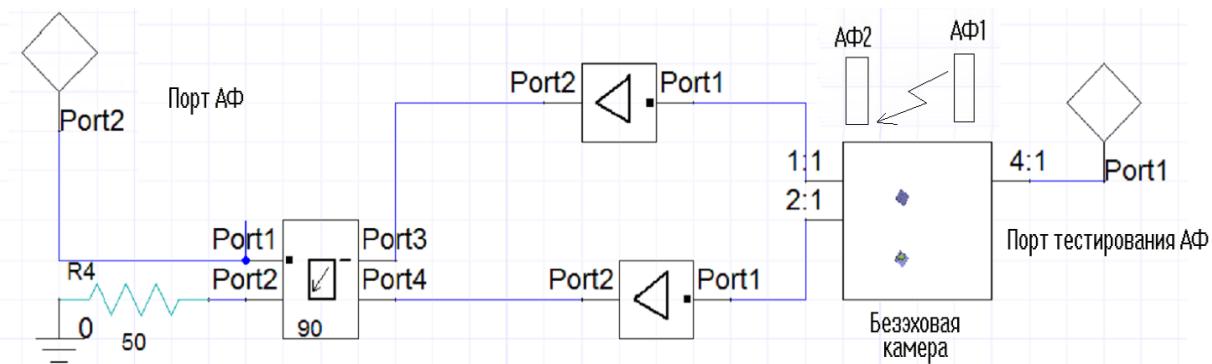


Рис. 9. Схема объединения АФ и делителя мощности в режиме тестирования характеристик

Входной порт Port 1 присоединяется к излучающей антенне, находящейся в безэховой камере, а выходы исследуемой АФ через усилители и направленный ответвитель, выполняющий роль делителя мощности и фазовращателя, через Port2 подключаются к измерителю коэффициента шума, как показано на рис. 10.

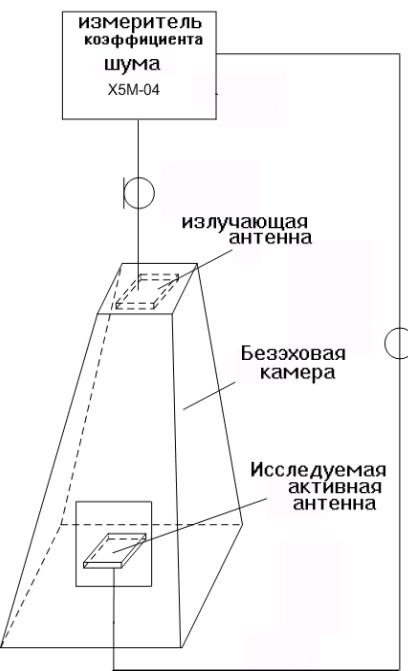


Рис. 10. Схема измерения коэффициента шума "на проход" активной АФ

Направленный ответвитель на рабочей частоте имеет следующую идеализированную матрицу рассеяния:

$$S = \begin{bmatrix} 0 & 0.707 & 0.707\angle 90^\circ & 0 \\ 0.707 & 0 & 0 & 0.707\angle 90^\circ \\ 0.707\angle 90^\circ & 0 & 0 & 0.707 \\ 0 & 0.707\angle 90^\circ & 0.707 & 0 \end{bmatrix}.$$

Схема, описываемая такой матрицей рассеяния, включена в структуру на рис. 9 и обозначена на ней как неизлучающий четырехпортовой объект.

Спроектированную антенну с круговой поляризацией можно использовать для выполнения функции излучающей антенны в малогабаритной беспроводной камере, предназначенней для тестирования антенн систем GLONASS и GPS.

Методика измерения шумовых характеристик АФ состоит в следующем. Шумовая мощность, вводимая в камеру с помощью излучающей антенны, расположенной в верхней части малогабаритной беспроводной камеры (рис. 10), принимается испытуемой активной АФ и далее складывается с тепловыми шумами входного транзисторного СВЧ усилителя с учетом диаграммы направленности активной антенны. При оценке шумовых свойств антенного тракта должны учитываться все источники флуктуаций. Они влияют на эффективную температуру антенн, показывающую дополнительный шумовой вклад в антенный тракт. Очевидно, что эффективная температура антенн зависит от её диаграммы направленности и тепловых потерь.

Измеритель коэффициента шума определяет коэффициент шума, который является универсальной характеристикой для оценки шумовых свойств систем и устройств.

В измерителе коэффициента шума на входе испытуемого четырехполюсника воздействует калибранный шум (шумовая трубка) и измеряется коэффициент шума [16]:

$$K_{uu} = \frac{P_{uu.вых}}{P_{uu.вых}}, \quad (1)$$

где $P_{uu.вых}$ – мощность шума на выходе при воздействии всех источников шума, $P_{uu.вых}$ – мощность шума на выходе, определяемая только мощностью генератора шума на входе (предполагая отсутствие шума в исследуемой активной антенне).

Таким образом, описанная схема измерения коэффициента шума (1) "на проход" может использоваться для тестирования и исследования активной АФ. Расчет шумовых характеристик активной АФ был выполнен в программе Schematic HFSS ANSYS, которая объединяет излучающую 3D структуру и неизлучающие схемные элементы (чипы НО и усилительных элементов). Результаты расчета приведены на рис. 11.

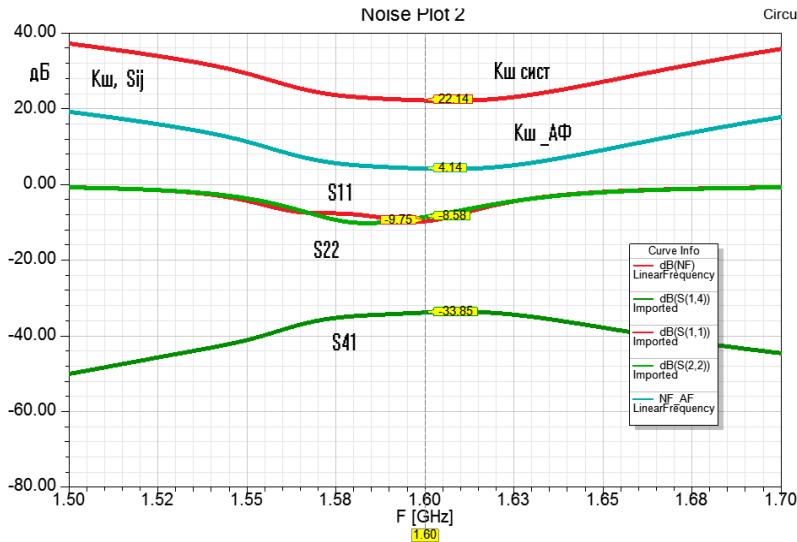


Рис. 11. Частотные характеристики коэффициента шума и коэффициента передачи измерительного тракта с АФ

Коэффициент шума всего тракта с учетом потерь между тестовой и излучающей антеннами определяется по формуле:

$$K_{uu.сист} = L_{тракта} + (K_{uu.АФ} - 1)L_{тракта} = L_{тракта}K_{uu.АФ}, \quad (2)$$

где $K_{uu.сист}$ – коэффициент шума всего тракта, включающего и рупорную и тестируемую активную антенну, $L_{тракта}$ – затухание в канале распространения волн, $K_{uu.АФ}$ – коэффициент шума АФ. При использовании логарифмических единиц из (2) имеем:

$$K_{uu.АФ}[\text{dB}] = K_{uu.сист}[\text{dB}] - L_{тракта}[\text{dB}]. \quad (3)$$

С учетом рассчитанного коэффициента шума системы и коэффициента передачи между излучающей и тестируемой антеннами, а также с учетом рассогласования антенн с трактом получаем коэффициент шума активной АФ (рис. 11). Из (3) видим, что коэффициент шума АФ зависит от коэффициента передачи всего антенного тракта и не зависит от коэффициента передачи усилителя. Однако от коэффициента передачи

усилителя зависит точность измерения коэффициента шума измерительным прибором. Известно, что при выходе из строя усилителя (или резком спаде его усиления), коэффициент шума системы резко возрастает. По этому признаку можно определять выход из строя активной антенны.

Заключение. В данной работе показано, что предложенная конструкция АФ может быть использована в качестве фильтрующей антенны с частотной характеристикой полосового фильтра второго порядка для приемника сигналов GPS, ГЛОНАС. Уровень вносимых потерь в ней не превышает уровня потерь в модуле традиционной конфигурации, в котором за полосовым фильтром второго порядка следует печатная антenna. Результаты работы можно рассматривать как доказательство эффективности предложенной концепции компактной АФ круговой поляризации с увеличенной полосой частот и низким уровнем кросс-поляризации в полосе пропускания. Внесение в конструкцию АФ усилителей позволяет на 1-2 дБ снизить коэффициент шума активной АФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chu L. J. Physical limitations of omnidirectional antennas / L. J. Chu // Journal of Applied Physics. – 1948. – Vol. 19, № 12. – P. 1163–1175.
2. Mattaei G. Microwave Filters, Impedance-Matching Networks, and Coupling Structures / G. Mattaei, L. Young, E. M. T. Jones. – Narwood : Artech House, 1980. – 1096 p.
3. An Integrated Approach to RF Antenna-Filter Co-Design / J. Zuo, X. Chen, G. Han [et al.] // IEEE Antennas Wireless Propag Lett. – 2009. – № 8. – P. 141–144.
4. Jadhav J. Filtering antenna with radiation and filtering functions for wireless applications / J. Jadhav, P. Deore // Journal of Electrical Systems and Information Technology. – 2017. – № 4. – P. 125–134.
5. A Codesigned compact dual-band filtering antenna with PIN loaded for WLAN applications / S. Chen, Y. Zhao, M. Peng, Y. Wang. – Текст : электронный // International Journal of Antennas and Propagation. – 2014. – URL: www.hindawi.com/journals/ijap/2014/826171/ (дата обращения: 10.01.2021).
6. Compact circularly polarized truncated square ring slot antenna with suppressed higher resonances / M. Sabran, S. Rahim, C. Leow [et al.]. – Текст : электронный // PLoS ONE. – 2017. – № 12 (2). – URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0172162> (дата обращения: 10.01.2021).
7. Design of a selective filter-antenna with low insertion loss and high suppression stopband for WiMAX applications / M. K. Alkhafaji, R. K. Z. Sahbudin, A. B. Ismail, S. J. Hashim. – DOI 10.4172/2090-4886.1000147. – Текст : электронный // International Journal of Sensor Networks and Data Communications. – 2016. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/309214252> (дата обращения: 10.01.2021).
8. Low-cost microstrip filter antenna with a monopole-like radiation pattern for RF front end / W. J. Wu, Y. Z. Yin, J. J. Xie [et al.] // Microwave and Optical Technology Letters – 2012. – Vol. 54, No. 8. – P. 1810–1814.
9. A new compact filter-antenna for modern wireless communication systems / W. J. Wu, Y. Z. Yin, S. L. Zuo [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2011. – Vol. 10. – P. 1131–1134.
10. A novel circularly polarized filtering antenna with high out-of band radiation rejection level / M. Qu, M. Li, L. Yao [et al.] // Microwave Optical Technology Letters. – 2018. – Vol. 60, № 1. – P. 134–140.
11. Patent № 8,836,596 B2 United States. Filter antenna : filed Jan. 15, 2014 : date of patent Sep. 16, 2014 / Wayne Edward Richards, La Mesa, Nathan Labadie, San Diego ; applicant : Cubic Corporation, San Diego, CA. – 15 p.
12. Патент № 2448396 Российская Федерация, МПК H01Q 9/04 (2006.01). Антенна-фильтр : № 2011105072/07 : заявл. 11.02.2011 : опубл. 20.04.2012 / Банков С. Е., Давыдов А. Г. – Бюл. № 11. – 17 с.
13. Wong K. L. Compact and Broadband Microstrip Antennas / K. L. Wong. – New York : John Wiley & Sons Inc., 2002. – 344 p.
14. Circular Polarization Antenna-Filter / S. Bankov, A. Davydov, V. Kalinichev [et al.] // Advanced Electromagnetics. – 2019. – Vol. 8, No. 5. – P. 7–14.

15. Курушин А. А. Электродинамический расчет транзисторного СВЧ усилителя / А. А. Курушин // Вестник Донецкого Национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2020. – № 1. – С. 14–23.
16. Duixian L. Antenna-in-Package Technology and Applications / Duixian Liu, Yueping Zhang. – New York : Wiley & Sons, 2020. – 416 p.

Поступила в редакцию 31.01.2021 г.

ACTIVE ANTENNA FILTER

The antenna-filter (AF) is investigated in the range of 1-2 GHz. This antenna receives electromagnetic waves with circular polarization and simultaneously performs the function of a second-order bandpass filter. The design consists of a printed resonant antenna connected to two non-radiating resonators, which are powered through a quadrature balanced power divider. The results of numerical simulation using HFSS ANSYS are presented in comparison with the experimental characteristics of the AF model made of high-quality ceramics with high dielectric permittivity. The created antenna is characterized by an almost two fold increase in the operating frequency band compared to the resonant antenna itself, while maintaining a low level of cross-polarization within the bandwidth. It is also shown that the antenna has the frequency response of a second-order bandpass filter. To increase the antenna gain, two low-noise amplifiers are integrated into the structure.

Keywords: antenna-filter, modeling, matching, ceramics, multilayer integrated circuit, HFSS ANSYS, co-simulation, circuit analysis, low noise amplifier

Банков Сергей Евгеньевич

доктор технических наук, доцент, главный научный сотрудник ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук», Российской Федерации, г. Москва.
E-mail: sbankov@yandex.ru

Bankov Sergei Evgenievich

Doctor of Technical Sciences, Docent, Chief Researcher of V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Moscow.

Давыдов Александр Георгиевич

кандидат технических наук, начальник отдела АО «МКБ Компас», Российской Федерации, г. Москва.
E-mail: alexanderdavydov@yandex.ru

Davydov Alexander Georgievich

Candidate of Technical Sciences, Head of Department design Antena «MKB Kompas», Russian Federation, Moscow.

Калиничев Виктор Иванович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник ФГБУН «Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова Российской академии наук», Российской Федерации, г. Москва.
E-mail: vik_9@hotmail.com

Kalinichev Viktor Ivanovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher of V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Russian Federation, Moscow.

Выugin Пётр Александрович

ведущий инженер АО «МКБ Компас», Российской Федерации, г. Москва.

Viugin Petr Aleksandrovich

Lead Engineer of «MKB Kompas», Russian Federation, Moscow.

Курушин Александр Александрович

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры радиотехнических приборов и антенных систем ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"», Российской Федерации, г. Москва.
E-mail: kurushin@mail.ru

Kurushin Aleksandr Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor of Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation, Moscow.

И Н Ф О Р М А Т И К А , В Ы Ч И С Л И Т Е Л Ь Н А Я
Т Е Х Н И К А И У П Р А В Л Е Н И Е

УДК 004.932

РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИЦ НА ИЗОБРАЖЕНИЯХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

© 2021 *Биленко А.Ю., Нестругина Е.С.*

В настоящей работе рассмотрены базовые принципы работы нейронной сети на Python с использованием различных алгоритмов распознавания лиц, реализованы соответствующие подходы, выбран алгоритм и определены программные средства разработки.

Ключевые слова: модель, ядро, каскадные классификаторы, нейронная сеть, Python, Dlib, OpenCV, HOG, CNN.

Введение. Искусственные интеллектуальные системы, благодаря богатым возможностям и эффективности использования, получили в мире заслуженную популярность. Интеллектуальные системы являются уникальным инструментом для решения задач в области анализа и обработки большого объема данных, решения задач разного уровня сложности. Широкое практическое применение они находят в экономике, бизнесе, робототехнике, медицине, математике, авионике, биофизике, безопасности и в охранных системах и т.д. [1]. Большой интерес вызывает возможность распознавания лиц.

В настоящее время в системах искусственного интеллекта активно используются искусственные нейронные сети, состоящие из искусственных нейронов, каждый из которых представляет собой упрощенную модель биологического нейрона [2, 3]. Нейронная сеть – это математическая модель, а также ее программное и аппаратное воплощение, построенная по принципу организации и функционирования сетей нервных клеток живого организма.

С увеличением роста популярности сверточных нейронных сетей особенно стала актуальной задача распознавания лиц на изображении, а также в режиме реального времени. Архитектура сверточных нейронных сетей близка строению человеческого мозга. Исследования в этой области могут помочь создать высокоточные системы компьютерного зрения.

Благодаря нейронным сетям появилась возможность выделять и определять особенности лица, которые незаметны взгляду человека, и интерпретировать эти особенности и их совокупность как возрастные характеристики. Для этого исследования был проведён анализ существующих подходов по распознаванию лиц, в котором определены наиболее удобные и современные средства для разработки программы с использованием данных сетей [4].

Постановка задачи. Сравнить основные подходы для решения задачи распознавания лиц и выбрать наилучший тип нейронной сети для распознавания не только по изображениям, но и в режиме реального времени.

Основная часть. В последнее время широкое распространение получила технология информационно-поисковых систем распознавания лица с целью

идентификации личности. Задача распознавания лиц актуальна как в области интеллектуальных сред, так и в системах безопасности. Решение данной задачи имеет большое практическое применение. Подсистемы идентификации личности с использованием технологии распознавания лиц могут быть использованы в автоматизированных системах безопасности, например, на государственных пунктах пропуска, в крупных аэропортах, различных общественных местах, с целью идентификации разыскиваемых лиц, для идентификации личности в следственной практике и т.д. [4].

Системы идентификации личности по изображению человеческого лица могут применяться в подсистеме выбора из видеоряда, формируемого, например, путем автоматического считывания с видеокамер слежения за окружающей обстановкой, изображений человеческих лиц с последующим использованием этой информации в качестве входной для системы идентификации личности.

Очень часто требуется обрабатывать видеопоток с множеством лиц в реальном времени, что вызывает дополнительные трудности. В реальном времени возникает необходимость либо в быстродействующей модели, либо в больших вычислительных мощностях.

Поскольку задача распознавания лица является актуальной, в настоящий момент существует множество различных подходов к её решению [4].

В процессе исследования рассмотрено обнаружение лиц с помощью:

- каскадных классификаторов Хаара с использованием OpenCV;
- гистограммы направленных градиентов с использованием Dlib;
- сверточных нейронных сетей с использованием Dlib.

Рассмотрены различные средства для разработки и выбраны наилучшие: Python – самый популярный высокогорневый язык программирования с динамической семантикой, OpenCV – библиотека с открытым исходным кодом для компьютерного зрения, Dlib – современный набор инструментов C++, содержащий алгоритмы машинного обучения и инструменты для создания сложного программного обеспечения [4].

Каскадные классификаторы Хаара с использованием OpenCV. Каскадный классификатор (каскад усиленных классификаторов), работающих с хаароподобными функциями, является частным случаем ансамблевого обучения, называемого повышением. Обычно он опирается на классификаторы Adaboost и другие модели, такие как Real Adaboost, Gentle Adaboost или Logitboost [5].

Каскадные классификаторы обучаются на нескольких сотнях образцов изображений, содержащих объект, который необходимо обнаружить, и на других изображениях, которые не содержат этих объектов.

По существующему алгоритму, называемому системой обнаружения объектов Виолы-Джонса, присутствуют шаги, необходимые для обнаружения лица:

- выбор функций Хаара, функции, полученные из вейвлетов Хаара;
- создание цельного образа;
- Adaboost обучение;
- каскадные классификаторы.

Выбор функций Хаара [5]. Большинству человеческих лиц присущи некоторые общие черты, называемые функциями Хаара:

- темная область вокруг глаз по сравнению с верхней частью щек;
- яркая область переносицы по сравнению с глазами;
- какое-то конкретное расположение глаз, рта, носа и т.д.

Процесс извлечения признаков происходит как показано на рисунке1.

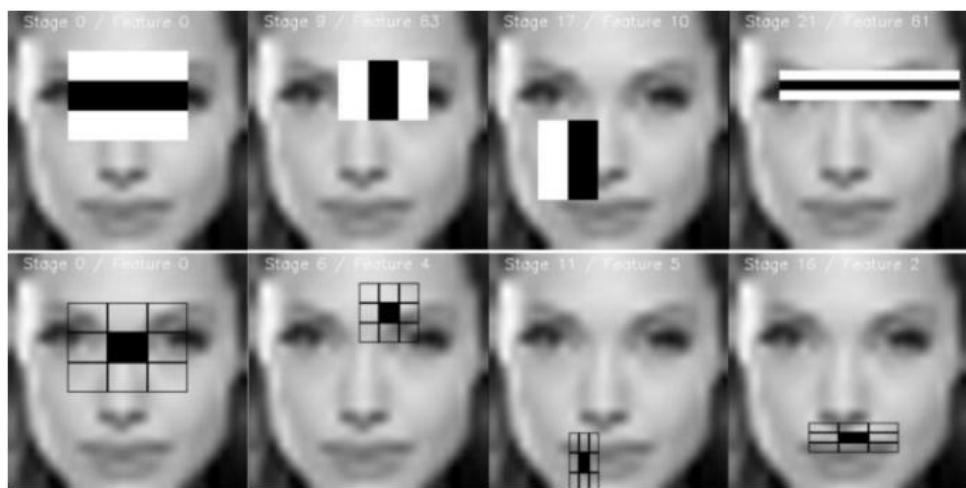


Рис. 1. Характеристики Хаара

В данном случае первая функция измеряет разницу в интенсивности между областью глаз и областью верхней части щек. Значение характеристики вычисляется путем суммирования пикселей в черной области и вычитания пикселей в белой области.

$$RectangleFeature = \sum(pixels_{blackarea}) - \sum(pixels_{whitearea}).$$

Затем применяется прямоугольник, как сверточное ядро, ко всему изображению (рисунок 2). Необходимо применить все возможные размеры и положения каждого ядра. Простые изображения $24 * 24$ обычно дают более 160 000 функций, каждая из которых состоит из суммы / вычитания значений пикселей. Для обнаружения живого лица это невозможно с вычислительной точки зрения. Для ускорения процесса:

- после идентификации хорошей области прямоугольником, окно над совершенно другой областью изображения не запускается (применяется Adaboost).
- используя принцип целостного изображения, вычисляются элементы прямоугольника, что намного быстрее.

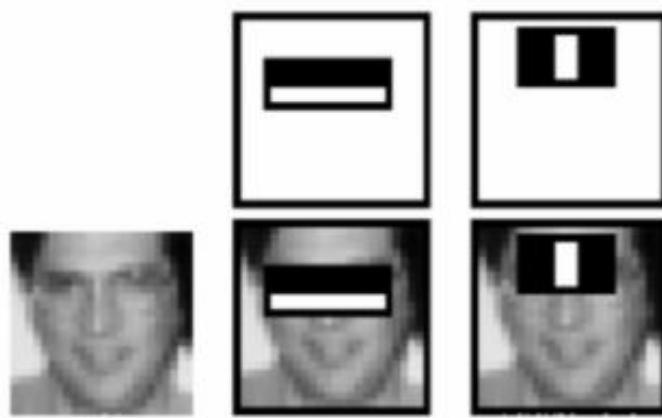


Рис. 2. Применение прямоугольника

Существует несколько типов прямоугольников, которые можно применять для извлечения элементов Хаара (рисунок 3):

- функция двух прямоугольников – разница между суммой пикселей в двух прямоугольных областях, используемая в основном для обнаружения краев (а, б);
- функция трех прямоугольников вычисляет сумму в двух внешних прямоугольниках, вычитаемую из суммы в центральном прямоугольнике, используется в основном для обнаружения линий (с, д);
- функция четырех прямоугольников вычисляет разницу между диагональными парами прямоугольников (е).

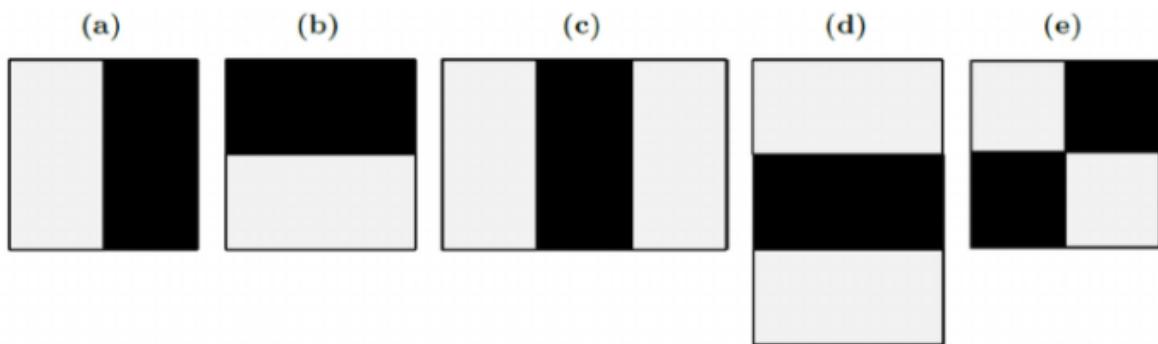


Рис. 3. Типы прямоугольников

Выбранные функции применяются к набору обучающих изображений с использованием классификации Adaboost, которая объединяет набор слабых классификаторов для создания точной модели ансамбля. С 200 функциями (вместо 160 000 изначально) достигается точность 95%.

В связи с тем, что вычисление характеристик прямоугольника в стиле сверточного ядра может быть очень долгим, авторы Виола и Джонс предложили промежуточное представление изображения: целостное изображение. Роль интегрального изображения состоит в том, чтобы позволить легко вычислить любую прямоугольную сумму, используя только четыре значения [5].

Допустим, необходимо определить характеристики прямоугольника в данном пикселе с координатами (x, y). Затем интегральное изображение пикселя в сумме пикселей выше и слева от данного пикселя.

$$ii(x, y) = \sum_{x' \leq x, y' \leq y} i(x', y'),$$

где $ii(x, y)$ – интегральное изображение, а $i(x, y)$ – исходное изображение.

Когда вычисляется все целостное изображение, существует форма повторения, которая требует только одного прохода по исходному изображению.

$$s(x, y) = s(x, y-1) + i(x, y);$$

$$ii(x, y) = ii(x-1, y) + s(x, y),$$

где $s(x, y)$ – совокупная сумма строк, $s(x-1) = 0$, $ii(-1, y) = 0$.

Рассматривается область D, показанная на рисунке 4, для которой необходимо оценить сумму пикселей. Определяются еще 3 области: A, B и C:

- Значение интегрального изображения в точке 1 представляет собой сумму пикселей в прямоугольнике A.

- Значение в точке 2 = A + B.
- Значение в точке 3 = A + C.
- Значение в точке 4 = A + B + C + D.

Следовательно, сумму пикселей в области D можно просто вычислить как: 4 + 1 – (2 + 3). Таким образом, за один проход вычисляется значение внутри прямоугольника, используя 4 ссылки на массив.

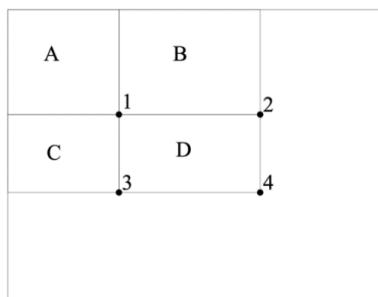


Рис. 4. Области пикселей

Прямоугольники на практике являются довольно простыми функциями, но их достаточно для распознавания лиц. Управляемые фильтры, как правило, более гибкие, когда решаются сложные проблемы.

Каскадный классификатор. Несмотря на эффективность описанного выше процесса, серьезной проблемой является то, что на изображении большая часть изображения – это область без лица. Поскольку в основном сосредотачиваются на областях, которые с наибольшей вероятностью содержат изображение, не имеет смысла рассматривать каждую область изображения. Виола и Джонс добились увеличения скорости обнаружения при одновременном сокращении времени вычислений с помощью каскадных классификаторов, где ключевой идеей является отклонение вложенных окон, которые не содержат лиц. Выявляются только те области, которые содержат лица [5].

Поскольку задача состоит в том, чтобы правильно идентифицировать лицо, необходимо минимизировать количество ложноотрицательных результатов, т.е. подокна, которые содержат лицо и не были идентифицированы как таковые. К каждому подокну применяется серия классификаторов, представляющих собой простые деревья решений: если первый классификатор положительный, переходят ко второму, если второй классификатор положительный, переходят к третьему (рисунок 5).

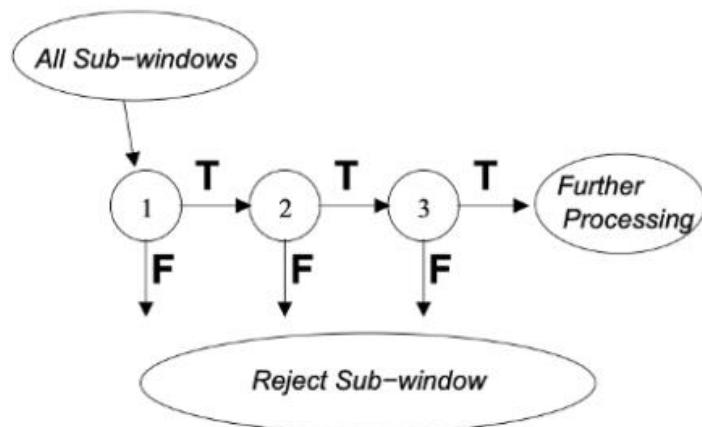


Рис. 5. Дерево решений

Любой отрицательный результат в какой-то момент приводит к отклонению подокна как потенциально содержащему лицо. Первоначальный классификатор исключает большинство отрицательных примеров при низких вычислительных затратах, а следующие классификаторы исключают дополнительные отрицательные примеры, но требуют больших вычислительных усилий [5].

Классификаторы обучаются с помощью AdaBoost и регулируют порог, чтобы минимизировать ложную частоту. При обучении такой модели используются следующие переменные:

- количество ступеней классификатора;
- количество функций на каждом этапе;
- порог каждого этапа.

В OpenCV вся эта модель уже предварительно обучена для распознавания лиц. Следующим шагом надо просто найти предварительно натренированные веса. Используются предварительно обученные модели по умолчанию для обнаружения лица, глаз и рта. После идентификации объявляются классификаторы Cascade и обнаруживается лицо на изображении. Для этого необходимо начать с загрузки тестового изображения (рисунок 6):

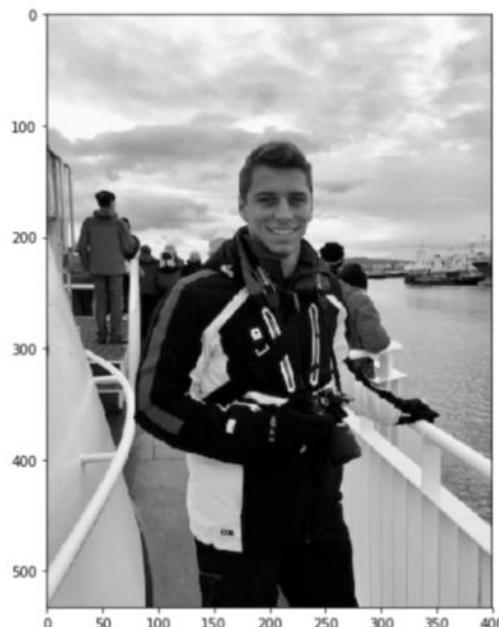


Рис. 6. Тестовое изображение

Затем обнаруживается лицо и добавляется вокруг него прямоугольник при помощи функции detectMultiScale.

Наиболее распространенные параметры detectMultiScale функции:

- scaleFactor: параметр, определяющий, насколько уменьшается размер изображения при каждом масштабе изображения.
- minNeighbors: параметр, определяющий, сколько соседей должен иметь каждый прямоугольник – кандидат, чтобы сохранить его.
- minSize: минимально возможный размер объекта, объекты меньшего размера игнорируются.
- maxSize: максимально возможный размер объекта, объекты большего размера игнорируются.

Вывод результата на экран (рисунок 7):

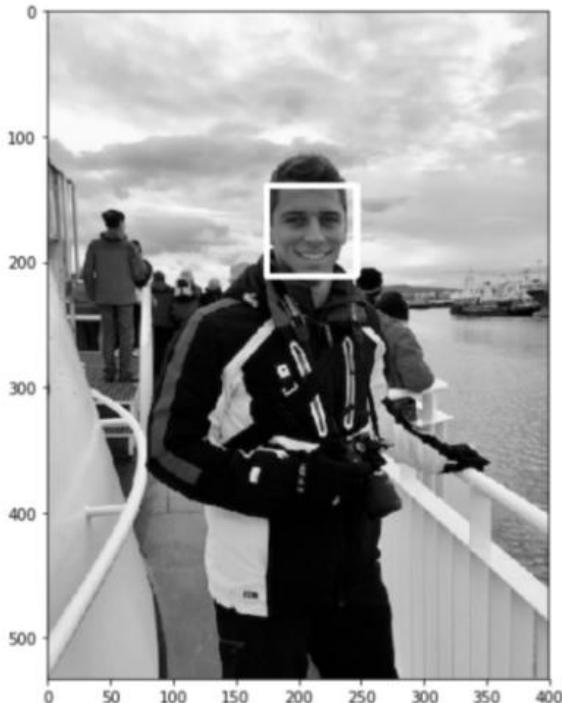


Рис. 7. Результат работы

Гистограмма направленных градиентов (HOG) в Dlib. Вторая по популярности реализация для распознавания лиц предлагается Dlib и использует концепцию, называемую гистограммой направленных градиентов (HOG), предложенную Далалом и Триггсом [6].

Основная идея HOG – извлечение функции в вектор и передача его в алгоритм классификации, такой как, например, машина опорных векторов, которая будет оценивать, присутствует ли лицо (или любой объект, который обучается распознавать) в области или нет.

Извлеченные признаки представляют собой распределение (гистограммы) направлений градиентов (направленных градиентов) изображения. Градиенты обычно большие по краям и углам и позволяют обнаруживать эти области [6].

Изначально процесс был реализован для обнаружения человеческого тела. Цепочка обнаружения показана на рисунке 8:



Рис. 8. Процесс обнаружения

Прежде всего, входные изображения должны иметь одинаковый размер (кадрировать и масштабировать изображения). Применяемые патчи требуют соотношения сторон 1:2, поэтому размеры входных изображений могут быть, например, 64x128 или, 100x200.

Первый шаг – вычислить горизонтальный и вертикальный градиенты изображения, применив следующие ядра, как показано на рисунке 9.

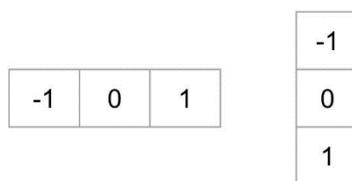


Рис. 9. Ядра свертки

Градиент изображения обычно удаляет несущественную информацию. Градиент изображения, который рассматривался выше, можно найти и использовать при помощи Python. OpenCV предоставляет три типа градиентных фильтров или фильтров верхних частот: Собела, Шарра и Лапласиана. Для достижения такого результата использовался фильтр Собел.

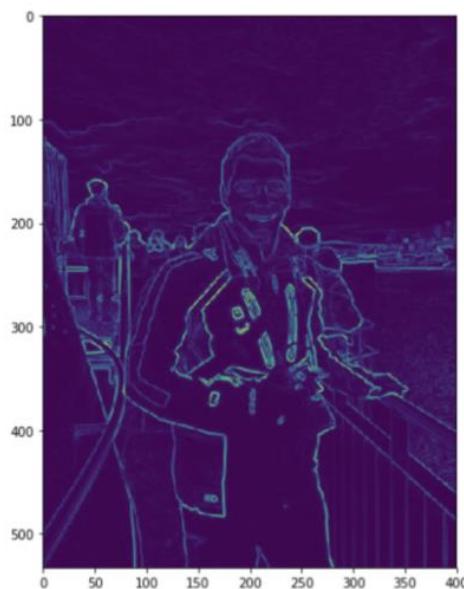


Рис. 10. Применение градиента

Изображение заранее не было обработано. Изображение делится на ячейки 8x8, чтобы обеспечить компактное представление и сделать HOG более устойчивым к шумам. Затем вычисляется HOG для каждой из этих ячеек.

Чтобы оценить направление градиента внутри области, просто строится гистограмма среди 64 значений направлений градиента (8x8) и их величины (еще 64 значения) внутри каждой области. Категории гистограммы соответствуют углам градиента от 0 до 180°. Всего существует 9 категорий с шагом 20° начиная с 0.

Код, описанный ранее, дал понимание о направлении градиента и его величине.

Когда строится HOG, есть 3 подслучаи, которые показаны на рисунках 11 и 12:

- угол меньше 160° (рис. 11) и не находится посередине между 2 классами. В данном случае угол будет добавлен в правую категорию HOG.
- угол меньше 160° (рис. 11) и точно находится между 2 классами. В данном случае рассматривается равный вклад в 2 ближайших класса и разбивается величина на 2.
- угол больше 160° (рис. 12). В данном случае считается, что пиксель вносит пропорциональный вклад в 160° и 0°.

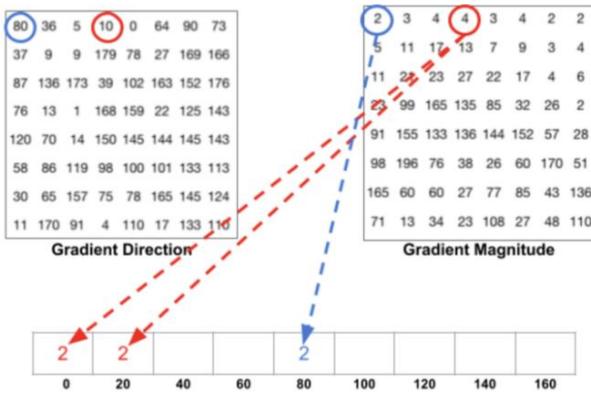


Рис. 11. Первый и второй случай

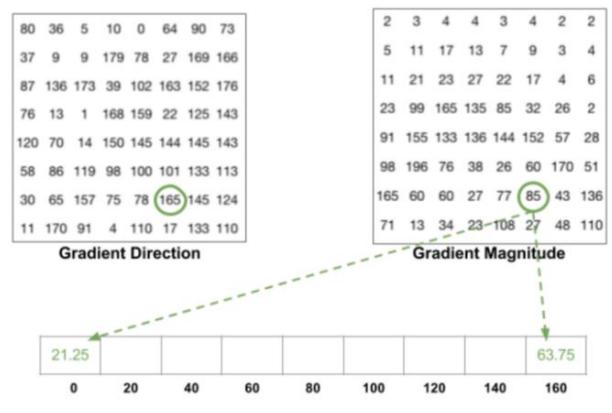


Рис. 12. Третий случай

Нормализовать изображение и сделать его инвариантным к освещению возможно, применив блок 16×16 . Это достигается путем деления каждого значения HOG размером 8×8 на L2-норму HOG блока 16×16 , который его содержит и фактически является простым вектором длины $9 \times 4 = 36$.

Далее все векторы размером 36×1 объединяются в большой вектор, после чего получается вектор признаков, на котором можно обучить программный классификатор SVM ($C = 0,01$).

Реализовав поиск лица, получен результат работы на рисунке 13:

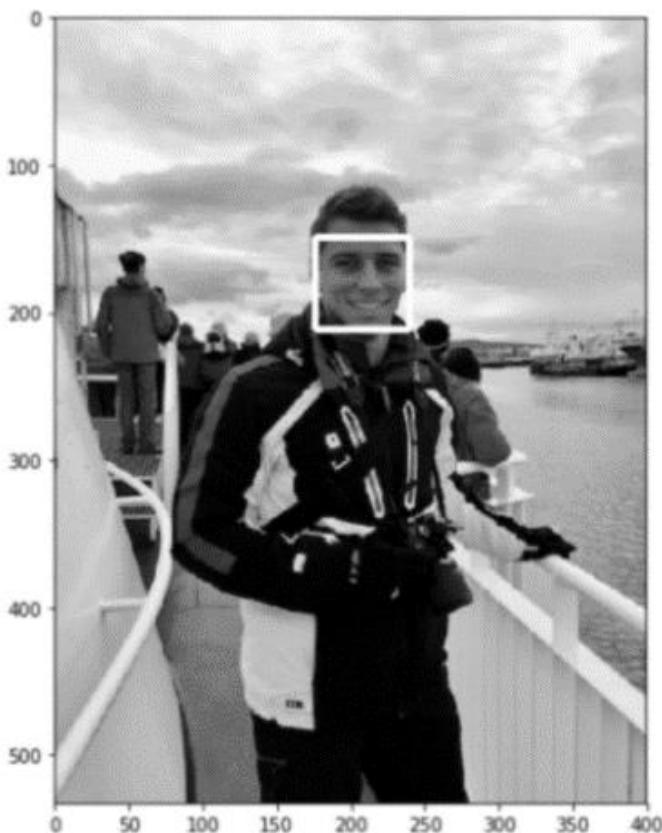


Рис. 13. Результат работы

Сверточная нейронная сеть в Dlib. Этот метод основан на сверточных нейронных сетях (CNN). Он также реализует документ об обнаружении объектов с максимальным запасом (MMOD) для улучшения результатов.

Сверточная нейронная сеть (CNN) – это нейронная сеть с прямой связью, которая в основном используется для компьютерного зрения. Она производит автоматизированную предварительную обработку изображений.

CNN – это специальные типы нейронных сетей для обработки данных с сеточной топологией. Архитектура CNN напоминает организацию биологических процессов зрительной коры головного мозга животных [7].

В предыдущих подходах большая часть работы заключалась в выборе фильтров для создания функций, чтобы извлечь как можно больше информации из изображения. Развитие глубокого обучения и больших вычислительных мощностей позволяет автоматизировать эту работу. Название CNN связано с тем, что происходит сворачивание исходного изображения на входе с помощью набора фильтров. Параметрами для выбора остаются количество применяемых фильтров и размеры фильтров. Размер фильтра называется размером ядра. Длина шага – это количество пикселей, на которое смещается этот фильтр. Типичные значения шага находятся между 2 и 5 (рисунок 14):

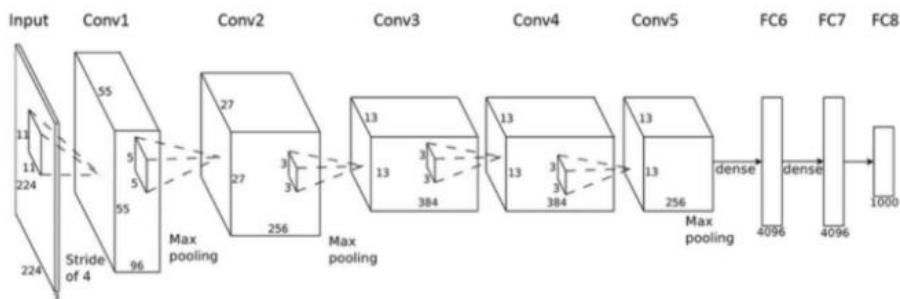


Рис. 14. Сверточная нейронная сеть

Выходные данные CNN в этом конкретном случае представляют собой двоичную классификацию, которая принимает значение 1, если есть лицо, и 0, если нет.

Некоторые элементы могут меняться в реализации, но принцип остается один и тот же. Первый шаг – необходимо скачать предварительно подготовленную модель, переместить веса в папку и определить dnnFaceDetector. Результат обнаружения лица показан на рисунке 15.

Выводы. В настоящей статье рассмотрены базовые принципы работы нейронной сети на Python с использованием различных алгоритмов распознавания лиц человека. Оценив рассмотренные выше методы, можно определить два важных показателя: время вычисления и точность.

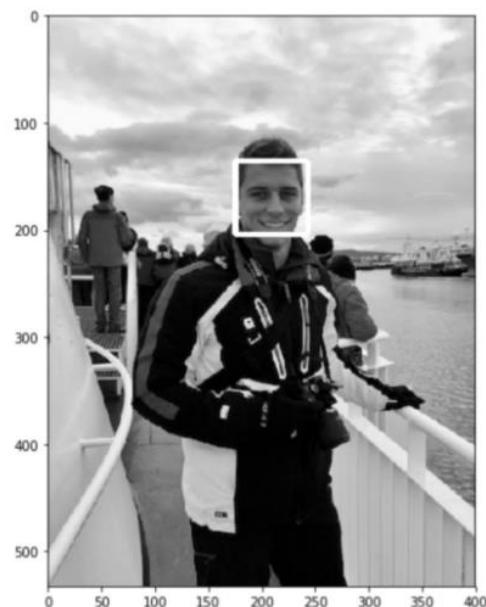


Рис. 15. Результат работы

С точки зрения скорости, HoG является самым быстрым алгоритмом, затем классификатор HaarCascade и CNN. Однако CNN в Dlib, как правило, являются наиболее точными алгоритмами. HoG работает хорошо, однако у него есть некоторые проблемы с распознаванием маленьких лиц. Классификаторы HaarCascade в целом работают примерно так же хорошо, как и HoG.

Стоит отметить, что использование нейронных сетей при разработке систем распознавания позволяет ускорить процесс обработки данных, структурировать плохо формализованные данные, оценить адекватность среды, в которую помещена информационная модель нейронной сети.

В результате проведенного сравнительного анализа, выявленных соответствующих достоинств и недостатков, выбрана информационная модель на основе сверточных нейронных сетей с использованием Dlib, которая содержит алгоритмы машинного обучения и различные инструменты для работы с изображениями лиц. Данная модель имеет гораздо меньшее количество настраиваемых весов, так как одно ядро весов используется целиком для всего изображения. Так же она подходит по внутренней структуре и математическому описанию и предусматривает разные подходы к решению задачи с получением точных результатов. Самым популярным высокоуровневым языком программирования с динамической семантикой в наше время является Python, поэтому он выбран для реализации поставленных задач. Выбран достаточно известный и мощный фреймворк для глубокого машинного обучения Tensorflow.

Таким образом, определены перспективные программные средства для определения лица человека, используя для обучения большие наборы данных, и в режиме реального времени, что является более сложной задачей, так как потребует применения более мощных инструментов для разработки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фатхи В. А. Распознавание эмоций с помощью нейронных сетей / В. А. Фатхи, В. Г. Мокно. – Текст : электронный // Современные научные исследования: актуальные вопросы, достижения и инновации : сборник статей VI Международной научно-практической конференции. – Пенза : Наука и Просвещение, 2019. – С. 45–47. – URL: <https://naukaip.ru/wp-content/uploads/2019/01/MK-469-Сборник.pdf#1> (дата обращения : 10.09.2020).
2. Хайкин С. Нейронные сети. Полный курс / С. Хайкин. – Второе изд. – Москва [и др.] : Вильямс, 2008. – 1104 с.
3. Минский М. Персептроны / М. Минский, С. Пейпарт. – Москва : Мир. 1971. – 260 с.
4. Пакулич Д. В. Распознавание возраста по изображению лица с использованием свёрточных нейронных сетей / Д. В. Пакулич, С. А. Якимов, С. А. Алямкин // Автометрия. – 2019. – № 3. – С. 52–61.
5. Работа каскада Хаара в OpenCV в картинках: теория и практика. – Текст: электронный. // Habr [сайт]. – URL: <https://habr.com/ru/company/recognitor/blog/228195/> (дата обращения: 05.10.2020).
6. Обучение машины — забавная штука: современное распознавание лиц с глубоким обучением. – Текст: электронный. // Habr [сайт]. URL: <https://habr.com/ru/post/306568/> (дата обращения: 27.10.2020).– Текст: электронный.
7. Facial Recognition Using Deep Learning. – Текст: электронный. // Towardsdatascience [сайт]. – URL: <https://towardsdatascience.com/facial-recognition-using-deep-learning-a74e9059a150> (дата обращения: 15.11.2020).– Текст: электронный.

Поступила в редакцию 30.11.2020 г.

FACIAL RECOGNITION ON IMAGES USING NEURAL NETWORKS

Bilenko A.Iu., Nestrugina E.S.

In this paper, the basic principles of a neural network on Python using various algorithms for face recognition are considered, appropriate approaches are implemented, an algorithm is selected, and software development tools are defined.

Keywords: model; kernel; cascade qualifiers; Python; Dlib; OpenCV; HOG; CNN.

Биленко Андрей Юрьевич

магистрант кафедры компьютерных технологий
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.

E-mail: andrysik1997@gmail.com

Bilenko Andrei Iurevich

Master student at Department Computer Technologies
of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

Нестругина Елена Сергеевна

кандидат технических наук, доцент кафедры
компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий
национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.

E-mail: e.nestrugina@donnu.ru

Nestrugina Elena Sergeevna

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor
at Department Computer Technologies of Donetsk
National University,
DPR, Donetsk.

ОБНАРУЖЕНИЕ И РАСПОЗНАВАНИЕ НЕОРДИНАРНОГО ТЕКСТА ИЗ ВИДЕОКАДРОВ

© 2021 *Мухамадиева К.Б.*

Текстовый контент, появляющийся в видео, представляет собой интересный индекс для семантического поиска видео (из архивов), генерации предупреждений (живые потоки), а также для приложений высокого уровня, таких как анализ мнений и обобщение контента. Ключевые компоненты таких систем требуют обнаружения и распознавания текстового контента, что также является предметом исследования. В этой статье представлена комплексная структура для обнаружения и распознавания текстового контента в видеокадрах. В частности, ориентируется на неординарные шрифты, например надпись арабского языка (в статье такой тип мы назвали курсивная надпись). Обнаружение текстовых областей в видеокадрах осуществляется путем тонкой настройки детекторов объектов на основе глубоких нейронных сетей для конкретного случая обнаружения текста. Скрипт обнаруженного текстового контента идентифицируется с помощью сверточных нейронных сетей (CNN), а для распознавания комбинация CNN и сетей долгой краткосрочной памяти (LSTM).

Ключевые слова: распознавание текста, сверточная нейронная сеть (CNN), долгая краткосрочная память (LSTM), рекуррентная нейронная сеть RNN, машинное обучение, Tesseract.

Введение. В последние годы значительно увеличился объем цифровых мультимедийных данных, особенно видеоконтента, как в виде видеоархивов, так и в виде прямых трансляций. По статистике каждую минуту на YouTube загружается 300 часов видео. При таких огромных коллекциях данных существует потребность в эффективных методах поиска, позволяющих пользователям извлекать желаемый контент. Традиционно, видео в основном хранятся с назначенными пользователем аннотациями или ключевыми словами, которые называются тегами. Когда контент должен быть найден, ключевое слово, указанное в качестве запроса, сопоставляется с этими тегами для получения соответствующего контента. Назначенные теги, естественно, не могут охватывать богатый видеоконтент, приводящий к ограниченному поиску. Лучшая и более эффективная стратегия - это поиск по фактическому контенту, а не просто сопоставление тегов, т. е. поиск на основе контента видео. Системы CBVR исследовались и разрабатывались в течение длительного времени и позволяют более разумно получать желаемый контент. Термин «контент» может относиться к визуальному контенту (например, объекты или лица на видео), аудиоконтенту (например, произносимым ключевым словам) или текстовому контенту (бегущей строке новостей, названиям привязок и т.д.). Среди них основное внимание в исследовании уделяется текстовому содержанию. В частности, на интеллектуальную поисковую систему, которая использует текстовое содержимое видео в качестве индекса. Текстовый контент в видео можно разделить на два основных класса: текст сцены и текст подписи. Текст сцены захватывается камерой во время процесса видеозаписи и не всегда может коррелировать с контентом. Примеры текста сцены включают рекламные баннеры, вывески и текст на футбольке. Текст сцены обычно используется в таких приложениях, как навигация роботов и системы помощи для слабовидящих. С другой стороны, на видео накладывается искусственный текст или текст подписи, и типичными примерами являются тикеры новостей, титры фильмов и т.д. Текст подписи обычно коррелирует с видеоконтентом и в основном применяется

для семантического поиска видео. Ключевые компоненты системы индексирования и поиска на основе текстового контента включают обнаружение текстовых областей, извлечение текста (сегментация из фона), идентификацию сценария (для видео с несколькими сценариями) и, наконец, распознавание текста (распознавание текста видео). Обнаружение текста может осуществляться с использованием неконтролируемого [1-4], контролируемого [8-10] или гибридного [12, 13] подхода. Неконтролируемое обнаружение текста основывается на методах анализа изображений для различения текстовых и нетекстовых областей. С другой стороны, контролируемые методы включают обучение алгоритма на примерах текстовых и нетекстовых областей, чтобы различать их. В некоторых случаях также используется комбинация этих двух методов, когда потенциальные текстовые области, идентифицированные неконтролируемыми методами, проверяются с помощью контролируемого подхода.

Как только текст обнаружен, его можно передать в механизм распознавания. В случае видео, которое включает текст в нескольких сценариях, требуется дополнительный модуль для идентификации сценария, чтобы каждый тип текста можно было распознать с помощью соответствующего OCR. Хотя существуют зрелые системы распознавания текста, написанного латинскими буквами (ABBYY Fine Reader и Tesseract и т.д.), Распознавание рукописных шрифтов остаётся сложной задачей. Более того, в отличие от изображений документов, которые сканируются с высоким разрешением, видеотекст в основном имеет низкое разрешение и может появляться на сложном фоне, что затрудняет его распознавание.

В этой статье представлена комплексная структура для обнаружения и распознавания видеотекста в среде с несколькими сценариями. Ключевые моменты этого исследования изложены ниже.

- Разработка исчерпывающего набора данных видеокадров с достоверной информацией, поддерживающей оценку задач обнаружения и распознавания.
- Исследование новейших детекторов объектов на основе глубокого обучения, их настройка на обнаружение текстового контента.
- Идентификация сценария видеотекста с помощью сверточных нейронных сетей (CNN).
- Распознавание определённого видеотекста с использованием комбинации CNN и LSTM.

Обнаружение и распознавание текстового контента в видео, изображениях, документах и естественных сценах исследуется более четырёх десятилетий. С годами эта область постепенно развивалась, начиная с тривиальных систем, распознающих отдельные цифры и символы, до сложных сквозных систем, способных читать текст в естественных сценах.

Обнаружение текста. Обнаружение текста относится к локализации текстового содержимого в изображениях. Предлагаемые методы обнаружения текста обычно подразделяются на обучение без учителя и с учителем. В то время как неконтролируемые методы в основном полагаются на методы анализа изображений для сегментации текста от фона, контролируемые методы включают алгоритм обучения для различения текстовых и нетекстовых областей.

К методам неконтролируемого обнаружения текста относятся методы на основе границ, которые используют высокий контраст между текстом и его фоном; методы на основе связанных компонентов, которые в основном полагаются на цвет / интенсивность текстовых пикселей и методы на основе текстуры, которые рассматривают текстовое содержимое в изображении как уникальную текстуру,

которая отличается от нетекстовых областей. Методы на основе текстуры остаются популярным выбором исследователей, а функции, основанные на фильтрах Габора, вейвлетах, кривых, локальных бинарных паттернах (LBP), дискретное косинусное преобразование (DCT), гистограммы ориентированных градиентов (HoG) и преобразование Фурье исследовались в литературе. Другая общая категория методов включает в себя методы на основе цвета, которые во многих аспектах аналогичны методам на основе компонентов и используют информацию о цвете текстовых пикселей, чтобы отличать их от нетекстовых областей.

Контролируемые подходы к обнаружению текстового контента обычно используют современные алгоритмы обучения, которые обучаются на примерах текстовых и нетекстовых блоков либо с использованием значений пикселей, либо путем предварительного извлечения соответствующих функций. Классификаторы, такие как Naïve Bayes, машина опорных векторов (SVM), искусственная нейронная сеть и глубокие нейронные сети, исследовались на протяжении многих лет.

В последние годы решения, основанные на глубоком обучении, широко применялись для решения множества задач классификации и превзошли традиционные методы. Важным событием, способствовавшим нынешней известности глубокого обучения, стало применение сверточных нейронных сетей (CNN) Крижевским и др. на конкурсе ImageNet Large Scale Visual Recognition, что значительно снизило количество ошибок. С тех пор CNN считаются самыми современными экстракторами и классификаторами признаков и применялись для решения ряда задач распознавания. В то время как традиционные CNN обычно используются для классификации объектов, сверточные сети на основе регионов (R-CNN) и их дальнейшие усовершенствования Fast R-CNN и быстрые R-CNN представляют собой обычные детекторы объектов. В дополнение к различным вариантам R-CNN, в последние годы был предложен ряд новых архитектур для обнаружения объектов в реальном времени. Наиболее заметными из них являются YOLO (You Only Look Once) и SSD (Single Shot Detector). Эти детекторы объектов могут быть настроены с использованием текстовых данных для использования в качестве детекторов текста и дадут более точные результаты.

Среди методов, основанных на глубоком обучении, адаптированных для обнаружения текста, использовали скользящие окна с CNN для обнаружения текстовых областей в изображениях сцен с низким разрешением. Аналогичным образом, полностью сверточные сети исследуются для обнаружения текстовых областей в [5], и метод оценивается на различных наборах данных. Аналогичная работа представлена Gupta et al. [4], где CNN обучаются с использованием синтетических данных для обнаружения текста в различных масштабах из естественных изображений. Другой метод, названный «SegLink», предложен в [6, 7], который основан на разложении текста на сегменты (ориентированные блоки слов или строк) и ссылки (соединяющие два смежных сегмента). Сегменты и ссылки обнаруживаются с помощью полностью сверточных сетей в нескольких масштабах и объединяются вместе для обнаружения всей текстовой строки. В [10] сообщается о методе вертикальной привязки, который предсказывает текстовые и нетекстовые оценки областей фиксированного размера и сообщает о высокой эффективности обнаружения на наборах данных. В другой заметной работе Wang et al. [11] представляют структуру на основе условного случайного поля (CRF) для обнаружения текста в изображениях сцен. Авторы определяют функцию стоимости, учитывая цвет, обводку, форму и пространственные особенности с помощью CNN для эффективного обнаружения текстовых областей.

Среди других систем, основанных на сквозных обучаемых глубоких нейронных сетях, Liao et al. [9] представляют систему под названием «TextBoxes», которая обнаруживает текст в естественных изображениях в одной сети прямого прохода. Позже этот метод был расширен до «TextBoxes ++» и был опробован в четырех общедоступных базах данных, превзойдя современные. Heet al. [19] улучшил сверточный слой CNN для обнаружения текста с произвольной ориентацией.

Подводя итог, можно сделать вывод, что проблема обнаружения текста в последние годы в основном преобладала из-за применения различных архитектур глубокого обучения. Доступность наборов контрольных данных также способствовала быстрому развитию в этой области. Среди открытых проблем остаётся сложной задачей разработка универсального детектора текста, который мог бы работать в среде с несколькими скриптами.

Распознавание скрипта. Во многих случаях видео может содержать текстовое содержание более чем в одном сценарии. Эти сценарии должны быть идентифицированы до передачи текстовых областей в соответствующие механизмы OCR для распознавания. Распознавание скриптов изучалось исследователями для текста в видеоизображениях, а также в печатных и рукописных документах [12, 13]. Распознавание сценария в видеотексте, естественно, намного сложнее, чем в печатных или рукописных документах из-за низкого разрешения текста и в некоторых случаях сложного фона [14-16]. От простых методов, основанных на сопоставлении шаблонов [18], до сложных структурных [17] и статистических [18], в литературе описан ряд методов. Среди различных функций, используемых для характеристики скрипта, известны особенности, основанные на текстуре, которые очень эффективны для определения высоких показателей классификации. Текстурные меры, такие как фильтры Габора, LBP и матрица совместной встречаемости уровней серого (GLCM), были исследованы в ряде исследований. Извлеченные признаки обычно передаются традиционным классификаторам, чтобы различать изучаемые классы скриптов. Среди хорошо известных методов Zhao et al. использовал «Пространственные градиентные функции (SGF)» для описания шрифта текста с использованием набора данных из шести различных скриптов. Похожее исследование с «Градиентной угловой функцией (GAF)», где авторы представили метод «Возможный текстовый кандидат (PTC)» для изучения курсивности текста с помощью операций гистограммы. Недавний подробный обзор идентификации скриптов можно найти в [9]. Конкурс по этой проблеме также был организован в связи с ICDAR 2015. В конкурсе участвовали четыре сложных задания на 10 разных языках, и среди представленных систем победителем конкурса была объявлена компания Google Inc.

Среди недавних вкладов в идентификацию скриптов объединяют CNN и RNN в единую сквозную обучаемую сеть. Этот метод оценивается на нескольких наборах данных и сообщает о высоких показателях идентификации. Эксперименты с набором данных CVS1 сообщают, что уровень идентификации превышает 96%. Gomez et al. использовали наивный байесовский классификатор со сверточными функциями для идентификации сценария в неограниченном тексте сцены. Позднее работа была расширена для применения классификации на основе патчей с использованием CNN. В других недавних работах переносное обучение и точная настройка с AlexNet и VGG-16 исследуются для идентификации скрипта. Bhunia et al. предлагает структуру CNN-LSTM для извлечения как локальных, так и глобальных функций. Характеристики оцениваются динамически, и метод оценивается на четырех общедоступных наборах данных, сообщающих о высоких показателях идентификации.

Подводя итог, как и многие другие проблемы, в последние годы методы, основанные на глубоком обучении, были доминирующей техникой для идентификации сценариев. В то время как первоначальные исследования в основном были сосредоточены на изображениях документов, идентификация текста, появляющегося в видеороликах, на протяжении многих лет является привлекательной темой для исследований. Несмотря на то, что на сцене появилось много сложных систем, низкое разрешение видеоизображений и высокая схожесть между различными сценариями делают эту область активной исследовательской областью.

Распознавание текста. Распознавание текста, обычно называемое оптическим распознаванием символов (OCR), является одной из самых классических задач распознавания образов, которая исследовалась на протяжении десятилетий. Системы распознавания были исследованы как для печатных, так и для рукописных документов (отсканированных или созданных с помощью камеры), текста в естественных изображениях сцены и текста подписи, появляющегося в видео. Современные системы распознавания (например, Google Tesseract, Abbyy FineReader и т.д.), Как известно, сообщают о почти 100% -ном уровне распознавания текстового контента в ряде сценариев. Однако распознавание текста в курсиве по-прежнему остается сложной задачей, особенно для текста, появляющегося в видео.

С точки зрения OCR документов, исследования можно разделить на два основных класса: аналитические (символьные) и целостные (основанные на словах) методы. Аналитические методы, которые работают либо с отдельными символами, либо сначала разбивают текст на символы. Для распознавания текста в изображениях документов был представлен ряд методов как на уровне символов (аналитический), так и на уровне слов (целостный). Обычно такие методы, как модели на основе графов, байесовские классификаторы и скрытые марковские модели и т. д. были исследованы для распознавания текста на уровне символов. Точно так же был исследован ряд функций и классификаторов для распознавания на уровне слов. В ряде недавних исследований также использовались основанные на глубоком обучении решения для аналитического, а также целостного распознавания текста.

В отличие от изображений документов, распознавание текста из изображений сцены предлагает более сложный сценарий из-за разных положений камеры при захвате текста, неравномерного освещения и сложного фона. Среди функций, созданных вручную, популярные дескрипторы, исследуемые для обнаружения текста естественной сцены, включают преобразование инвариантного элемента масштаба (SIFT), штриховку и гистограмму ориентированных градиентов (HOG) и т.д. Подобным образом искусственная нейронная сеть и SVM обычно использовались в качестве классификаторов. Помимо распознавания, методы, основанные на распознавании слов, также исследовались на текстовых изображениях сцены. Распознавание текста на дорожных знаках также представляет собой важную подзадачу в рамках распознавания текста сцены и изучается в ряде исследований.

Последние тенденции в распознавания текста была комбинацией сверточных и рецидивирующих нейронных сетей, где CNN часть служит для отображения исходных текстовых изображений эффективных художественных представлений в то время как часть рецидивирующий использует эту функцию последовательности для предсказания транскрипции. В дополнение к стандартной C-RNN в сетевых архитектурах был предложен ряд усовершенствований для решения проблем, связанных с текстом сцены.

С точки зрения распознавания текста подписи ключевой проблемой, как обсуждалось ранее, является низкое разрешение текста. В ряде исследований эта

проблема рассматривается как этап предварительной обработки и объединение информации из нескольких кадров для создания изображения с высоким разрешением, которое затем передать в распознаватель. Распознавание текста подписи в основном использовалось для приложений индексирования и поиска.

В контексте скорописного текста применяется целостная техника, основанная на многомерных LSTM для распознавания курсивного видеотекста. Аналогично, можно применить для распознавания неординарного текста в видеокадрах используется комбинация CNN и LSTM.

Большинство разработанных систем в основном ориентированы на оцифрованные печатные документы. Как и другие рукописные скрипты, методы распознавания подразделяются на аналитические (без сегментации) и целостные (на основе сегментации). В результате недавно был предложен ряд методов, основанных на неявной сегментации, в которых алгоритм обучения предоставляет с изображениями текстовой строки и соответствующей выходной транскрипцией для изучения различных форм символа, а также точек сегментации [13]. Точно так же в целостных подходах границы слов трудно идентифицировать, поэтому под слова (лигатуры) обычно используются в качестве единиц распознавания в этих методах.

Среди известных холистических подходов, HMM (Hidden Markov models) широко используются для распознавания лигатур. Эти методы обычно используют скользящие окна для извлечения признаков из изображений лигатуры, которые проецируются в квантованное пространство признаков, таким образом представляя каждое изображение лигатуры как последовательность. В некоторых случаях основное тело и точки распознаются отдельно, чтобы уменьшить общее количество уникальных классов, которое может быть очень большим. Методы распознавания, основанные на неявной сегментации, в основном используют различные варианты LSTM с выходным слоем коннекционистской временной классификации (CTC- connectionist temporal classification) для распознавания символов.

Набор данных. Для экспериментального исследования системы набор данных видеокадров фреймы должны быть помечены, чтобы можно было оценить эффективность обнаружения текста, идентификации сценария и распознавания текста. Для каждого кадра сохраняется расположение текстовых областей, информация сценария и транскрипция.

Первый шаг в разработке базы данных - это сбор видео. Все видео записываются с разрешением 900×600 и частотой кадров 25 кадров в секунду. Поскольку последовательные кадры в видео содержат избыточную информацию, необходимо извлечь один кадр каждые две секунды для маркировки. Основная причина извлечения одного кадра каждые 2 секунды состоит в том, чтобы гарантировать, что собранные кадры имеют различное текстовое содержимое. Это позволяет варьировать обучающие и тестовые данные, в отличие от случая, когда последовательность кадров содержит аналогичное текстовое содержимое.

Чтобы облегчить процесс маркировки и стандартизовать достоверные данные, был разработан комплексный инструмент маркировки, который позволяет сохранять местоположение каждой текстовой области во фрейме вместе с ее наземной транскрипцией. Инструмент позволяет загружать кадры в видео и маркировать их один за другим для расположения текста, а также для точной транскрипции. Базовая информация каждого кадра хранится в виде XML-файла и содержит метаданные кадра (сведения о видео и канале) и информацию о текстовых областях в кадре. Для каждого скрипта хранится информация об общем количестве текстовых строк, и для каждой

строки мы сохраняем уникальный идентификатор, тип текста (текст сцены или искусственный текст), расположение текстовой области, внутри кадра, и транскрипция текста.

Методы. В этом разделе представлены подробные сведения о предлагаемой структуре, которая кратко представлена на рис.1.

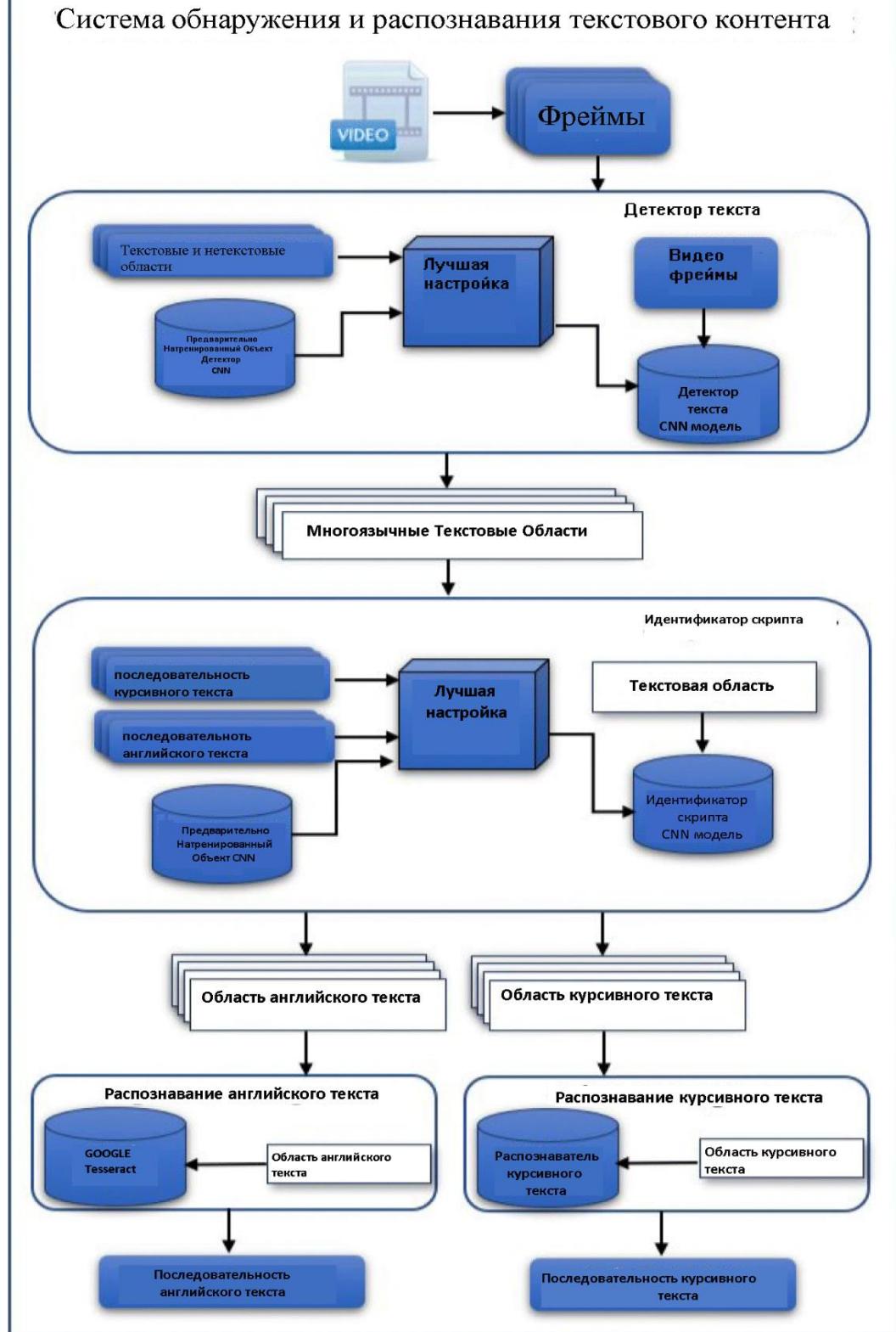


Рис. 1. Обзор предлагаемой структуры

Вся система состоит из трех основных модулей, детектора текста, идентификатора скрипта и распознавателя текста. Помимо этих модулей, на прикладном уровне может быть разработан широкий спектр систем, включая индексацию и поиск, создание предупреждений на основе ключевых слов и обобщение содержимого. Первый модуль, детектор текста, отвечает за идентификацию и локализацию всего текстового содержимого во фрейме. Поскольку текст может быть в нескольких сценариях (в одном кадре), обнаруженные текстовые области передаются в модуль идентификации сценария, который разделяет текстовые строки в зависимости от сценария. Наконец, текст передается в соответствующие механизмы распознавания каждого сценария для преобразования изображений текстовых строк в строки, которые впоследствии могут быть использованы для ряда приложений. Каждый из этих модулей подробно обсуждается ниже.

Обнаружение текста. Первым шагом в предлагаемой структуре является обнаружение потенциальных текстовых областей из извлеченных видеокадров. Для обнаружения текстового контента в заданном кадре мы использовали современные детекторы объектов на основе сверточных нейронных сетей (CNN). Хотя многие детекторы объектов обучаются с использованием тысяч примеров классов и обеспечивают высокую точность обнаружения и распознавания различных объектов, эти детекторы объектов нельзя напрямую применять для идентификации текстовых областей на изображениях. Эти модели должны быть настроены на конкретную проблему выделения текста из нетекстовых областей. Сверточная база этих моделей может быть обучена с нуля или известные предварительно обученные модели (VGG, Inception или ResNet) могут быть точно настроены путем обучения их на текстовых и нетекстовых областях. В работе должны быть исследованы следующие детекторы объектов для локализации текстовых областей. Идея состоит в том, чтобы изучить, какие из них могут быть лучше адаптированы для задачи обнаружения текста:

- Быстрые R-CNN;
- Метод Single Shot Detector (SSD);
- Эффективный и точный конвейер обнаружения текста сцены (EAST).

Быстрые R-CNN [7] - это улучшенная версия своих предшественников R-CNN и Fast R-CNN. быстрые R-CNN объединяет сеть региональных предложений с Fast R-CNN для эффективной локализации и распознавания объектов. Архитектура SSD (Single Shot multibox Detector) была предложена Liu et al. [9] и сообщил о высокой точности обнаружения объектов в стандартных наборах данных, таких как PascalVOC и COCO. Архитектура имеет размер входа $300 \times 300 \times 3$ и основана на модели VGG-16, отбрасывая полностью связанные слои. EAST (эффективный и точный конвейер обнаружения текста сцены) [10] локализует текстовые области в естественных изображениях сцены вместе с геометрией текста. Он может предсказывать как полные текстовые строки, так и отдельные слова. Предсказание геометрической формы текста также является уникальной характеристикой этой модели. В то время как быстрые R-CNN и SSD являются универсальными детекторами объектов, EAST был специально разработан для обнаружения текста на изображениях сцен. В исследовании, однако, не сообщалось о приемлемой производительности обнаружения при непосредственном применении к обнаружению текста подписи на видеоизображениях. Следовательно, в дополнение к быстрые R-CNN и SSD, EAST также был точно настроен для набора данных.

Чтобы исследовать эффективность различных детекторов объектов в конкретной задаче, мы провели обширную серию экспериментов, обучив эти три модели

различным настройкам гиперпараметров. Текстовые области, содержащие текстовые строки двух языках, один из них который имеет языковую платформу участвует в качестве обучающих примеров для этих детекторов. После настройки эффективность обнаружения оценивается с использованием тестового набора изображений. Окончательная отложенная модель принимает видеокадр в качестве входных данных и локализует текстовые области (рис. 2). Как только текст локализован, обнаруженные области передаются в модуль идентификации сценария для распознавания сценария обнаруженного текста.

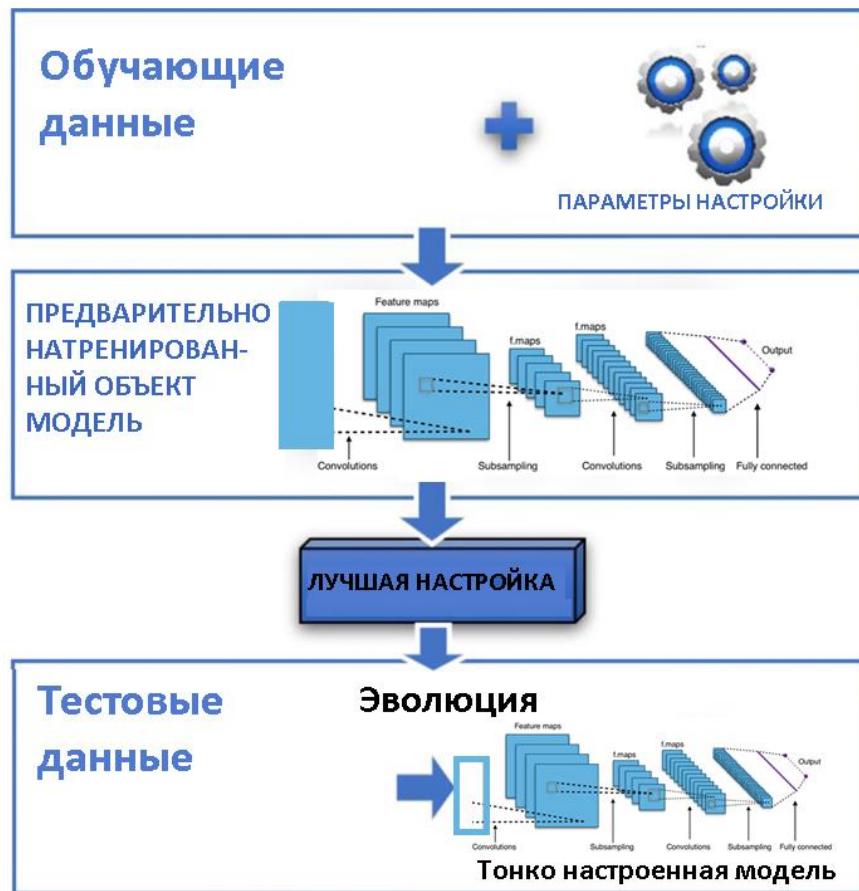


Рис. 2. Обзор тонкой настройки детекторов объектов для текста

Идентификация скрипта. Идентификация сценария принимает текстовые строки в качестве входных данных и идентифицирует сценарий текста. Важно отметить, что при обнаружении текста мы рассматриваем его как проблему двух классов, т.е. различение текста от нетекстовых областей (независимо от сценария). Также можно рассматривать ее как задачу класса $k + 1$, где k представляет количество сценариев ($k = 2$ для задачи). Другими словами, система обнаружения может быть обучена обнаруживать текст в конкретном сценарии, что позволяет избежать необходимости в отдельном модуле идентификации сценария. Однако известно, что текст в нескольких скриптах имеет некоторые общие характеристики (например, края штрихов, выравнивание, плотность краев и т. д.). Следовательно, создание системы для изучения того, что такое текст, а что нет, казалось более естественным подходом, и оно используется в исследовании.

Для идентификации сценария мы используем CNN в рамках классификации (а не для обнаружения). Строки текста на двух языках используются для точной настройки предварительно обученных ConvNets, чтобы различать два класса. После обучения модель может разделять текстовые строки в зависимости от скрипта.

Как только сценарий текстовой строки идентифицирован, он подается в соответствующий механизм распознавания, как обсуждается ниже.

Распознавание текста. Как обсуждалось ранее, мы в первую очередь нацелены на видео каналов новостей, которые содержат курсивный текст вместе с текстом, написанным латинским шрифтом. Системы OCR для текста на английском языке (и других языках, использующих тот же сценарий) достаточно развиты. Следовательно, для распознавания английского текста можно использовать стандартный механизм распознавания текста Google Tesseract.

Google Tesseract. Google Tesseract считается современным механизмом распознавания текста, который обеспечивает высокую точность для многих языков, включая английский. В системе мы использовали Tesseract версии 4.0, недавно выпущенную Google. Версия 4.0 разработана с использованием глубокой нейронной сети, а точнее, в ней используются рекуррентные нейронные сети с архитектурой долговременной краткосрочной памяти. Строки английского текста подаются в механизм распознавания, который возвращает соответствующие текстовые строки.

Для распознавания текста курсивного характера необходимо разработать и обучить архитектуру, которая представляет собой комбинацию сверточной и повторяющейся нейронной сети. Ключевой мотивацией использования CNN является преобразование необработанных значений пикселей в надежные представления функций, в то время как повторяющаяся сеть используется для моделирования проблемы с использованием подхода, основанного на неявной сегментации. Это позволяет напрямую передавать текстовые строки вместе с наземной транскрипцией в модель, и при этом не требуется сегментация или маркировка на уровне лигатуры или символа.

Рекуррентные сети сообщают о значительном улучшении производительности при решении таких проблем, как распознавание речи, почерка и текста подписи, за последние годы. Хотя простые RNN не могут моделировать долгосрочные зависимости во входных последовательностях, обычно используются такие варианты, как сети с долговременной краткосрочной памятью (LSTM). LSTM представляет собой особый тип повторяющейся единицы с тремя воротами: ввод, вывод и забывание. Эти ворота реализованы с использованием сигмоидной функции и регулируют память ячеек LSTM. Также распространено использование двунаправленных LSTM, которые анализируют ввод как в прямом, так и в обратном направлениях и объединяют информацию для лучшего предсказания.

Для извлечения признаков мы разработали семиуровневую сверточную нейронную сеть. Изображения входных текстовых строк предварительно обрабатываются и передаются в ConvNet. Предварительная обработка включает в себя нормализацию высоты, преобразование в двоичную форму и отражение. Переворот осуществляется, поскольку есть такие надписи печатается справа налево, в отличие от западных языков, которые печатаются слева направо. Переворачивание изображения гарантирует, что последовательности символов в транскрипции соответствуют изображению. CNN сопоставляет изображения входных текстовых строк с картой характеристик, которая подается в виде последовательности на повторяющиеся слои. Рекуррентная часть сети реализована с использованием двух уровней двунаправленных

LSTM. LSTM выводит предкадровые прогнозы, которые преобразуются в метки классов с использованием уровня СТС. В заключение, справочная таблица используется для сопоставления меток классов с истинными юникодами и создания выходной транскрипции. Обучение осуществляется сквозным образом с использованием функции потерь СТС.

Обнаружение текста. Обнаружение текста оценивается путем точной настройки различных детекторов объектов. К ним относятся быстрые R-CNN, SSD и EAST (эффективный и точный конвейер обнаружения текста сцены). Текстовые строки в наборе данных используются только в обучающем наборе, а не в тестовом наборе. В оценке рассматриваются три экспериментальных сценария, перечисленных ниже.

- **Сценарий I (SI):** текстовые строки из специально разработанного набора данных используются для обучения моделей.
- **Сценарий-II (S-II):** текстовые строки из набора готовых данных используются для обучения моделей.
- **Сценарий-III (S-III):** текстовые строки в сценарии-I и сценарии-II объединены для обучения моделей.

Три модели обучаются для каждого из сценариев с применением различных настроек гиперпараметров (оптимизированных для обучающего набора). Производительность количественно оценивается с использованием стандартной точности, отзыва и F-меры, где ограничивающие рамки детектора сравниваются с таковыми в наземной истине. Сравнивая производительность трех моделей, можно увидеть, что быстрые R-CNN превосходит две другие модели. Сравнение эффективности обнаружения трех моделей для трех экспериментальных сценариев представлено на рисунке 3.

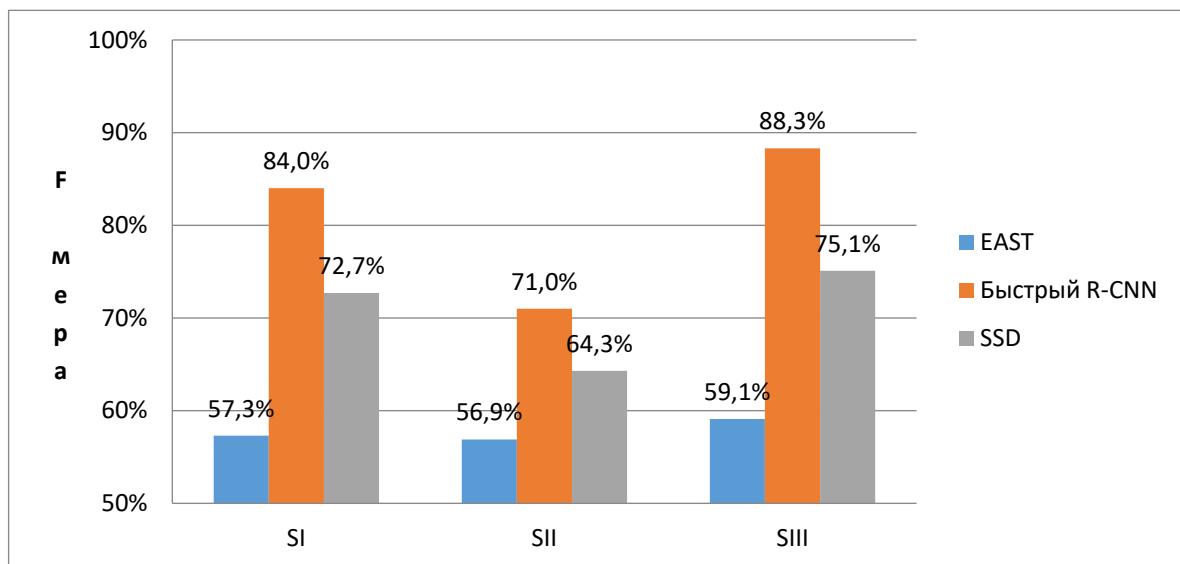


Рис. 3. Сравнение различных моделей по эффективности обнаружения

Сравнивая три экспериментальных сценария, самые низкие F-меры представлены в S-II, что можно объяснить меньшим количеством текстовых строк, в обучающем наборе. Кроме того, обучающая выборка не содержала текстовых строк на английском языке. Производительность обнаружения SI и S-III сравнима с S-III, немного лучше, чем SI, из-за большего количества текстовых строк в обучающем наборе. В целом, самый высокий F-показатель 88,3% сообщается при использовании комбинации двух наборов данных в обучающем наборе.

Видно, что в большинстве случаев детектор способен обнаруживать текстовую область, но локализация не идеальна, т.е. в некоторых случаях ограничивающая рамка больше, чем фактическое содержимое, что приводит к снижению точности.

Чтобы сравнить эффективность метода обнаружения текста с уже опубликованными работами, мы суммируем результаты различных исследований, направленных на обнаружение текста подписи, написанного курсивом. Важно отметить, что, поскольку разные методы оцениваются на разных наборах данных, прямое количественное сравнение может быть не очень значимым. Большинство перечисленных исследований оцениваются на относительно небольших наборах данных (в большинстве случаев ≤ 1000). Moradi et al. и Zayene et al. сообщают о результатах на относительно больших наборах данных с F-мерой 0,89 и 0,84 соответственно. По сравнению с другими исследованиями, мы используем значительно больший набор изображений с F-мерой 0,88, указывающей на надёжность и масштабируемость детектора.

Вывод. В этой статье представлен комплексная структура для обнаружения и распознавания текста в видеокадрах, содержащих текстовые вхождения на двух языках, один из которых имеет курсивный шрифт. Для обнаружения текстовых областей необходимо применить современные детекторы объектов на основе глубокого обучения и настроить их для обнаружения текста в нескольких скриптах. Сценарий обнаруженных текстовых областей идентифицируется с использованием CNN в структуре классификации.

Система будет оптимизирована для работы с прямыми трансляциями в дополнение к архивным видео. Это, в свою очередь, позволит разработать системы генерации предупреждений на основе ключевых слов. Кроме того, есть возможность расширить набор данных и сделать его общедоступным. Исследование также можно расширить, включив в него дополнительные скрипты, интегрировав их соответствующие OCR.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов А. И. Локализация текста на изображениях сложных графических сцен / А. И. Андрианов. – Текст : электронный // Современные проблемы науки и образования. – 2013. – № 3. – URL: <http://www.science-education.ru/ru/article/view?id=9311> (дата обращения: 03.12.2020).
2. Болотова Ю. А. Обзор алгоритмов детектирования текстовых областей на изображениях и видеозаписях / Ю. А. Болотова, В. Г. Спицын, П. М. Осина // Компьютерная оптика. – 2017. – Т. 41, № 3. – С. 441–452.
3. Титов И. О. Выделение контуров изображения движущегося объекта / И. О. Титов, Г. М. Емельянов // Вестник Новгородского государственного университета им. Ярослава Мудрого. – 2010. – № 55. – С. 27–31.
4. Gupta A. Synthetic data for text localisation in natural images / A. Gupta, A. Vedaldi, A. Zisserman // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – Vegas, 2016. – P. 2315–2324.
5. Krizhevsky A. ImageNet classification with deep convolutional neural networks / A. Krizhevsky, I. Sutskever, G. E. Hinton // Advances in Neural Information Processing Systems 25 : 26th Annual Conference on Neural Information Processing Systems 2012 : Proceedings of a meeting held December 3-6, 2012, Lake Tahoe, Nevada, United States. – Nevada, 2013. – P. 1097–1105.
6. Multi-oriented text detection with fully convolutional networks / Z. Zhang, C. Zhang, W. Shen [et al.] // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – Vegas, 2016. – P. 4159–4167.
7. Shi B. Detecting oriented text in natural images by linking segments / B. Shi, X. Bai, S. Belongie // Proceedings of the IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. – Vegas, 2017. – P. 2550–2558.

8. Single shot textSpotter with explicit alignment and attention / T. He, Z. Tian, W. Huang [et al.]. – Текст : электронный // arXiv: 1803.03474v1 [cs.CV] 9 Mar 2018. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/323694374> (дата обращения: 03.12.2020).
9. Textboxes: a fast text detector with a single deep neural network / M. Liao, B. Shi, X. Bai [et al.]. – Текст : электронный // arXiv: 1611.06779v1 [cs.CV] 21 Nov 2016 – URL: <https://www.researchgate.net/publication/310610861> (дата обращения: 03.12.2020).
10. Detecting text in natural image with connectionist text proposal network / Z. Tian, W. Huang, T. He [et al.]. – Текст : электронный // Computer Vision – ECCV 2016 : 14th European Conference, Amsterdam, The Netherlands, October 11–14, 2016 : Proceedings, Part VIII. – P. 56–72. – URL: <https://link.springer.com/book/10.1007%2F978-3-319-46484-8> (дата обращения: 03.12.2020).
11. CRF based text detection for natural scene images using convolutional neural network and context information / Y. Wang, C. Shi, B. Xiao [et al.] // Neurocomputing. – 2018. – Vol. 295. – P. 46–58.
12. Script identification of multi-script documents: a survey / K. Ubul, G. Tursun, A. Aysa [et al.] // IEEE Access. – 2017. – Vol. 5. – P. 6546–6559.
13. Ghosh D. Script recognition – a review // D. Ghosh, T. Dube, A. Shivaprasad // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 2010. – Vol. 32, Is. 12. – P. 2142–2161.
14. Li M. A mixed edge based text detection method by applying image complexity analysis / M. Li, M. Bai // Intelligent Control and Automation (WCICA) : Proceedings of the 10th World Congress on Intelligent Control and Automation – Beijing, 2012. – P. 4809–4814.
15. Multilingual artificial text extraction and script identification from video images / A. Jamil, A. Batool, Z. Malik [et al.] // International Journal of Advanced Computer Science and Applications. – 2016. – Vol. 7, Is. 4. – P. 529–539.
16. Automatic script identification from images using cluster-based templates / J. Hochberg, L. Kerns, P. Kelly, T. Thomas // Document Analysis and Recognition : Proceedings of the Third International Conference, Montreal, QC, Canada, 14-16 Aug. 1995. – Montreal, 1995. – Vol. 1. – P. 378–381.
17. Spitz A. L. Determination of the script and language content of document images / A. L. Spitz. // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1997. – Vol. 19, Is. 3. – 235–245.
18. Pal U. Automatic identification of English, Chinese, Arabic, Devnagari and Bangla script line / U. Pal, B. Chaudhuri // Document Analysis and Recognition : Proceedings. Sixth International Conference (ICDAR 2001), 10-13 September 2001, Seattle, WA, USA. – Seattle, 2001. – P. 790–794.
19. Single shot textspotter with explicit alignment and attention / T. He, Z. Tian, W. Huang [et al.]. – Текст : электронный // arXiv:1803.03474v1 [cs.CV] 9 Mar 2018. – URL: <https://www.researchgate.net/publication/323694374> (дата обращения: 03.12.2020).

Поступила в редакцию 08.12.2020 г.

DETECTING AND RECOGNIZING UNUSUAL TEXT FROM VIDEO FRAMES

Mukhamadieva K.B.

Text content appearing in video is an interesting index for semantic video search (from archives), warning generation (live streams), as well as for high-level applications such as analysis of opinions and content synthesis. Key components of such systems require detection and recognition of text content, which is also a subject of research. This article presents a complex structure for detection and recognition of text content in video frames. In particular, it is focused on non-standard fonts, such as Arabic inscriptions (in the article, this type we called italic inscriptions). Detection of text areas in video frames is performed by fine-tuning of object detectors on the basis of deep neural networks for the specific case of text detection. The script of detected text content is identified with the help of convolution neural networks (CNN), and a combination of CNN and long term memory networks (LSTM) is used for recognition.

Keywords: text recognition, convolution neural network (CNN), long short-term memory (LSTM), recursive neural network *RNN*, machine learning, Tesseract.

Мухамадиева Кибриё Бахадировна

старший преподаватель кафедры
информационных коммуникационных технологий
Бухарского инженерно-технологического
института,
Узбекистан, г. Бухара.
E-mail: mkb78@mail.ru

Mukhamadieva Kibrie Bakhadirovna

Senior Lecturer at Department of Information and
Communication Technologies Bukhara Engineering
– Technologies Institute,
Uzbekistan, Bukhara.

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ДИНАМИЧЕСКОЙ УСТОЙЧИВОСТИ БУРИЛЬНОЙ КОЛОННЫ

© 2021 Улитин Г.М.

Исследованы динамические колебания, вызывающие параметрический резонанс при взаимодействии бурильной колонны с протекающей внутри её промывочной жидкостью. На примере математической модели весомого стержня, шарнирно закреплённого, получено уравнение для определения границ главной области динамической неустойчивости при параметрических колебаниях, зависящих от параметров бурильной колонны.

Ключевые слова: математическая модель, параметрические колебания, бурильная колонна, динамическая неустойчивость.

Введение. Изучению параметрических колебаний посвящены работы в разных областях техники [1-3], что связано с появлением параметрического резонанса. Эта задача становится актуальной и в динамике бурильных колонн. При бурении скважин роторным способом циркуляция промывочной жидкости внутри колонны осуществляется эрлифтным способом. Условия влияния протекающей жидкости с постоянной скоростью на устойчивость колонны исследованы в работах [4-7], причём для скоростей жидкости в буровых установках роторного типа потеря устойчивости не происходит. В работах [4, 8] показано, что потеря устойчивости колонны, погруженной в жидкость, происходит только при условии, когда вес жидкости, вытесненный единицей длины колонны, будет больше веса этой части колонны, т. е. бурильная колонна сохраняет устойчивость при погружении в жидкость.

Таким образом, представляет интерес задача о динамической устойчивости колонны, когда жидкость находится внутри её и является периодической функцией времени, т. е. изучить параметрический резонанс бурильной колонны с протекающей внутри её жидкостью. Аналогичная задача о динамической устойчивости колонны, испытывающей действие переменного растягивающего усилия, обусловленного наличием талевой системы, изучена в работе [9].

В работе [10] показано как в линейной постановке при параметрическом резонансе возникает неограниченный рост амплитуд поперечных колебаний, которые исследовались в квазилинейном приближении.

В рамках линейной теории все виды колебаний (продольные, поперечные, крутильные) колонны принято считать обособленными [4, 11, 12]. Обстоятельное доказательство с указанием точности независимости этих колебаний приведено в работе [13].

В некоторых работах рассмотрены нелинейные колебания, но без учёта протекающей жидкости, так например, в работе [14] учтена нелинейная упругая характеристика, в [15] учтены начальные искривления, в [16] – более высокие амплитуды. При этом решения ищутся в виде приближения некоторыми функциями, например, в работе [16] – тригонометрическими.

Основная часть. В качестве математической модели бурильной колонны примем уравнение изгибных колебаний упругого стержня длиною l с протекающей внутри его

жидкостью со скоростью V . Трением жидкости пренебрегаем, что допустимо для данной задачи:

$$EJ \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + 2V m_0 \frac{\partial^2 y}{\partial x \partial t} + m_0 V^2 \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + \frac{\partial}{\partial x} \left(N(x) \frac{\partial y}{\partial x} \right) + (m + m_0) \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0, \quad (1)$$

где EJ - изгибная жесткость колонны, $V = V_0 + V_1 \cos \theta t$ - скорость протекающей жидкости, V_0 - скорость её подачи, V_1 - амплитуда, а θ - частота колебаний, обусловленная работой насосов, m_0 - масса жидкости, приходящаяся на единицу длины колонны, $N(x) = mg(l - x)$ - продольное усилие, вызванное весом колонны, m - масса единичной длины колонны.

Будем считать, что закрепление торцов колонны соответствует шарнирному опиранию. Как известно для больших глубин бурения условия закрепления не оказывают существенного влияния на частоты колебаний такой системы [6].

Решение уравнения (1) будем искать в виде:

$$y(x, t) = \sum_{k=1}^{\infty} f_k(t) \sin p_k x, \quad (2)$$

где $p_k = \frac{\pi k}{l}$, что позволяет удовлетворить граничным условиям шарнирного опирания:

$$y(0, t) = 0; y''(0, t) = 0; y(l, t) = 0; y''(l, t) = 0.$$

Подставим выражение (2) в уравнение (1) и применим метод Бубнова - Галёркина по совокупности функций $\{\sin p_k x\}$ с учётом их ортогональности на $[0; l]$:

$$\begin{aligned} & \frac{(m + m_0)l}{2} \ddot{f}_n + 2m_0(V_0 + V_1 \cos \theta t) \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_{nk} \dot{f}_k - mg \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{nk} f_k + \\ & + \frac{1}{2} \left(p_n^2 EJ - m_0 p_n^2 V_0^2 - \frac{1}{2} m_0 p_n^2 V_1^2 - 2V_0 V_1 m_0 p_n^2 \cos \theta t - \frac{1}{2} V_1^2 m_0 p_n^2 \cos 2\theta t \right) f_n = 0, \end{aligned} \quad (3)$$

где $\gamma_{nk} = \begin{cases} \frac{2kn}{n^2 - k^2}, & \text{если } n \neq k \text{ разной четности;} \\ 0, & \text{если } n = k \text{ одинаковой четности,} \end{cases}$

$$\delta_{nk} = \gamma_{nk} + p_n^2 \int_0^l (l - x) \sin p_n x \sin p_k x dx = \begin{cases} \frac{2kn(n^2 + k^2)}{(n^2 - k^2)^2}, & \text{если } n \neq k \text{ разной четности;} \\ 0, & \text{если } n = k \text{ одинаковой четности;} \\ \frac{\pi^2 n^2}{4}, & \text{если } n = k. \end{cases} .$$

Уравнение (3) представим в виде:

$$\begin{aligned} \ddot{f}_n + \frac{4m_0(V_0 + V_1 \cos \theta t)}{(m + m_0)l} \sum_{k=1}^{\infty} \gamma_{nk} \dot{f}_k - \frac{2mg}{(m + m_0)l} \sum_{k=1}^{\infty} \delta_{nk} f_k + \\ + \frac{m_0 p_n^2}{(m + m_0)} \left(\frac{p_n^2 EJ}{m_0} - V_0^2 - 2V_0 V_1 \cos \theta t - V_1^2 \cos^2 \theta t \right) f_n = 0, \quad n = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \quad (4)$$

В результате получили бесконечную систему дифференциальных уравнений второго порядка с периодическими коэффициентами. Представим её в матричной форме, ограничившись конечным числом r членов в сумме (2):

$$\ddot{\bar{f}} + (A^{(1)} + B^{(1)} \cos \theta t) \dot{\bar{f}} + (A^{(2)} + B^{(2)} \cos \theta t + B^{(3)} \cos 2\theta t) \bar{f} = 0, \quad (5)$$

где $\bar{f} = \begin{pmatrix} f_1 \\ \dots \\ f_r \end{pmatrix}$, а матрицы $B^{(2)}$ и $B^{(3)}$ являются диагональными.

Для определения границ главной области динамической неустойчивости периодическое решение системы (5) будем искать в векторной форме [17]:

$$\bar{f}(t) = \sum_{k=1,3,\dots}^r \bar{a}_k \sin \frac{k\theta t}{2} + \bar{b}_k \cos \frac{k\theta t}{2}, \quad (6)$$

где компоненты векторов \bar{a}_k и \bar{b}_k не зависят от времени t .

Подставляя выражение (6) в систему (5) и приравнивая коэффициенты при косинусах и синусах одинаковых аргументов, получаем две однородные системы относительно компонент векторов \bar{a}_k и \bar{b}_k .

Объединяя их в одну и приравнивая определитель этой системы к нулю, получаем систему алгебраических уравнений для нахождения области динамической неустойчивости.

Если ограничится случаем $r = 1$, то получим для определения границ главной области динамической неустойчивости уравнения при $\sin \frac{\theta t}{2}$ и $\cos \frac{\theta t}{2}$ соответственно:

$$\begin{cases} -\frac{\theta^2}{4} - \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 = 0 \\ -\frac{\theta^2}{4} - \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_3 = 0 \end{cases}, \quad (7)$$

где $\alpha_1 = \frac{mg\pi^2}{2(m + m_0)l}$, $\alpha_2 = \frac{m_0\pi^2}{(m + m_0)l^2} \left(\frac{\pi^2 EJ}{m_0 l^2} - V_0^2 - \frac{1}{2} V_1^2 \right)$, $\alpha_3 = \frac{m_0\pi^2 V_0 V_1}{(m + m_0)l^2}$.

Из системы (7) следует уравнение:

$$\frac{\theta^2}{4} = \alpha_2 - \alpha_1 \pm \alpha_3. \quad (8)$$

Окончательно из уравнения (8) получаем формулу для определения границ главной области неустойчивости:

$$\theta = \frac{2\pi}{l} \sqrt{\frac{m}{m_0 + m} \left(\frac{\pi^2 EJ}{l^2} - \frac{gl}{2} - \left(V_0^2 + \frac{1}{2} V_1^2 \right) \pm V_0 V_1 \right)}. \quad (9)$$

Формула (9) позволяет при заданных параметрах бурения определять область динамической неустойчивости работы бурильной колонны.

Выводы. Впервые исследована динамическая устойчивость бурильной колонны при роторном способе бурения с учётом протекающей в ней промывочной жидкости.

- Для инженерных расчетов определена главная область неустойчивости, что позволяет подбирать режимы бурения таким образом, чтобы избежать возникновение параметрического резонанса, который приводит к значительным изгибным колебаниям бурильной колонны.

- Так как для конкретной бурильной колонны её физические характеристики неизменны, то область динамической неустойчивости зависит только от амплитуды колебаний жидкости и скорости её подачи, при этом для небольших скоростей подачи жидкости и для малых амплитуд её колебаний область динамической неустойчивости существенно сужается и поэтому параметрический резонанс практически не реализуем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Лапшин П. Н. Параметрические колебания жатки и пути их устранения / П. Н. Лапшин, Н. П. Лапшин // Международный научно-исследовательский журнал. Технические науки. – 2016. – № 6-2 (48). – С. 84–86.
- Падалко Д. А. Явление параметрического резонанса в асинхронных генераторах / Д. А. Падалко // Электрические системы и комплексы. – 2016. – № 3. – С. 10–14.
- Улитин Г. М. Колебания и устойчивость конической оболочки, содержащей жидкость / Г. М. Улитин // Теоретическая и прикладная механика. – 1987. – № 18. – С. 112–115.
- Сароян А. Е. Теория и практика работы бурильной колонны / А. Е. Сароян. – Москва : Недра, 1990. – 264 с.
- Расчет бурильных труб в геологоразведочном бурении / Е. Ф. Эпштейн, В. И. Мацейчик, И. И. Ивахнин, А. Ш. Асатуриян. – Москва : Недра, 1979. – 161 с.
- Клюшников В. Д. Лекции по устойчивости деформируемых систем / В. Д. Клюшников – Москва : Наука, 1990. – 264 с.
- Александров М. М. К вопросу учёта сил плавучести, действующих на колонну труб в скважине / М. М. Александров, Ю. А. Пуля // Известия высших учебных заведений. Нефть и газ. – 1975. – № 11. – С. 17–22.
- Пановко Я. Г. Устойчивость и колебания упругих систем / Я. Г. Пановко, И. И. Губанова – Москва : Наука, 1979. – 384 с.
- Улитин Г. М. Обеспечение динамически устойчивой работы бурильной колонны роторного типа / Г. М. Улитин // Уголь Украины. – 2001. – № 1. – С. 28–29.
- Параметрические резонансы в задаче о продольном ударе по тонкому стержню / А. К. Беляев, Н. Ф. Морозов, П. Е. Товстик, Т. П. Товстик // Вестник Санкт-Петербургского университета. Математика. Механика. Астрономия. – 2016. – Т. 3, № 1. – С. 77–94.

11. Chung J. S. Dynamic vertical stretching oscillation of an 1800-th ocean mining pipe / J. S. Chung, A. K. Whitney // Annual offshore technological conference. – Houston : Dalles, Teh., 1981. – № 81. – P. 225–234.
12. Саркисов Г. М. Расчёты бурильных и обсадных колонн / Г. М. Саркисов – Москва : Недра, 1971. – 206 с.
13. Улитин Г. М. О взаимном влиянии колебательных процессов в динамике бурильных колонн / Г. М. Улитин, Ф. Л. Шевченко // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2000. – № 6. – С. 60–63.
14. Kudaibergenov A. K. On dynamic stability of drill strings in a supersonic gas flow / A. K. Kudaibergenov, L. A. Khajiyeva // Journal of Mathematics and Compute Science. – 2018 – Vol. 1 (97). – P. 101–110.
15. Sergaliyev A. S. Flat flexural vibration of drill – string with an initial curvature / A. S. Sergaliyev, L. A. Khajiyeva // Advances in Mechanism Design. – 2017 – Vol. 44. – P. 231–237.
16. Kudaibergenov A. K. Modelling of resonance and stability of drill string nonlinear dynamics / A. K. Kudaibergenov, L. A. Khajiyeva // International Journal of Mechanics. – 2017. –Vol. 11. – P. 92–100.
17. Болотин В. В. Динамическая устойчивость упругих систем / В. В. Болотин – Москва : Гостехиздат, 1956. – 600 с.

Поступила в редакцию 14.01.2021 г.

MATHEMATICAL MODEL OF THE DYNAMIC STABILITY OF THE DRILL STRING

Ulitin G. M.

This work investigates the dynamical vibrations of boring column, which make parameter resonance in touch with washing liquid. Taking mathematical model as an example of a weight hinge rod, the equation is obtained for finding the borders of the main field of dynamical instability during the parameter vibrations, which depend on parameters of a boring column.

Keywords: mathematical model, parameter vibrations, boring column, dynamical, instability.

Улитин Геннадий Михайлович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой высшей математики ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.

E-mail: gennadiy.ulitin@yandex.ua

Ulitin Gennadii Mikhailovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Higher Mathematics of Donetsk National Technical University, DPR, Donetsk.

ВЕРОЯТНОСТНЫЙ ПОДХОД К ОПТИМИЗАЦИИ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ СЛУЧАЙНОЙ РЕДУКЦИЕЙ НЕЙРОНОВ

© 2021 Бабичева М.В., Данилов В.В., Борщевский С.В.

Предложена вероятностная модель редукции нейронов скрытого слоя, применяемой в глубоких нейронных сетях для предотвращения переобучения. Проведены компьютерные эксперименты на нейросетевых классификаторах различных архитектур, доказывающие эффективность применения редукции для уменьшения количества параметров и устранения эффекта переобучения, без уменьшения точности классификации. Показано, что встроенная функция библиотеки PyTorch может быть описана предложенной вероятностной моделью и не гарантирует отключения нейронов точно с заданной вероятностью.

Ключевые слова: нейронные сети, биномиальное распределение, PyTorch, dropout.

Биномиальное распределение и редукция. В процессе обучения нейронных сетей с большим количеством слоев и параметров очень часто возникает ситуация, когда сеть прекрасно работает на обучающем множестве, но на тестовом или рабочем множестве данных точность падает. Это происходит из-за эффекта переобучения. Сеть «запоминает» всю обучающую выборку, и не может обобщать данные, на которых не происходило обучение. Одним из методов борьбы с переобучением является редукция, или так называемый dropout, случайное исключение из сети нейронов, в процессе обучения [1]. Исключенный нейрон при любых входных данных или параметрах возвращает 0. Если предположить, что нейроны исключаются из нейронной сети с вероятностью p , то вероятность того, что нейрон останется в сети, составляет $q=1-p$. В случае если $h(x)=xW+b$ — вход от входного вектора x , а $a(h)$ — функция активации, применение dropout на этапе обучения можно представить как измененную функцию активации:

$$f(h)=D \odot a(h),$$

где $D=(X_1, \dots, X_d)$ — dh -мерный вектор случайных величин X_i , распределенных по закону Бернулли. X_i имеет следующее распределение вероятностей:

$$f(k, p) = \begin{cases} p, & \text{при } k = 1 \\ 1 - p, & \text{при } k = 0 \end{cases}$$

где k — все возможные выходные значения. Эта случайная величина идеально соответствует dropout, примененному к одному нейрону. Нейрон выключают с вероятностью $p=P(k=1)$, в противном случае — оставляют включенным. Тогда для моделирования ситуации выключения нейронов на этапе тестирования можно просто представить, что функция активации умножается на $q=1-p$, таким образом учитывая количество оставшихся нейронов.

Однако гораздо эффективнее умножать функцию активации не на этапе тестирования, а на этапе обучения. Такой подход часто называют обратным дропаутом. Во многих фреймворках для глубокого обучения, в частности PyTorch, Dropout реализован как раз в этой модификации, так как при этом необходимо лишь однажды описать модель, а потом запускать обучение и тестирование на этой модели, меняя только один параметр (коэффициент dropout). Легко заметить, что слой h из n нейронов

на отдельном шаге этапа обучения можно рассматривать как ансамбль из n экспериментов Бернулли с вероятностью успеха p . Таким образом, на выходе слоя h мы получаем следующее количество исключенных нейронов:

$$Y = \sum_{i=1}^{dh} (1 - X_i).$$

Так как каждый нейрон представлен в виде случайной величины, распределенной по закону Бернулли, и все эти величины независимы, общее число исключенных нейронов – также случайная величина, имеющая биномиальное распределение:

$$Y \sim Bi(dh, p),$$

где вероятность k успешных событий за n попыток характеризуется следующей плотностью распределения:

$$f(k; n, p) = \sum_{k=0}^n \binom{n}{k} p^k q^{n-k},$$

где $p^k q^{n-k}$ – вероятность получения последовательности k успешных событий за n попыток, и, следовательно, $n-k$ неуспешных. $\binom{n}{k}$ – биномиальный коэффициент, используемый для расчета количества возможных успешных последовательностей. Можно использовать это распределение, чтобы рассчитать вероятность отключения определенного количества нейронов. Используя метод Dropout, фиксируем коэффициент $dropout$ p для определенного слоя и ожидаем, что из этого слоя будет исключено пропорциональное количество нейронов. Например, если слой, к которому мы применили dropout, состоит из $n=1024$ нейронов, а $p=0,5$, то скорее всего 512 из них будет отключено. Однако если посчитать вероятность:

$$Y = \sum_{i=0}^{1024} X_i \sim Bi(1024, 0,5).$$

$$P(Y=512) = \binom{1024}{512} 0,5^{512} (1 - 0,5)^{1024-512} \approx 0,025.$$

Получается, что вероятность отключения ровно 512 нейронов составляет всего 0,025. На рисунке 1 представлены результаты расчета, сколько нейронов будет выключено для разных значений p и зафиксированного количества n . Разными цветами показаны разные значения p , по оси x – количество исключенных нейронов, по оси y – вероятность того что именно это число нейронов будет исключено, в процентах.

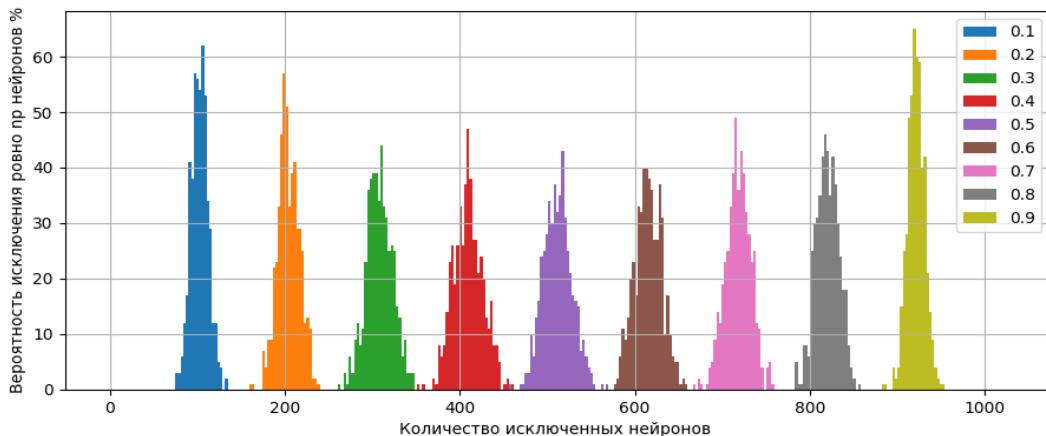


Рис. 1. Зависимость вероятности исключения ровно pr нейронов от количества исключенных нейронов, для разных значений вероятности p

Распределение значений почти симметрично относительно $p=0,5$ и вероятность выключения нейронов возрастает по мере того, как увеличивается расстояние от $p=0,5$.

Нейронный классификатор. Для компьютерных экспериментов был создан нейронный классификатор со следующими параметрами:

- входной слой – линейный, 13 нейронов, функция активации – сигмоид,
- 2 скрытых слоя по 10 нейронов, функция активации – сигмоид,
- выходной слой – линейный, 3 нейрона, функция активации – softmax.

Обучение – градиентный спуск со случайным перемешиванием выборки и функцией потерь – кросс-энтропия.

Алгоритм оптимизации – Адам.

Количество циклов обучения 5000, в процессе экспериментов увеличивалось для сохранения точности модели.

Обучение и тестирование проводилось не на всей выборке одновременно, а на случайно выбранном массиве данных для каждого цикла обучения (batch), размером 10 значений для снижения нагрузки на процессор и видеокарту. Этот параметр влияет на скорость обучения, поэтому впоследствии он менялся для увеличения скорости при увеличении количества циклов обучения.

Оптимальное количество нейронов в скрытом слое было найдено экспериментально. На рисунке 2 представлена зависимость точности классификации (разницы выходов скрытого слоя и выходов тестового набора) от количества нейронов в скрытом слое. Видно, что при значении 10 достигается высокая точность – около 0,96. (Для полной сети это значение оказалось не столь велико – 0,87).

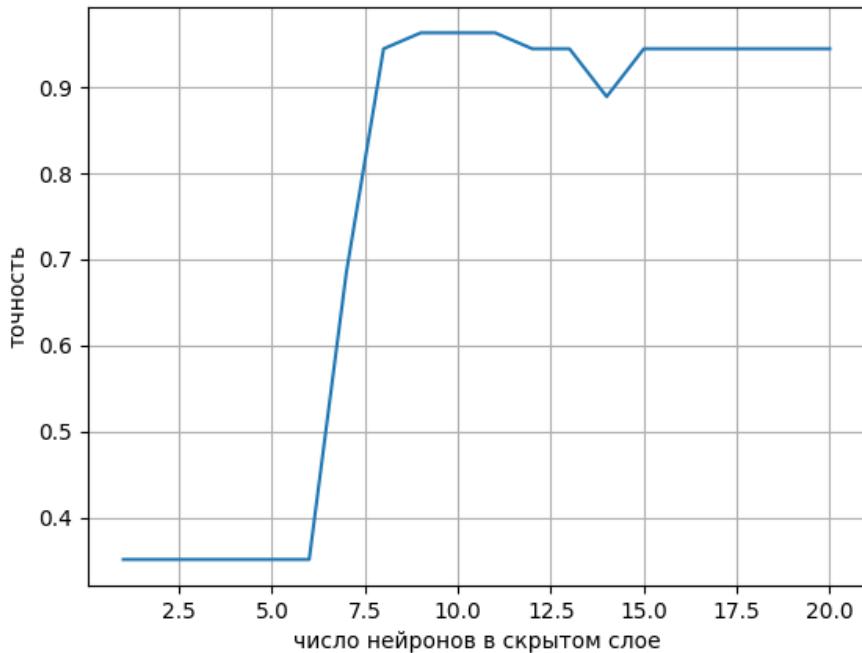


Рис. 2. Зависимость точности классификации в зависимости от количества нейронов в скрытом слое

Данные для обучения были взяты из библиотеки `sklearn.datasets`, классификация производилась по 2-м параметрам [2]. На рисунке 3 показаны 2 входных массива и один выходной – с размеченными классами. Так же выглядит и тестовый набор.

Рис. 3. Набор данных `sklearn.datasets` для экспериментов

Для программной реализации был выбран фреймворк PyTorch 1.7.1, для вычислений использовалась CUDA NVIDIA GeForce GTX 1050 Ti.

Функция `torch.nn.Dropout`. Для понимания работы встроенной функции были рассмотрены результаты редукции слоя нейронов 10×10 функцией `torch.nn.Dropout`, которая позволяет регулировать вероятность исключения нейронов из слоя при помощи настраиваемого параметра p [3]. В результате экспериментов было выяснено, что количество исключенных нейронов в слое не всегда в точности равно p , как и предполагалось при рассмотрении биномиального распределения. На рисунке 4 видно, что для `torch.nn.Dropout(p=0,5)` не 50 нейронов исключено, а 46. Причем было замечено, что расположение исключенных нейронов не всегда симметрично и бывает сильно смещено в ту или другую сторону. Таким образом можно считать, что функция `dropout` PyTorch выдает результат близкий к тому, который обсуждался в начале статьи.

```
tensor([[-0.4773, 1.8109, 0.0000, -1.2623, -0.0000, 2.4924, -1.0745, -0.0000, 0.0000, -0.0000],  
[-0.2630, 4.7534, -2.9279, -0.3741, -0.0000, -0.0000, -0.0000, 0.0000, 0.0000, 1.5604],  
[ 0.0000, -0.0000, 0.0000, 1.0335, -0.2552, -2.5403, 0.0000, 1.4557, 0.0000, 0.7432],  
[ 5.0154, -0.0000, -0.0000, 0.0000, -0.0000, -1.9014, 0.0000, 0.0000, -3.0967, -0.0000],  
[-3.4598, -5.1000, -0.0000, 2.6591, -1.4688, 1.4097, 0.0000, 0.3751, 0.0000, 0.0000],  
[ 0.0000, -0.9465, 0.0000, 0.0000, -2.5077, 0.6683, 0.0000, 0.0000, 1.5256, -0.0000],  
[ 0.0000, 4.2940, -0.0000, 0.0000, 0.2137, 0.2137, 0.5458, 0.0000, 4.3859, -0.0000],  
[ 0.3178, 0.5460, 0.0000, -0.5009, 3.6129, -0.4459, -1.1160, -0.0000, -2.9739, 0.2503],  
[ 1.1426, 3.8124, -0.0000, 0.0000, 0.6334, -0.6265, -0.0000, -1.0188, 0.0000, 0.7775],  
[ 0.3294, 0.5460, -0.0000, 0.0000, -0.0000, 0.0000, -0.0000, 0.0000, 2.4197, 0.3710]])
```

Рис. 4. Результат исключения нейронов с вероятностью $p=0,5$.
Красным отмечены исключенные нейроны

Усложнение модели и переобучение. Результаты классификации после нормального обучения без редукции для модели с разным количеством скрытых слоев представлены на рисунке 5. Слева представлены результаты базовой модели с двумя скрытыми слоями, справа – для модели с количеством скрытых слоев 4. Точность (accuracy) выводится через каждые 100 циклов обучения. Внизу выводится максимальное отклонение от целевых значений тестовой выборки. В обоих случаях оно одинаково.

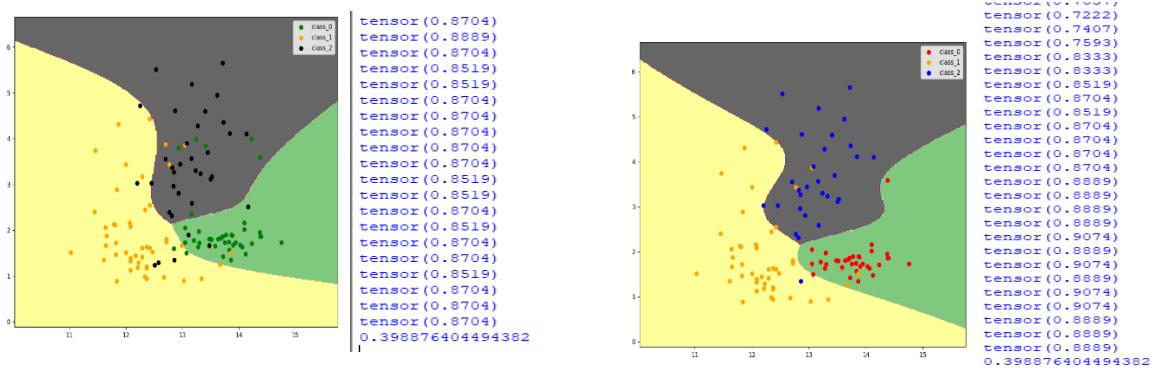


Рис. 5. Слева – результаты на тестовом множестве для классификатора с 2-мя скрытыми слоями, справа – результаты классификации той же сети с увеличением количества скрытых слоев до 4-х

Сеть с большим количеством слоев и параметров показывает большую точность классификации. При визуализации можно увидеть, что пространство данных разбивается на 3 класса и модель относит данные из тестовой выборки к тому или иному классу. При добавлении новых слоев точность на тестовом множестве сначала растет, а затем падает. Для того, чтобы получить переобучение, к данной сети необходимо добавить еще 5 таких же скрытых слоев. На рисунке 6 представлен результат характерный для переобучения. То есть на обучающем множестве точность растет, а на тестовом сначала растет, а затем падает. О качественной классификации уже речи не идет, как видно из рисунка. Интересно, что каждый раз при усложнении сети точность начинает расти с большего значения.

Можно запомнить то значение циклов обучения, при котором была достигнута максимальная точность на тестовом множестве и остановить обучение. Такой подход дает хорошие результаты, но имеет свои недостатки, которые не обсуждаются в рамках данной статьи.



Рис. 6. 5 скрытых слоев дают переобучение, на тестовом множестве точность сначала растет, но в определенный момент начинает падать и классификатор перестает работать

Обучение с редукцией. Включим редукцию. Функцию `torch.nn.Dropout` применим к выходным значениям каждого из 5-ти слоев модели, дававшей переобучение. На рисунке 7 представлены результаты для значений $p=0,2$ и $p=0,5$.

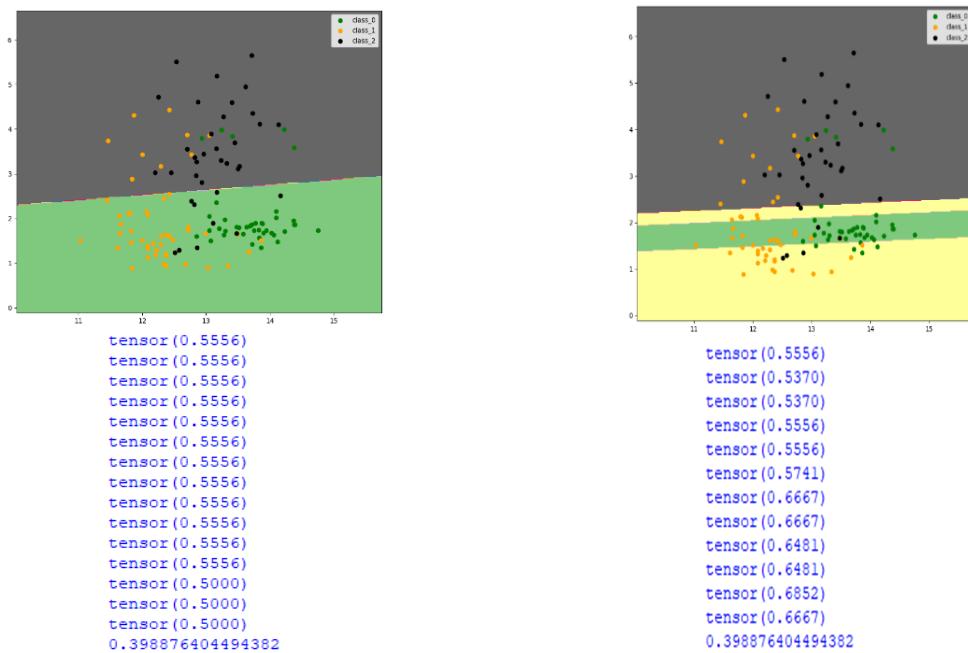


Рис. 7. Результаты классификации тестового множества данных с редукцией с вероятностью $p=0,2$ и $p=0,5$

Видно, что переобучения нет, но результаты классификации неудовлетворительные. Для увеличения точности увеличим количество циклов обучения с 5000 до 10000 и для увеличения скорости обучения размер batch с 10 до 40. Результаты обучения для значений $p=0,2$ и $p=0,5$ представлены на рисунке 8.

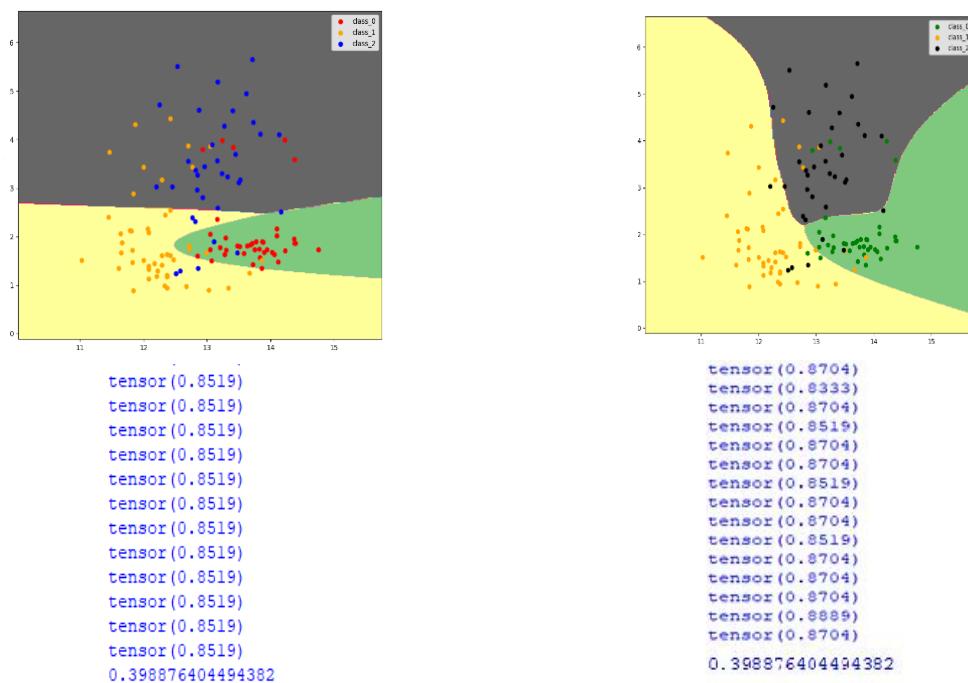


Рис. 8. При увеличении количества циклов обучения и размера batch точность классификации увеличивается, однако соотношение для $p=0,2$ и $p=0,5$ не меняется

Видно, что при значении $p = 0,5$, точность классификации больше, чем при $p = 0,2$ и достигает 0,8704, значения полученного для сети с 2-мя скрытыми слоями. В обоих случаях переобучения не наблюдается. Результаты обучения в зависимости от значений вероятности на последней модели, склонной к переобучению, представлены на рисунке 9.

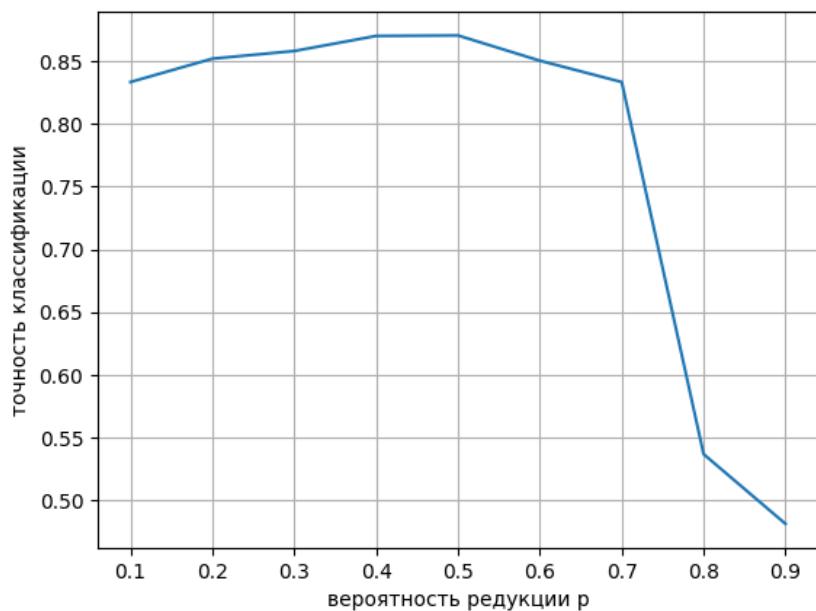


Рис. 9. Зависимость точности классификации от вероятности редукции нейронов для модели с 5-ю скрытыми слоями

Видно, что при значении $p=0,5$ точность классификации максимальна. Однако, поскольку функция `torch.nn.Dropout` имеет вероятностные свойства, описанные в начале статьи, то выключенными оказываются вовсе не половина нейронов, а возможно гораздо больше или гораздо меньше.

Выводы. Если редукцию на отдельном нейроне можно описать как случайную величину с распределением Бернулли, то редукцию на множестве нейронов можно описать, как случайную величину с биномиальным распределением. При этом функция вероятности того, что будет исключено ровно p нейронов в слое из n с вероятностью p имеет минимум для $p=0,5$. Эксперименты показали, что встроенная функция фреймворка PyTorch полностью соответствует предложенной математической модели. Дальнейшие эксперименты показали, что редукция Dropout помогает предотвратить проблему переобучения в нейронных сетях, при этом для сохранения точности можно увеличить количество циклов обучения в 2 раза и для сохранения скорости обучения увеличить размеры `batch` в 4 раза. Однако функция `torch.nn.Dropout` не гарантирует, что выключено будет p нейронов, поскольку данный процесс носит вероятностный характер и наибольший разброс значений p достигается как раз для значения $p=0,5$, при котором достигается наибольшая точность классификации. Этот факт стоит учитывать при применении встроенной функции редукции библиотеки PyTorch для предотвращения переобучения глубоких сверточных нейронных сетей, или с целью уменьшения количества параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Roder Mateus Energy-based Dropout in Restricted Boltzmann Machines: Why not go random / M. Roder, G. H. de Rosa, V. Hugo C. de Albuquerque [et al.]. – Текст : электронный // IEEE Transactions on Emerging Topics in Computational Intelligence – 2020. – 24 December. – URL : arxiv.org/abs/2101.06741 (дата обращения: 11.01.2021).
2. Dataset loading utilities – Текст : электронный. – URL: <https://scikit-learn.org/0.16/datasets/index.html> (дата обращения: 11.01.2021).
3. Stevens E. Deep Learning with PyTorch / Eli Stevens, Luca Antiga and Thomas Viehmann ; foreword by Soumith Chintala. – Shelter Island, NY : Manning Publications Co., 2020. – 490 p.

Поступила в редакцию 18.01.2021 г.

THE PROBABLE APPROACH TO OPTIMIZATION OF NEURAL NETWORKS BY NEURONS RANDOM DROPOUT

Babicheva M.V., Danilov V.V., Borshchevskii S.V.

The probabilistic model of the neurons dropout in the hidden layer is proposed, used in deep neural networks to prevent overfitting. Computer experiments carried out on neural network classifiers of various architectures, proving the effectiveness of using dropout to reduce the number of parameters and eliminate the effect of overfitting, without reducing the classification accuracy. It is shown the PyTorch library function can be described by the proposed probabilistic model and does not guarantee the shutdown of neurons with a given probability.

Keywords: neural networks, binomial distribution, PyTorch, dropout.

Бабичева Маргарита Вадимовна

ст. преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, Донецк.
E-mail: m.v.babicheva60@gmail.com

Babicheva Margarita Vadimovna

Senior Lecturer at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

Борщевский Сергей Васильевич

доктор технических наук, профессор, проректор по научной работе ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: borschhevskiy@mail.ru

Borschhevskii Sergei Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Vice-Rector of Scientific Work of Donetsk National Technical University,
DPR, Donetsk.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ ТРАЕКТОРНОГО КОНТРОЛЯ

© 2021 Щербов И.Л.

В настоящей работе проведена проверка работоспособности алгоритма нелинейного оптимального адаптивного сглаживания многопараметрических данных измерений при кинотеодолитном и радиолокационном контроле типовой траектории летательного аппарата и исследование устойчивости метода обработки избыточной траекторной информации к аномальным ошибкам при измерениях методом математического моделирования.

Ключевые слова: траекторный контроль, нелинейное оптимальное адаптивное сглаживание, аномальная ошибка, математическое моделирование.

Введение. В работах [1-3] для обработки данных траекторного контроля предложено применить полиномиальное описание стохастических траекторий при совместной реализации пространственной и временной избыточности. С этой целью введена система базисных функций и вектор коэффициентов сглаживающего полинома, состав и величина которого определяются в ходе обработки.

Рассмотрены две клеточно-матричные структуры базисных функций для осуществления сглаживания путем совместной обработки данных внешнетраекторных измерений, обладающих пространственной и временной избыточностью.

Для совместной реализации пространственной и временной избыточности данных измерений разработан алгоритм нелинейного оптимального адаптивного сглаживания многопараметрических данных измерений и метод обработки избыточной траекторной информации к аномальным ошибкам при измерениях.

Постановка задачи. С целью проверки работоспособности алгоритма нелинейного оптимального адаптивного сглаживания многопараметрических данных измерений при кинотеодолитном и радиолокационном контроле типовой траектории летательного аппарата (ЛА) – петли Нестерова (рисунок 1) и исследования устойчивости метода обработки избыточной траекторной информации к аномальным ошибкам при измерениях проведено математическое моделирование данного процесса.

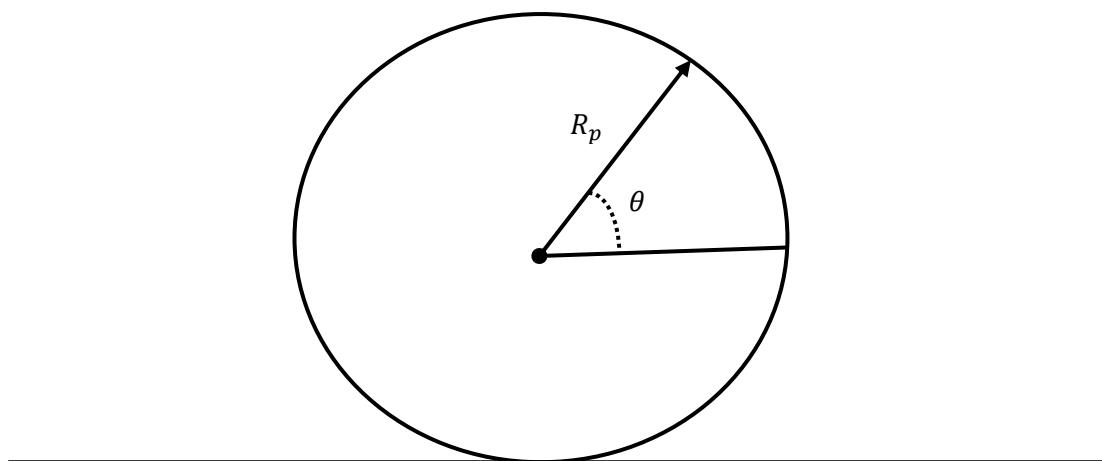


Рис. 1. Модель петли Нестерова

Решение поставленной задачи. Процесс моделирования данных представляет собой следующую процедуру:

1. Ввод служебной информации и необходимых данных для начала процесса измерения:

- тип обрабатываемых данных, получаемых от РЛС и КТС, их координаты, интервал измерений, интервал сглаживания, шаг дискретизации, максимальная степень сглаживающего полинома, шаг ЛСС. При этом систематические ошибки устраняются до начала обработки путем введения поправок;

- количество первичных средств измерений – РЛС и КТС, участвующих в обработке;

- количество первичных данных измерений, участвующих в обработке, на интервале ЛСС, середина интервала сглаживания и другие вспомогательные величины, необходимые для функционирования ПО;

- данные измерений и формирование массива данных измерений.

2. Получение первичных координат:

- формирование ЛНБФ двух переменных в зависимости от максимально возможной степени сглаживающего полинома и числа точек на интервале сглаживания;

- вычисление основной матрицы системы $\varphi^T \varphi$;

- нахождение обратной матрицы системы уравнений $(\varphi^T \varphi)^{-1}$ и вычисление матричного произведения $(\varphi^T \varphi)^{-1} \varphi^T$ для нахождения оценки коэффициентов сглаживающего полинома;

- вычисление диагональных элементов весовой матрицы и вычисление количества шагов ЛСС;

- формирование массива данных измерений на текущем шаге ЛСС.

3. Расчет вторичных координат:

- вычисление вторичных координат и формирование вектора столбца вторичных координат;

- нахождение начального приближения вектора коэффициентов сглаживающего полинома;

- нахождение начального приближения вторичных координат объекта в пространстве;

- подготовка массивов для начала итеративного приближения, переприсваивание массивов и начало итеративного приближения к МПО положения объекта в пространстве;

- вычисление первичных координат и проекций градиентов на каждом шаге приближения к МПО положения объекта в пространстве;

- вычисление вектора отклонений данных измерений от вычисленных первичных координат.

4. Формирование массивов сглаженных значений вторичных параметров:

- формирование массивов сглаженных значений вторичных параметров положения на первом шаге ЛСС;

- формирование массивов сглаженных значений вторичных параметров положения со второго до предпоследнего шага ЛСС;

- формирование массивов сглаженных значений вторичных параметров положения на последнем шаге ЛСС.

5. Вывод сглаженных значений вторичных параметров положения объекта в пространстве.

6. Сравнение полученных результатов с нормативными требованиями.

7. Выдача дальнейших рекомендаций о соответствии бортовых систем нормативным требованиям.

Моделирование данных измерений осуществлялось следующим образом:

- для $t = 1, \dots, 25$ фиксировались во времени вторичные координаты $X(t) = 10000$ м, и $Y(t) = 1000$ м, а координата $Z(t)$ изменялась во времени по закону:

$$Z(t) = 210t;$$

- для $t = 26, \dots, 75$ фиксировалась во времени вторичная координата $X(t) = 10000$ м, а координаты $Y(t)$ и $Z(t)$ изменялись во времени по закону:

$$Y(t) = Y_0 + R_p \cos(180 - \theta);$$

$$Z(t) = Z_0 + R_p \sin \theta, R_p = 1500;$$

$$\theta = 7,2(t - 25), Z_0 = Z(25), Y_0 = 1000 + R_p;$$

- для $t = 76, \dots, 100$ фиксировались во времени вторичные координаты $X(t) = 10000$ м, и $Y(t) = 1000$ м, а координата $Z(t)$ изменялась во времени по закону:

$$Z(t) = 210(t - 50);$$

где $X(t)$, $Y(t)$, $Z(t)$ – моделируемые истинные значения вторичных координат во времени; t – текущий момент времени; Y_0 , Z_0 – координаты центра петли с радиусом R_p ; θ – угол между осью ОY и подвижным радиусом вектора R_p ;

- число точек на интервале измерения (на траектории) принималось равным 100 при частоте дискретизации 1 Гц;

- число точек на интервале локально-скользящего сглаживания $n = 9, 13, 17, 21, 25$ при частоте дискретизации 1 Гц;

- в ходе моделирования получены данные измерений от трёх трехкоординатных РЛС и трех КТС.

Автокорреляция ошибок измерений определялась экспоненциальной зависимостью.

Для быстрофлуктуирующих ошибок измерений, составляющих приблизительно половину среднеквадратической ошибки измерений, время корреляции принято равным 3 с для радиолокационных измерений и 1 с для кинотеодолитных измерений.

Медленнофлуктуирующие ошибки измерений, составляющие вторую половину СКО измерений, получены путём суммирования с истинными значениями измеряемых первичных координат случайной величины, остававшейся неизменной на всем интервале измерений.

Грубые ошибки измерений (сбои) вводились в дальность, измеренную РЛС № 1, и составляли $+400, -400$ м, и -1000 м; сбои вводились одиночные $+400, -400$ м, -1000 м и групповые (три сбоя подряд) $+400$ и -400 м по дальности РЛС №1.

Варианты обработки ошибок измерений без сбоев и со сбоями приведены в таблицах 1-3 (измерительные средства, участвующие в обработке, отмечены знаком «+»).

Таблица 1. Координаты местоположения внешнетраекторных измерительных средств и среднеквадратические ошибки данных измерений

Тип станции	N	Координаты станций относительно старта			СКО измерений			Варианты обработки				
		x_m	y_m	z_m	R_m	α'	β'	1	2	3	4	5
РЛС	1	0	0	0	40	7	7	+	+	+	+	+
РЛС	2	0	0	8000	40	7	7	-	-	+	+	+
РЛС	3	0	0	11000	40	7	7	-	-	-	+	+
КТС	1	0	0	0	-	1	1	-	+	-	-	+
КТС	2	0	0	8000	-	1	1	-	-	-	-	+
КТС	3	0	0	11000	-	1	1	-	-	-	-	+

Таблица 2. Координаты местоположения внешнетраекторных измерительных средств и среднеквадратические ошибки данных измерений

Тип станции	N	Координаты станций относительно старта			СКО измерений			Варианты обработки			Величина сбоя по R 400 м
		x_m	y_m	z_m	R_m	α'	β'	1	2	3	
РЛС	1	0	0	0	40	7	7	+	+	+	нет
РЛС	2	0	0	8000	40	7	7	-	+	+	нет
РЛС	3	0	0	11000	40	7	7	-	-	+	нет

Таблица 3. Координаты местоположения внешнетраекторных измерительных средств и среднеквадратические ошибки данных измерений

Тип станции	N	Координаты станций относительно старта			СКО измерений			Варианты обработки			Величина сбоя по R 1000 м
		x_m	y_m	z_m	R_m	α'	β'	1	2	3	
РЛС	1	0	0	0	40	7	7	+	+	+	нет
РЛС	2	0	0	8000	40	7	7	-	+	+	нет
РЛС	3	0	0	11000	40	7	7	-	-	+	нет

Исследованию подвергался алгоритм аддитивного нелинейного оптимального сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома.

Работа алгоритма оценивалась по среднему выигрышу в точности для каждой измеряемой первичной координаты на интервале измерения. Осуществлялось локально-скользящее сглаживание. Результаты апробации алгоритма при обработке многопараметрических данных измерений приведены в таблицах 4-9. В указанных таблицах приведены средние выигрыши в точности для каждой измеряемой первичной координаты (W_R, W_α, W_β) на интервале измерения и суммарный средний выигрыш в точности по всем первичным координатам (W_Σ).

В таблице 4 приведены результаты апробации при обработке многопараметрических данных измерений без сбоев для интервалов сглаживания $n = 9, 13, 17, 21, 25$.

По результатам апробации при обработке многопараметрических данных измерений, приведенных в таблице 4, видно, что по мере увеличения избыточности данных измерений выигрыш в точности при обработке данных РЛС возрастает от 1,1 до 2,4. При совместной обработке данных РЛС и КТС выигрыш в точности возрастает еще более и составляет 2,1 - 7,8. При этом выигрыш в точности для РЛС составляет 3,2 - 11,2, для КТС - 1,1 - 1,8. Это позволяет использовать алгоритм для оперативного контроля точности РЛС по данным КТС при совместной обработке информации, получаемой от станций.

В таблицах 5-10 приведены результаты апробации при обработке многопараметрических данных измерений со сбоем по дальности для РЛС № 1 при числе точек на интервале сглаживания $n = 9$.

Таблица 5. Результаты апробации при обработке многопараметрических данных измерений без сбоев для различных интервалов сглаживания

Точек на инт. сгл.	Выигрыш в точности для																W_{Σ}
	РЛС1			КТС1		РЛС2			КТС2		РЛС3			КТС3			
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_{α}	W_{β}		
9	1,01	1,11	1,14	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,09
	1,03	4,83	3,82	1,05	1,08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,14
	2,34	1,19	1,28	-	-	1,08	1,40	2,03	-	-	-	-	-	-	-	-	1,55
	4,16	1,63	2,00	-	-	1,85	2,14	3,44	-	-	2,05	1,66	2,54	-	-	-	2,38
	16,2	4,18	11,9	0,91	3,36	5,71	11,2	20,0	1,37	1,32	5,55	9,90	16,5	1,50	2,57	7,76	
13	1,01	1,12	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,01
	1,03	4,65	3,78	1,01	1,07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,09
	2,61	1,24	1,28	-	-	1,78	1,64	2,05	-	-	-	-	-	-	-	-	1,67
	4,50	1,69	1,94	-	-	1,94	2,39	3,45	-	-	2,14	1,82	2,57	-	-	-	2,49
	15,8	4,10	11,8	0,89	3,34	5,65	9,63	19,1	1,18	1,26	5,40	8,84	15,6	1,34	2,44	7,41	
17	1,01	1,19	1,13	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,11
	1,01	4,62	3,62	1,00	1,03	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	2,05
	2,50	1,18	1,27	-	-	1,12	1,62	2,04	-	-	-	-	-	-	-	-	1,62
	4,20	1,62	1,84	-	-	1,82	2,26	3,31	-	-	2,01	1,72	2,45	-	-	-	2,36
	16,0	3,99	9,24	0,87	2,61	5,69	8,35	14,2	1,02	0,94	5,49	8,19	11,8	1,25	1,84	6,60	
21	1,02	1,19	1,15	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,12
	1,03	4,54	3,32	0,99	0,94	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,97
	2,39	1,16	1,30	-	-	1,09	1,44	2,08	-	-	-	-	-	-	-	-	1,57
	4,16	1,54	1,97	-	-	1,80	2,16	3,49	-	-	1,98	1,69	2,61	-	-	-	2,38
	15,8	3,95	6,47	0,86	1,82	5,71	7,50	9,58	0,92	0,63	5,51	7,41	7,95	1,13	1,24	5,75	
25	1,03	1,18	1,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,12
	1,02	4,42	2,89	0,96	0,82	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,85
	2,49	1,18	1,29	-	-	1,13	1,54	2,09	-	-	-	-	-	-	-	-	1,62
	4,30	1,59	1,94	-	-	1,84	2,32	3,44	-	-	2,03	1,77	2,57	-	-	-	2,42
	15,6	3,84	4,43	0,83	1,25	5,73	6,40	6,42	0,78	0,42	5,51	6,44	5,33	0,98	0,83	5,09	

Таблица 6. Результаты апробации при обработке многопараметрических данных измерений без сбоев для различных интервалов сглаживания

Вариант обработки	Один сбой 400 м по дальности, измеренной РЛС1												W_{Σ}	
	РЛС1			РЛС2			РЛС3							
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}		
1	1,270	1,076	1,091	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,146	
2	2,998	1,167	1,279	1,112	1,516	2,025	-	-	-	-	-	-	1,683	
3	4,887	1,529	1,987	1,718	2,234	3,440	1,895	1,681	2,545	-	-	-	2,435	

Таблица 7. Результаты апробации при обработке многопараметрических данных измерений без сбоев для различных интервалов сглаживания

Вариант обработки	Три сбоя подряд по 400 м каждый в дальности, измеренной РЛС1												W_{Σ}	
	РЛС1			РЛС2			РЛС3							
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}		
1	1,154	0,927	0,975	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1,019	
2	3,434	1,093	1,273	0,973	1,291	2,008	-	-	-	-	-	-	1,678	
3	5,084	1,349	2,013	1,370	1,882	3,468	1,533	1,335	2,570	-	-	-	2,289	

Таблица 8. Результаты апробации при обработке многопараметрических данных измерений без сбоев для различных интервалов сглаживания

Вариант обработки	Один сбой –400 м по дальности, измеренной РЛС1									W_{Σ}	
	РЛС1			РЛС2			РЛС3				
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}		
1	1,071	1,018	0,999	-	-	-	-	-	-	1,029	
2	2,625	1,158	1,261	0,928	1,065	1,982	-	-	-	1,503	
3	4,561	1,615	1,930	1,557	1,738	3,311	1,779	1,310	2,352	2,239	

Таблица 9. Результаты апробации при обработке многопараметрических данных измерений без сбоев для различных интервалов сглаживания

Вариант обработки	Три сбоя подряд по –400 м каждый в дальности, измеренной РЛС1									W_{Σ}	
	РЛС1			РЛС2			РЛС3				
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}		
1	1,209	1,035	1,084	-	-	-	-	-	-	1,109	
2	1,843	1,136	1,260	0,772	0,793	1,964	-	-	-	1,461	
3	4,695	1,577	1,876	1,264	1,243	3,114	1,495	0,945	2,090	2,033	

Таблица10. Результаты апробации при обработке многопараметрических данных измерений без сбоев для различных интервалов сглаживания

Вариант обработки	Один сбой –1000 м по дальности, измеренной РЛС1									W_{Σ}	
	РЛС1			РЛС2			РЛС3				
	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}	W_R	W_{α}	W_{β}		
1	1,563	0,959	0,433	-	-	-	-	-	-	0,985	
2	3,628	1,149	1,149	0,776	0,747	1,836	-	-	-	1,548	
3	5,757	1,558	1,814	1,235	1,122	2,941	1,478	0,870	1,938	2,079	

По результатам апробации, приведенных в таблицах 5-10, видно, что при обработке данных со сбоем выигрыш в точности возрастает, а по угловым координатам – уменьшается.

Вывод. Анализ результатов исследования алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания с оптимизацией структуры сглаживающего полинома позволяет сделать следующие выводы:

- с увеличением степени избыточности данных измерений уменьшаются как быстро флюктуирующие, так и медленнофлюктуирующие ошибки измерений;

- алгоритм показал себя устойчивым при обработке данных измерений со сбоями.

Величина выброса в результате сглаживания, по мере увеличения степени избыточности, уменьшается:

для одиночного сбоя 400 м в 2,5 - 7,6 раз;

для группового сбоя 400 м в 1,3 - 5,7 раз;

для одиночного сбоя 1000 м в 3,9 - 12,5 раз.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Паслён В. В. Совместная обработка данных траекторных измерений наземных и воздушных измерительных средств / Паслён В. В., Щербов И. Л., Мотылев К. И., Михайлов М. В. // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: «Горно-геологическая». – 2006. – Вып. 111-2. – С. 55-59.
2. Щербов И. Л. Обработка данных траекторного контроля с использованием ортогональных базисных функций / Щербов И. Л., Паслён В. В. // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – Вып. 1 (25). – С. 48-53.
3. Щербов И. Л. Исследование алгоритма адаптивного нелинейного оптимального сглаживания многопараметрических данных измерений / Щербов И. Л. // Информатика и кибернетика. – 2020. – № 4 (22). - С. 29-54.

Поступила в редакцию 18.01.2021 г.

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR MATHEMATICAL MODELING OF TRAJECTOR CONTROL DATA PROCESSING

Shcherbov I.L.

In this work, we have tested the performance of the algorithm for nonlinear optimal adaptive smoothing of multiparametric measurement data during cinetheodolite and radar control of a typical trajectory of an aircraft and studied the stability of the method for processing redundant trajectory information to anomalous errors in measurements by the method of mathematical modeling.

Keywords: trajectory control, nonlinear optimal adaptive smoothing, anomalous error, mathematical modeling.

Щербов Игорь Леонидович

проректор ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.

E-mail: scherbov@yandex.ru

Shcherbov Igor Leonidovich

Vice-Rector of Donetsk National Technical University,
DPR, Donetsk.

НЕЧЕТКАЯ ИСКУССТВЕННАЯ НЕЙРОННАЯ СЕТЬ БЕЗ ПРАВИЛ ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ И УПРАВЛЕНИЯ

© 2021 *Бизянов Е.Е., Гутник А.А., Погорелов Р.Н.*

В работе рассмотрена задача предсказания параметров при построении систем прогнозирования и управления. Рассмотрены и проанализированы существующие решения при использовании нечетких нейронных сетей. Предложена структура полносвязной нечеткой искусственной нейронной сети без слоя нечетких правил, соответствующая «классическому» многослойному персептрону. Проведено тестирование по времени обучения и среднеквадратичной ошибке различных структур предлагаемой нечеткой искусственной нейронной сети при прогнозировании мощности потребляемой угледобывающим предприятием. Полученные результаты позволяют выбирать количество нейронов в скрытых слоях в зависимости от требуемой точности предсказания выходного параметра.

Ключевые слова: нечеткая логика, нечеткая искусственная нейронная сеть, персепtron, функция принадлежности, терм.

Введение. Вопросы прогнозирования являются актуальными для любой сферы деятельности человека: прогнозы погоды, прогнозы курса валют, социально-экономические прогнозы и т.д. Для построения указанных прогнозов обычно имеется достаточное количество данных, собранных за многие годы, а также полученные из текущих наблюдений или от экспертов. Однако есть ряд специфических задач: прогнозирование потребности в ресурсах для предприятия, прогнозирование природных явлений и т.п., когда информация об объекте, его параметрах и состояниях является неполной, неопределенной и/или слабоформализованной. Подобные виды задач возникают при построении систем управления объектами, параметры которых сложно измерить, или взаимосвязь между ними однозначно не установлена. Примером может служить система водоподготовки промышленного предприятия, когда количество показателей (концентрация растворенных в воде солей и газов) достигает нескольких десятков, все они между собой взаимосвязаны, причем однозначной функции для выбора количества реагентов для обработки в зависимости от исходного химического состава воды не существует [1]. Другой пример – прогнозирование потребности в электроэнергии для угледобывающего предприятия, энергопотребление которого представляет собой сложный нестационарный процесс, на который влияет значительное количество горно-геологических, технологических, производственных, климатических и других факторов [2].

Среди известных на сегодняшний день моделей и методов прогнозирования можно выделить [2]: мультиплекативные модели, динамические линейные и нелинейные модели, пороговые авторегрессионные модели, фильтры Калмана, временные ряды, ARMAX модели, модели непараметрической регрессии, искусственные нейронные сети (ИНС), статистические модели, а также гибридные модели, например, нечеткие искусственные нейронные сети (НИНС).

Различные виды регрессий и порожденные от них модели, а также временные ряды возможно эффективно использовать в тех случаях, когда зависимость прогнозируемого показателя во времени непрерывна, имеет гладкий характер и не содержит скачков и разрывов. В случае же прогнозирования на основе непериодических рядов данных для получения приемлемой точности (хотя бы в

единицы процентов) приходится учитывать значительное количество членов ряда или коэффициентов регрессии. Кроме того, при обработке непериодических сигналов как регрессия, так и временные ряды дают адекватные результаты только в пределах интервала интерполяции.

Искусственные нейронные сети обладают большей гибкостью в сравнении с вышеупомянутыми моделями, что объясняется наличием в них полной взаимосвязи между входными и промежуточными переменными, а также возможностью ввода нелинейности в функции активации [3]. Именно этим объясняется их расширяющееся применение в решении вычислительных, статистических, прогностических и других задач. Особенностью «классических» ИНС является то, что для их обучения необходимо иметь достаточно большое количество исходных данных, что не всегда возможно.

Для преодоления ограничений, присущих «классическим» ИНС, были разработаны нечеткие искусственные нейронные сети, которые используют теорию нечетких множеств, что дает возможность строить прогнозирующие модели для случаев неопределенности или недостаточности исходных данных. Введение такой нечеткости возможно для входных и выходных данных, весов нейронов, а также для производства промежуточных преобразований [4].

Основная часть. На сегодняшний момент известно более десятка разновидностей нечетких искусственных нейронных сетей: НИНС Такаги-Сугэно-Канга (TSK), Ванга-Менделя (VM), адаптивная НИНС ANFIS, НИНС FALCON, GARIC, NEFCON и FUN, нечеткий многослойный персепtron, гибридная нейронная сеть, а также НИНС, представляющие собой различные модификации «классических» ИНС (нечеткая самоорганизующаяся сеть Кохонена, нечеткая базисная радиальная сеть и др.) [4-6].

Если «классические» ИНС представляют в литературе как универсальный инструмент для обработки не привязанных к предметной области данных, то НИНС, как правило, ориентированы на более узкий круг задач. Так, НИНС Такаги-Сугэно-Канга и Ванга-Менделя применяются для классификации данных и прогнозирования [3], ANFIS и GARIC используют в системах управления [5], FALCON – для параметрической идентификации в адаптивных системах автоматического управления (САУ) с настраиваемой моделью [5], NEFCON – в задачах синтеза при работе с объектом в виде «черного ящика» [5], FUN – в задачах управления в мобильной робототехнике [6], а нечеткий многослойный персепtron – для идентификации наборов данных [4]. В [4] отдельно выделен класс гибридных искусственных нейронных сетей, в которых используются нечеткие нейроны с нечеткими входами и выходами и/или нечеткими весами, но с четкой функцией активации.

Особенностью всех рассмотренных НИНС является наличие специального слоя – слоя правил, в котором с помощью операции нечеткой логики производятся промежуточные операции преобразования данных [4-5].

Эта особенность затрудняет разработку алгоритмов обучения НИНС, т.к. кроме расчета величины синаптических весов связей нужно еще корректировать правила нечеткого вывода для слоя правил, и, возможно, параметры функций принадлежности нечеткого слоя.

Так, количество правил нечеткого слоя зависит от количества входных переменных и количества их термов, и может быть определено по формуле [4]:

$$N_r = N_{in}^{N_t}, \quad (1)$$

где N_r – количество правил; N_{in} – количество входных переменных; N_t – количество термов.

Следовательно, для сети с пятью входными переменными, каждая из которых представлена тремя термами, количество таких правил будет равно 125. С увеличением количества правил будет соответственно увеличиваться и время, затрачиваемое на обучение НИНС, и усложняться алгоритм её обучения.

В некоторых публикациях предлагается для настройки функций принадлежности нечеткого слоя привлекать экспертов [7], что создает определенные трудности: во-первых, для адекватного представления знаний необходимо привлекать как можно больше экспертов, и, во-вторых, каждый эксперт будет вносить свою субъективную погрешность. Авторы данной статьи считают, что настройка НИНС должна осуществляться без привлечения экспертов, а на основании имеющихся реальных данных.

Предлагаем структуру нечеткой искусственной нейронной сети, соответствующей «классическому» многослойному персептрону [3] с двумя скрытыми слоями. На рисунке 1 приведен пример такой НИНС для случая двух входных переменных.

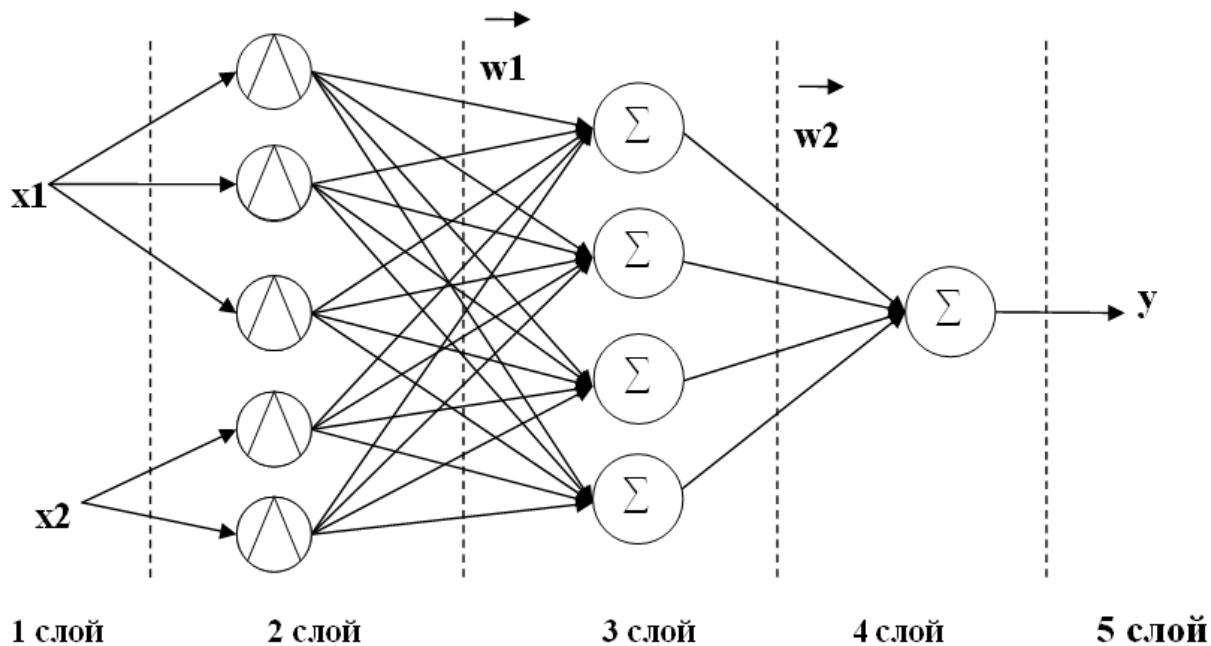


Рис. 1. Структура предлагаемой НИНС

Предлагаемая НИНС содержит пять слоев: 1 – слой входных данных, 2 – первый скрытый нечеткий слой (слой фазификации – приведения к нечеткости), 3 – второй скрытый слой, содержащий нейроны с линейной функцией активации, выполняющий суммирование данных, полученных во втором слое, умноженных на вектор синаптических весов $\vec{w1}$, 4 – слой, выполняющий суммирование данных, полученных в третьем слое, умноженных на вектор синаптических весов $\vec{w2}$, 5 – слой выходных данных.

Количество нейронов в первом скрытом (нечетком) слое равно сумме числа термов всех входных переменных [8].

Количество нейронов во втором скрытом слое определяется в процессе настройки НИНС. На начальном этапе этот показатель можно выбрать равным количеству нейронов в первом скрытом слое.

Четвертый слой является результирующим, поэтому состоит из одного нейрона с линейной функцией активации.

Исходя из принятой в литературе системе обозначений можно записать структуру НИНС, приведенной на рисунке 1, как 2-5-4-1.

Для пояснения принципа работы первого скрытого слоя предлагаемой НИНС рассмотрим функции принадлежности – термы первого скрытого слоя для одной входной переменной. Допустим, таких термов три, как показано на рисунке 2.

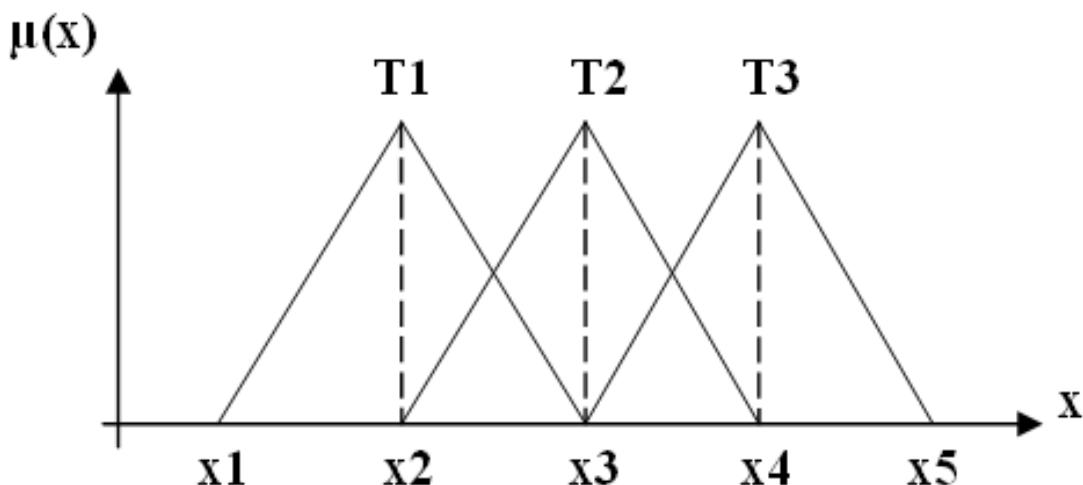


Рис. 2. Термы первого скрытого слоя НИНС для одной входной переменной

Тогда на интервале x_1-x_2 будет проявляться только влияние терма T_1 , на интервале x_2-x_3 – термов T_1 и T_2 , на интервале x_3-x_4 – термов T_2 и T_3 , а на интервале x_4-x_5 – терма T_3 . Это означает, что при изменении значений входной переменной x в интервале x_1-x_5 будут изменяться значения коэффициентов, на которые умножаются

элементы вектора w_1^* , которые потом поступают на нейроны второго скрытого слоя.

Выбор функций принадлежности для первого скрытого слоя НИНС можно произвести двумя способами. Первый способ – распределить носители функций принадлежности равномерно в области носителя для всего диапазона возможных значений входных переменных, как показано на рисунке 2, и второй способ – на основе обработки исходной статистической информации [8].

Для проверки предлагаемой структуры НИНС возьмем данные получасового графика потребляемой мощности угледобывающего предприятия за сутки.

На рисунке 3 показан график исходных данных, и прогнозных значений, полученных при помощи предложенной НИНС со структурой 2-5-3-1 и со структурой 2-14-5-1.

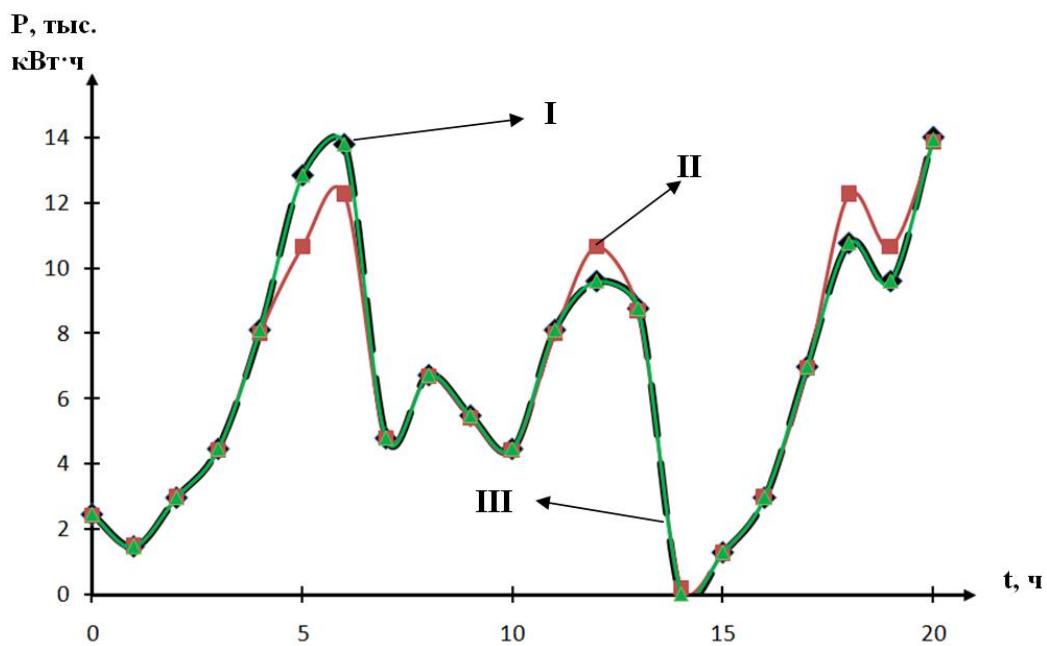


Рис. 3. Графики исходных и прогнозных данных:
I – исходный временной ряд (пунктирная линия);
II – временной ряд, синтезированный НИНС (2-5-3-1);
III – временной ряд, синтезированный НИНС (2-14-5-1)

Для оценки затрат времени на обучение и среднеквадратичных погрешностей были построены НИНС с различными структурами. Так как количество входных переменных во всех случаях неизменно (две переменных), параметры тестируемых НИНС представлены количество нейронов в первом скрытом слое N_{HL1} и втором скрытом слое N_{HL2} . Результаты приведены в таблице 1.

Таблица 1. Результаты тестирования НИНС различной структуры

№	Структура НИНС		Время обучения, с	Среднеквадратичная погрешность ε , %
	N_{HL1}	N_{HL2}		
1	4	2	5,625	6,15
2	4	3	8,156	5,37
3	4	4	9,516	4,4
4	5	3	9,953	5,86
5	5	4	12,344	5,86
6	5	5	15,344	5,86
7	6	3	10,093	8,67
8	6	4	13,062	5,92
9	6	5	16,062	2,40
10	8	3	11,234	0,01
11	8	5	17,562	0,011
12	8	7	23,875	0,008
13	10	3	13,797	2,25
14	10	5	22031	2,26
15	10	8	35860	2,26
16	14	3	17,453	0,0045
17	14	4	23,328	0,0055
18	14	5	28,985	0,0031

На рисунках 4, 5 приведены зависимости времени обучения и среднеквадратичной погрешности, построенные по данным таблицы 1. Так как минимальное и максимальное значения ошибки в таблице 1 отличается на несколько порядков, значения ошибки по оси ординат отложены в логарифмическом масштабе.

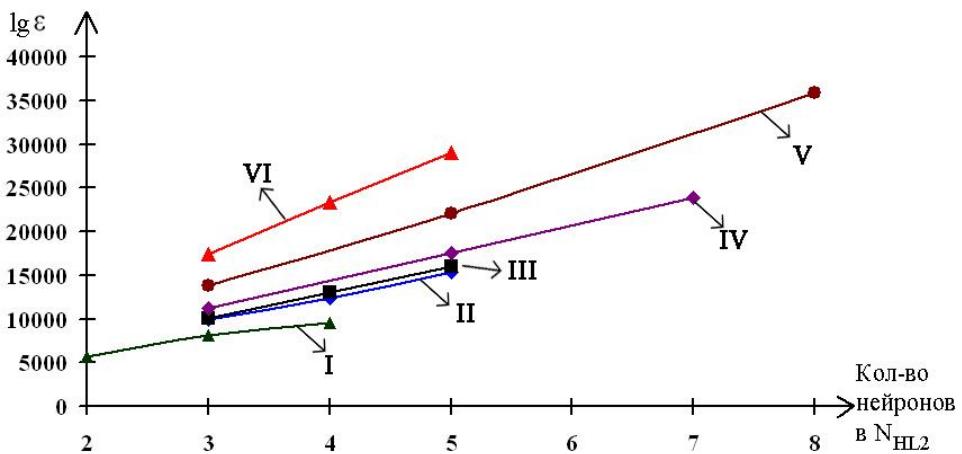


Рис. 4. График среднеквадратичной ошибки, полученной в НИНС, как функция от количества нейронов во втором скрытом слое: I — сеть с 4 ФП; II — сеть с 5 ФП; III — сеть с 5 ФП; IV — сеть с 8 ФП; V — сеть с 10 ФП; VI — сеть с 14 ФП

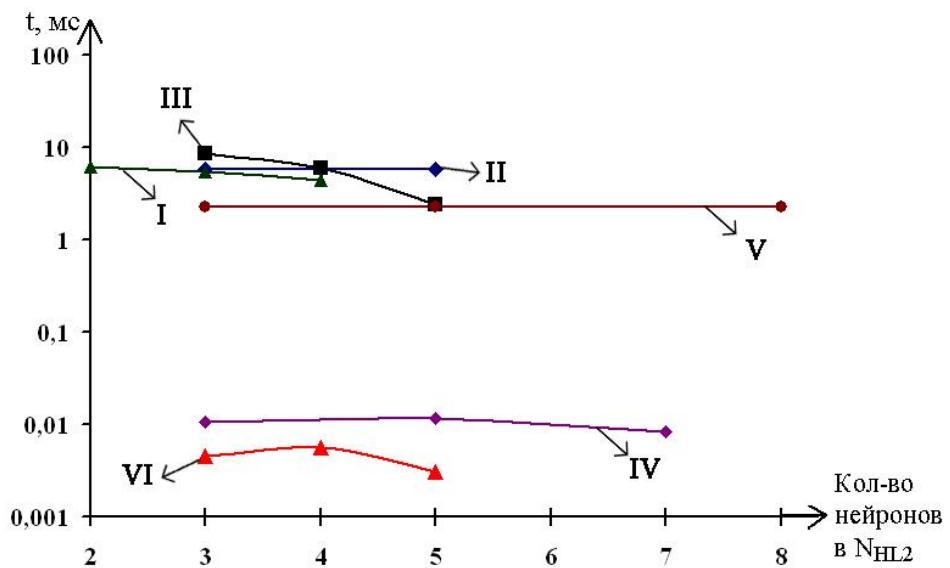


Рис. 5. График зависимости времени обучения НИНС, как функция от количества нейронов во втором скрытом слое: I — сеть с 4 ФП; II — сеть с 5 ФП; III — сеть с 5 ФП; IV — сеть с 8 ФП; V — сеть с 10 ФП; VI — сеть с 14 ФП

Из приведенных зависимостей рис. 4, 5 видно, что наибольшее влияние на время обучения и величину погрешности оказывает количество нейронов в первом скрытом слое.

Точность прогноза, получаемого с помощью предложенной НИНС, может быть повышена за счет настройки функций принадлежности для скрытых слоев. Так, например, незначительная модификация параметров функций принадлежности термов первого скрытого слоя, показанная на рисунках 6, 7 для НИНС со структурой 2-5-5-1, позволяет снизить ошибку с 5,86% до 0,11% (версия 1) и 0,19% (версия 2).

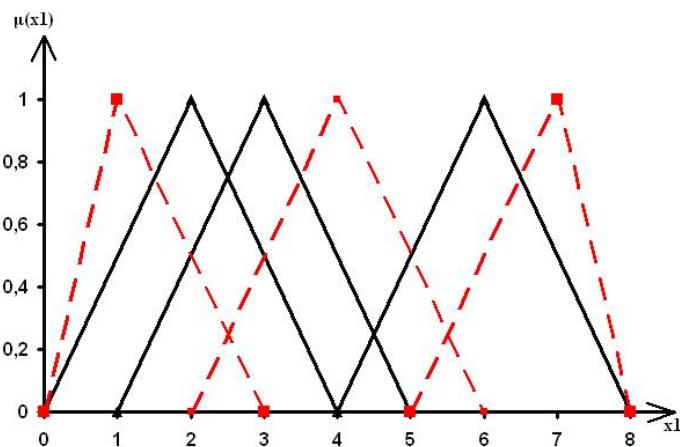


Рис. 6. Функции принадлежности для трех термов первой переменной:
сплошная линия – версия 1; пунктира – версия 2

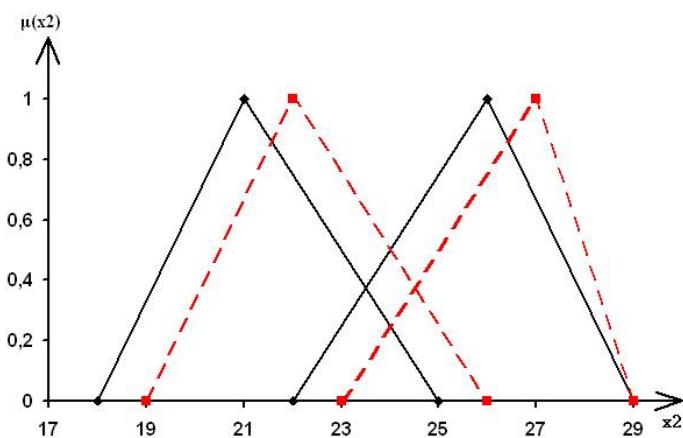


Рис. 7. Функции принадлежности для двух термов второй переменной:
сплошная линия – версия 1; пунктира – версия 2

Выводы. Исключение слоя нечетких правил из структуры нечеткой искусственной нейронной сети, построенной по структуре персептрона с двумя скрытыми слоями, позволяет упростить процедуру ее обучения и не ограничивает исследователя в количестве нечетких нейронов. Исключение слоя правил позволит также отказаться от субъективной составляющей, вносимой экспертами. При этом наличие нечеткости в первом скрытом слое обеспечивает возможность обучения нейронной сети при малом объеме исходных данных.

В дальнейших исследованиях авторы предполагают определить правила настройки функций принадлежности в скрытых слоях нечеткой искусственной нейронной сети без правил.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Водоподготовка : Справочник для профессионалов. / под ред. д-ра техн. наук, действит. чл. Акад. пром. экологии С. Е. Беликова. – Москва : Аква-Терм, 2007. – 240 с.
2. Бизянов Е. Е. Прогнозирование затрат на электроэнергию угледобывающих предприятий в современных условиях / Е. Е. Бизянов, А. А. Гутник // Экономический вестник ДонГТИ. – Алчевск, 2019. – № 2. – С. 34–45.

3. Хайкин С. Нейронные сети : Полный курс / Саймон Хайкин ; пер. с англ Н. Н. Куссуль, А. Ю. Шелестова под ред. Н. Н. Куссуль. – Второе изд. – Москва : Вильямс, 2006. – 1104 с.
4. Борисов В. В. Нечеткие модели и сети / В. В. Борисов, В. В. Круглов, А. С. Федулов. – 2-е изд., стереотип. – Москва : Горячая линия–Телеком, 2012. – 284 с.
5. Андриевская Н. В. Особенности применения нейро-нечетких моделей для задач синтеза систем автоматического управления / Н. В. Андриевская, А. С. Резников, А. А. Черанев // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 11-7. – С. 1445–1449.
6. Sulzberger S. FUN: Optimization of Fuzzy Rule Based Systems Using Neural Networks / S. Sulzberger, N. Tschichold-Gitman, S. Vestli // IEEE International Conference on Neural Networks (ICNN-93). – San Francisco, California, 1993. – Vol. 1 – P. 312–316
7. Гейдаров П. Ш. Нейронные сети на основе метрических методов распознавания в применении к задачам с нечеткими выводами / П. Ш. Гейдаров // Искусственный интеллект и принятие решений. – 2010. – № 2. – С. 77–88
8. Бизянов Е. Е. Метод получения параметров функций принадлежности нечетких множеств на основе реальных данных для систем автоматизированной обработки информации / Е. Е. Бизянов, А. А. Гутник // Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. – Махачкала, 2019. – № 46 (3). – С. 79–86.

Поступила в редакцию 27.01.2021 г.

A FUZZY ARTIFICIAL NEURAL NETWORK WITHOUT RULES FOR FORECASTING AND CONTROL TASKS

Bizianov E.E., Gutnik A.A., Pogorelov R.N.

The paper considers the task of predicting parameters in the construction of forecasting and control systems. Existing solutions of using fuzzy neural networks are considered and analyzed. The structure of a fully connected fuzzy artificial neural network without a layer of fuzzy rules is proposed. Proposed structure corresponds to the "classical" multilayer perceptron. Testing was carried out in terms of training time and root mean square error. Various structures of the proposed fuzzy artificial neural network were tested for predicting the power consumed by a coal mining enterprise. The results obtained make it possible to choose the number of neurons in hidden layers depending on the required accuracy of prediction of the output parameter

Keywords: fuzzy logic, fuzzy artificial neural network, membership function, perceptron, term.

Бизянов Евгений Евгеньевич

доктор экономических наук, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры специализированных компьютерных систем ГОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический институт»,
ЛНР, г. Алчевск.
E-mail: bpeelecs@gmail.com

Bizianov Evgenii Evgenevich

Doctor of Economic Sciences, Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor at Department of Specialized Computer Systems of Donbass State Technical Institute,
LPR, Alchevsk.

Гутник Артур Альбертович

ассистент кафедры специализированных компьютерных систем ГОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический институт»,
ЛНР, г. Алчевск.
E-mail: hutnik.aa@gmail.com

Gutnik Artur Albertovich

Assistant Lecturer at Department of Specialized Computer Systems of Donbass State Technical Institute,
LPR, Alchevsk.

Погорелов Роман Николаевич

старший преподаватель кафедры специализированных компьютерных систем ГОУ ВО ЛНР «Донбасский государственный технический институт»,
ЛНР, г. Алчевск.
E-mail: pogorelovrn@gmail.com

Pogorelov Roman Nikolaevich

Senior Lecturer at Department of Specialized Computer Systems of Donbass State Technical Institute,
LPR, Alchevsk.

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 517.997.56:669.18.046.5:536.42

МИНИМИЗАЦИЯ ТЕРМОНАПРЯЖЕНИЙ И ДИСПЕРСНОСТИ В НЕПРЕРЫВНОМ СЛИТКЕ ПРИ ОГРАНИЧЕНИИ НА ТЕМПЕРАТУРУ

© 2021 Володин Н.А.

Рассматривается задача минимизации термоапрессий и дисперсности дендритной структуры в непрерывном затвердевающем стальном слитке цилиндрического сечения при ограничении на температуру выхода слитка из зоны вторичного охлаждения (ЗВО). Для решения применен прямой экстремальный подход. Получены оптимальные тепловые потоки в ЗВО, обеспечивающие минимальные термоапрессии и дисперсность дендритов.

Ключевые слова: минимизация, градиенты температур, ограничения, оптимальные режимы.

Введение. Вторичное охлаждение является одним из способов влияния на качество непрерывных заготовок. Анализ производственных и теоретических данных показывает, что наиболее часто используется схема вторичного охлаждения, при которой температура поверхности заготовки плавно снижается до требуемой температуры. Отрицательной стороной таких режимов охлаждения является наличие значительных градиентов температур внутри затвердевающей корочки. Уменьшить вероятность образования механических дефектов в слитке возможно посредством организации оптимальных режимов охлаждения, при которых будут минимальными термоапрессия по всему объему затвердевшей части слитка. В данной работе рассмотрена задача определения оптимальных режимов затвердевания слитка с учетом ограничений на дисперсность и температуру выхода слитка из ЗВО.

Основная часть. Для определения оптимальных режимов охлаждения необходимо минимизировать соответствующие функционалы, определяющие качество металла. Например, для цилиндрического слитка можно требовать [1-2]:

$$J_0 = \int_0^R \int_0^Z \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 \Theta(r - r_s) r dr dz \rightarrow \min. \quad (1)$$

Важным показателем качества литого металла является плотность кристаллического строения, т.е. дисперсность дендритной структуры, которая формируется при затвердевании в двухфазной переходной зоне. Повышенная дисперсность дендритного строения ухудшает качество слитка и для того чтобы добиться оптимального распространения дендритных осей, необходимо минимизировать функционал, характеризующий степень дисперсности дендритной структуры [1, 2]:

$$J_1 = \int_0^R \int_0^Z \left(\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right)^{1/2} \Theta(r - r_L) \Theta(r - r_S) r dr dz \rightarrow \min. \quad (2)$$

Распределение температур в заготовке цилиндрического сечения описывается уравнением:

$$c\rho V \frac{\partial T}{\partial z} - \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) = 0, \quad (r, z) \in \Sigma = [0, R] \times [0, Z],$$

где $T(r, z)$ – температура слитка, V – скорость литья (скорость вытягивания слитка), $\rho(T)$ – плотность слитка, $C(T)$ и $\lambda(T)$ – эффективные теплоемкость и теплопроводность, которые в жидкой, двухфазной и твердой зонах равны:

$$\rho = \rho_L(1 - \xi) + \rho_S \xi; \quad \lambda = \lambda_L(1 - \xi) + \lambda_S \xi;$$

$$c = \begin{cases} c_L, & T \geq T_L, \\ c_L(1 - \xi) + c_S \xi - W \frac{\partial \xi}{\partial T}, & T_S < T < T_L, \\ c_S, & T < T_S. \end{cases} .$$

Переменная ξ – доля твердой фазы, определяется по уравнению для неравновесного рычага:

$$\xi = 1 - \left(\frac{T_0 - T}{T_0 - T_L} \right)^{\frac{1}{1-k_0}}.$$

Границные условия имеют вид:

$$\left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\substack{r=0 \\ 0 < z < Z}} = 0; \quad \left. T \right|_{\substack{0 \leq r \leq R \\ z=0}} = T_0;$$

$$\left. \lambda_s \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\substack{r=R \\ 0 < z < Z_c}} = -\gamma(T - T_c); \quad \left. \frac{\partial T}{\partial r} \right|_{\substack{r=R \\ z_c < z < Z}} = u(z). \quad (3)$$

Задача формулируется следующим образом. Необходимо найти оптимальный поток тепла $u(z)$ в граничном условии (3), который минимизирует уровень дисперсности в форме функционала J_1 . При этом необходимо получить и минимальные градиенты температур в твердой части металла. Кроме того, необходимо учесть ограничение на температуру выхода металла из ЗВО, которая не должна превышать $T_{\max} = 1223 K$. Последнее ограничение учитывалось в виде штрафного

функционала $J_2 = \int_0^R I_F dr$, где $I_F = (T - T_{\max})^2$ если $T > T_{\max}$, иначе $I_F = 0$.

Таким образом, получаем функционал $J = \chi_0 J_0 + \chi_1 J_1 + \chi_2 J_2$, т.е.

$$J(u) = \chi_0 \int_0^R \int_0^Z \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 \Theta(r - r_S) r dr dz + \chi_1 J_1 + \chi_2 J_2. \quad (4)$$

Для определения оптимальных режимов охлаждения применен прямой экстремальный подход [3, 4], основанный на непосредственной минимизации целевого функционала J методом с регулируемым направлением спуска относительно градиента ∇J :

$$u^{k+1}(z) = u^k(z) - b^k \alpha^k(z) \nabla J(z), \quad (5)$$

где b^k - шаг спуска в направлении $\alpha^k \nabla J^k$. Функция $\alpha^k(z)$ регулирует направление спуска с целью обеспечения равномерной сходимости к оптимальному значению функции $u(z)$. В работе она вычислялась на первой итерации из выражения [3, 4]:

$$\alpha(z) = \left| \frac{0,2u^0(z)}{\nabla J^0(z)} \right|. \quad (5)$$

Градиент целевого функционала $J(u)$ можно найти, применяя модифицированный метод множителей Лагранжа [4]:

$$\nabla J = -\lambda f,$$

где множитель $f(r, z)$ – это решение сопряженной задачи:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \lambda \frac{\partial f}{\partial r} \right) + c \rho \frac{\partial f}{\partial z} - \frac{\partial \lambda}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r} \frac{\partial f}{\partial r} - V \frac{\partial c \rho}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial z} f + A = 0, \quad (r, z) \in \Sigma, \quad (6)$$

$$A = \left\{ \Theta(r - r_L) \Theta(r - r_S) r \left[\frac{\partial}{\partial r} \left(B \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(B \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] \right\} + B \frac{\partial T}{\partial r} (\delta(r - r_L) + \delta(r - r_S)) +$$

$$\text{где } + 2\chi_0 \left[\left(r \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{\partial T}{\partial r} \right) \Theta(r - r_S) + r \frac{\partial T}{\partial r} \delta(r - r_S) \right] = 0,$$

$$B = \chi_1 \left[\left(\frac{\partial T}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right)^2 \right]^{-\frac{1}{2}},$$

с граничными условиями:

$$\begin{aligned} f \Big|_{\substack{0 < r < R \\ z=Z}} &= -\frac{B \frac{\partial T}{\partial z} \Theta(r - r_S) \Theta(r - r_L)}{c \rho} - \frac{2\chi_2}{c \rho} (T - T_{\max}), \\ \frac{\partial f}{\partial r} \Big|_{\substack{r=0 \\ z_c < z < Z}} &= 0, \quad \lambda_s \frac{\partial f}{\partial r} \Big|_{\substack{r=R \\ z_c < z < Z}} = -(2\chi_2 + B \Theta(r - r_S) \Theta(r - r_L)) \frac{\partial T}{\partial r}. \end{aligned} \quad (7)$$

Проанализируем возможность определения оптимальных режимов охлаждения $u(z)$ для разных значений весовых коэффициентов χ_0, χ_1, χ_2 .

Пусть $\chi_1 = \chi_2 = 0$. Тогда задача заключается в определении такого теплового потока $u(z)$ в зоне вторичного охлаждения при реализации которого в твердой части слитка будут наблюдаться минимальные градиенты температур. Очевидно, что в этом случае минимум функционала (4) достигается при $\partial T / \partial r = 0$. Это означает, что

минимизация функционала J обеспечит оптимальный теплоотвод, при котором исчезнет твердая фаза, слиток перейдет в двухфазное состояние. Поэтому, результаты минимизации функционала J при $\chi_1 = \chi_2 = 0$ не представляют практического интереса.

Задачу минимизации уровня дисперсности J_1 без ограничений, т.е. при $\chi_0 = \chi_2 = 0$, нельзя считать корректно поставленной. Дело в том, что сопряженная задача (6), (7) имеет нетривиальное (ненулевое) решение только в области $z_c < z < z_s$, поскольку $f(r, z)$ полностью определяется свободным членом А, который в данной области ненулевой. Поэтому определить оптимальный тепловой поток $u(z)$ возможно только в области $z_c < z < z_s$. В области $z > z_s$ задача не управляема. В связи с этим, рассмотрим результаты минимизации дисперсности дендритной структуры с ограничениями на градиенты температур в твердой корочке слитка и температуру выхода металла из ЗВО.

Результаты получены со следующими значениями параметров. Длина ЗВО $Z = 15\text{м}$, длина кристаллизатора $z_c = 1\text{м}$, температура воды в кристаллизаторе $T_c = 20^\circ\text{C}$, скорость литья $V = 0,7\text{ м/мин}$, диаметр слитка $D = 0,2\text{м}$ из стали СТЗ, равновесный коэффициент распределения примесей $k_0 = 0,4$. Начальное приближение потока $u_0 = 400\text{ кДж/(м}^2 \cdot \text{с)}$.

Оптимальный тепловой поток при коэффициенте теплопередачи $\gamma = 800\text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{с)}$ и весовых коэффициентах $\chi_0 = 1$, $\chi_1 = 2 \cdot 10^5$, $\chi_2 = 5 \cdot 10^3$ изображен на рисунке 1 (кривая 1).

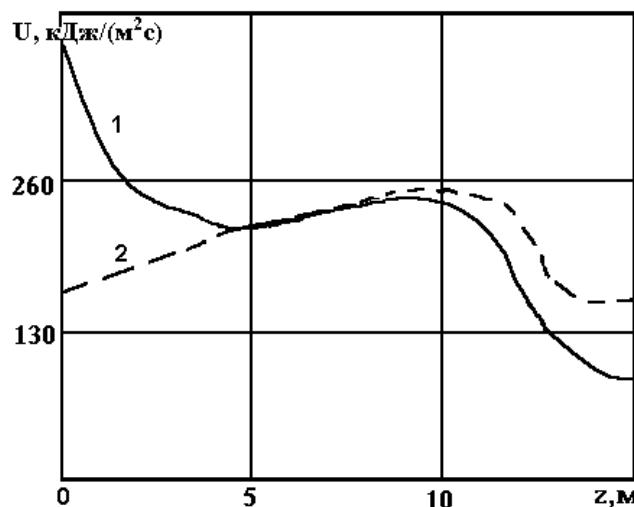


Рис. 1. Оптимальные режимы охлаждения непрерывного слитка:

1. При $\chi_0 = 1$; $\chi_1 = 2 \cdot 10^5$; $\chi_2 = 5 \cdot 10^3$.

2. При $\chi_0 = 1$; $\chi_1 = 0$; $\chi_2 = 5 \cdot 10^3$.

Минимизирующий алгоритм (5) практически закончил сходимость к 19-й итерации. В результате минимизации функционала J он уменьшился в 1,03 раз, градиенты температур уменьшились в 2,25 раза, степень дисперсности увеличилась в 1,13 раза.

Для того чтобы показать влияние учета дисперсности дендритов на оптимальное решение были проведены расчеты минимизации J при отсутствии J_1 , т.е. при $\chi_0 = 1$, $\chi_1 = 0$ и $\chi_2 = 5 \cdot 10^3$. Кривая 2 показывает полученный оптимальный поток. При этом J за те же 19 итераций уменьшился в 1,91 раз, градиенты температур уменьшились в 2,51 раза. Уровень дисперсности полученного оптимального режима охлаждения вырос в 1,08 раз по сравнению с предыдущим оптимальным режимом. Из сравнения кривых видно, что требование минимизации дисперсности J_1 существенно влияет на оптимальное решение в начале ЗВО. Тепловой поток, без требования минимальности J_1 , плавно возрастает и обеспечивает более низкие градиенты температур по сравнению с первым решением.

На выходе из ЗВО вблизи поверхности слитка, т.е. при $r > 0,06$ и $z = Z$, ограничение на температуру в виде штрафа I_F не нарушается. Это означает, что поток тепла в данной области может быть снижен для уменьшения градиентов температур, что и подтверждает полученный режим охлаждения в заключении ЗВО (кривая 2).

Выводы. Таким образом, сформулирована и решена задача оптимизации теплового потока из ЗВО цилиндрического слитка. Полученные тепловые потоки обеспечивают минимальные градиенты температур в твердой корочке слитка и минимальную дисперсность дендритов с требуемой температурой поверхности слитка на выходе из ЗВО.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Соболев В. В. Термофизика затвердевания металла при непрерывном литье / В. В. Соболев, П. М. Трефилов. – Москва : Металлургия, 1988. – 160 с.
2. Соболев В. В. Оптимизация тепловых режимов затвердевания расплавов / В. В. Соболев, П. М. Трефилов ; под ред. В. В. Мечева. – Красноярск : Изд-во Краснояр. ун-та, 1986. – 152 с.
3. Огурцов А. П. Прямая оптимизация теплофизических процессов / Ф. В. Недопекин, В. К. Толстых, Н. А. Володин. – Донецк : Юго-Восток, 1997. – 150 с.
4. Толстых В. К. Прямой экстремальный подход для систем с распределенными параметрами / В. К. Толстых. – Донецк : Юго-Восток, 1997. – 177 с.

Поступила в редакцию 12.01.2021 г.

MINIMIZATION OF THERMAL STRESSES AND DISPERSION IN CONTINUOUS INGOT WITH TEMPERATURE LIMITED

Volodin N.A.

The minimization task for a thermal stresses and dispersion of dendrite structure in a solidifying cylindrical continuous steel ingot is considered. The limitations on temperature gradients and temperature at end of ingot are used. To solving optimization problem is applied the direct extreme approach. The optimum heat flow in the second cooling zone is obtained. The optimum solution gives us the minimum of a thermal stresses and dispersion of dendrite structure.

Keywords: minimization, temperature gradients, limitations, optimal modes.

Володин Николай Александрович

кандидат физико-математических наук, доцент, доцент кафедры компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: nvolodin@yandex.ru

Volodin Nikolai Aleksandrovich

Candidate of Phisico-Mathematical Sciences, Docent, Associate Professor at Department of Computer Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОНВЕКТИВНОГО ДВИЖЕНИЯ РАСПЛАВА НА ФУТЕРОВОЧНЫЙ СЛОЙ СТЕНКИ КОВША-ПЕЧИ

© 2021 *Беззуб А.А.*

Данная статья посвящена вопросам моделирования гидродинамических и теплофизических процессов в агрегате ковш-печь (АКП). В настоящей работе представлены результаты исследования футеровочного слоя стенки ковша с помощью методов численного моделирования, а именно воздействие конвективного движения (вихря) на футеровку.

Ключевые слова: агрегат ковш-печь, численное моделирование, конвективное движение, вихрь, футеровочный слой.

Введение. Агрегат ковш-печь входит в составную и неотъемлемую часть конструкции установок внепечной обработки (доводки) стали. АКП работает с агрессивной средой, при высоких температурах и давлении и служит для доводки стали по химическом составу и температуре. В нем проходят такие технологические операции, как: раскисление, легирование, десульфурация, гомогенизация, вакуумирование и прочие процессы. Продувка (барботаж) расплава позволяет быстро перемешать металл для достижения его однородности по составу и температуре по всему объему ковша. Она находит в современной металлургии все более широкое применение. Возникающие в агрегате гидродинамические и теплофизические процессы недостаточно изучены, а это зачастую приводит к выбору неверных дутьевых режимов, а, следовательно, и к снижению качества отпускаемой продукции. Поэтому, изучение характера гидродинамических потоков при перемешивании расплава представляет большой интерес для ковшевой металлургии [1].

Несмотря на широкое внедрение АКП в производство, существует ряд проблем, решение которых существенно влияет на качество металла и износостойкость самого агрегата. Одной из таких проблем является прожиг футеровочного слоя. В настоящее время доля затрат на оgneупоры для АКП может достигать 1,5% себестоимости металла даже без учета затрат на ремонты и потери при простоях выведенных на ремонт агрегатов [2]. Поэтому рациональное применение данного ресурса является немаловажной задачей в ковшевой металлургии. Однако решение данного вопроса с помощью лабораторного или промышленного эксперимента не эффективно и затратно. Таким образом целью данной работы является исследование футеровочного слоя АКП с помощью методов численного моделирования.

Для численной реализации модели АКП был разработан разностный метод расчета для решения системы двухмерного нелинейного дифференциального уравнения теплопроводности в частных производных. Построен вычислительный алгоритм, численно реализующий математическую модель на основе конечно-разностной аппроксимации по явной схеме с привлечением метода прогонки [3].

Постановка задачи. В представленной работе рассматривается ковш-печь Енакиевского металлургического завода. От завода были получены следующие входные данные, представленные в таблице 1 и на рис. 1 и 2.

Таблица 1. Исходные заводские данные

Высота АКП, м	4,010
Радиус, м	3,660
Толщина рабочей футеровки, м	0,170
Диаметр электродов, м	0,45
Распад электродов, м	0,85
Начальная температура металла, К	1850
Режим продувки	Обе фурмы
Средний газорасход, м ³ /ч	30
Время прогонки, с	2700

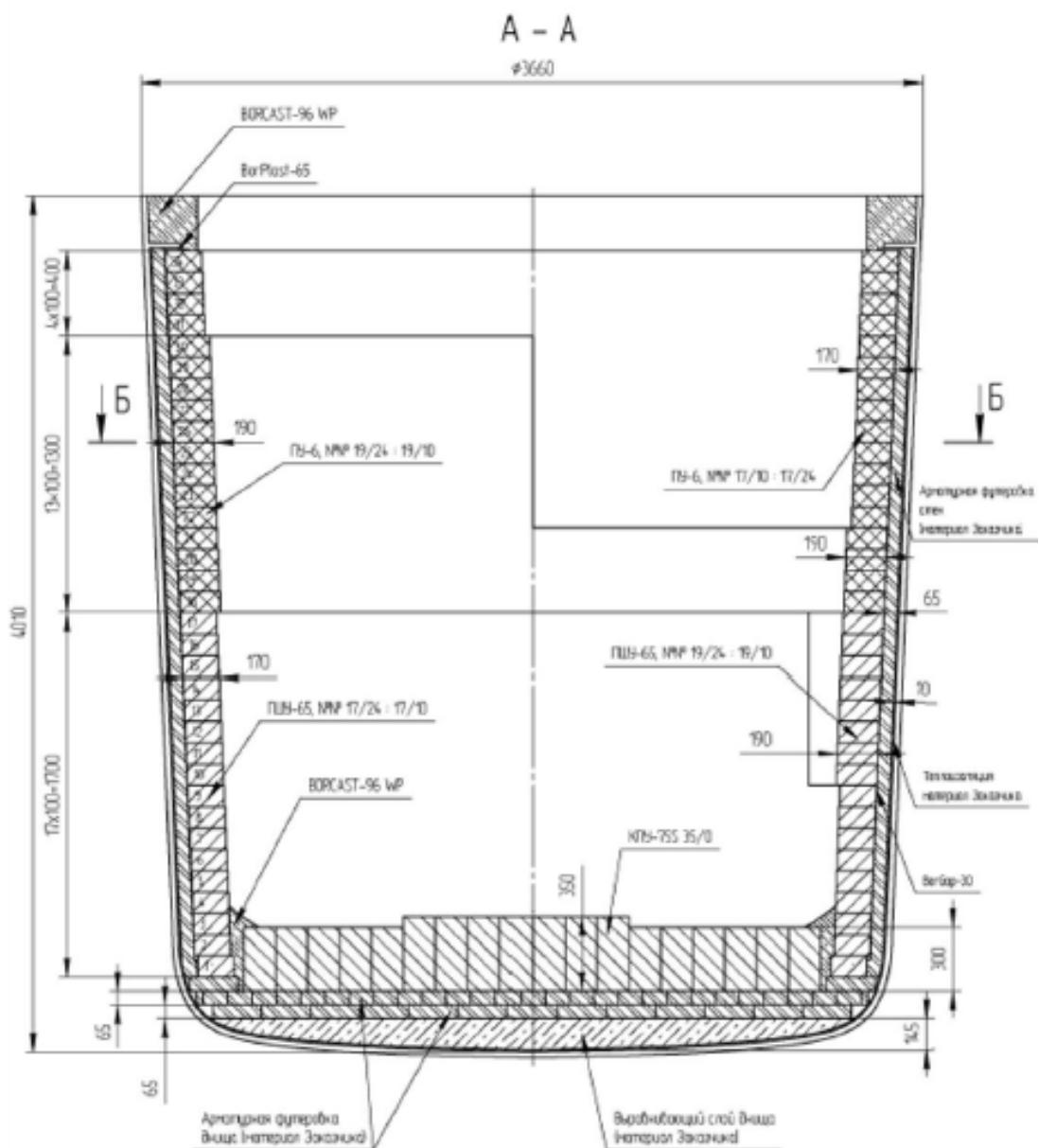


Рис. 1. Схема АКП

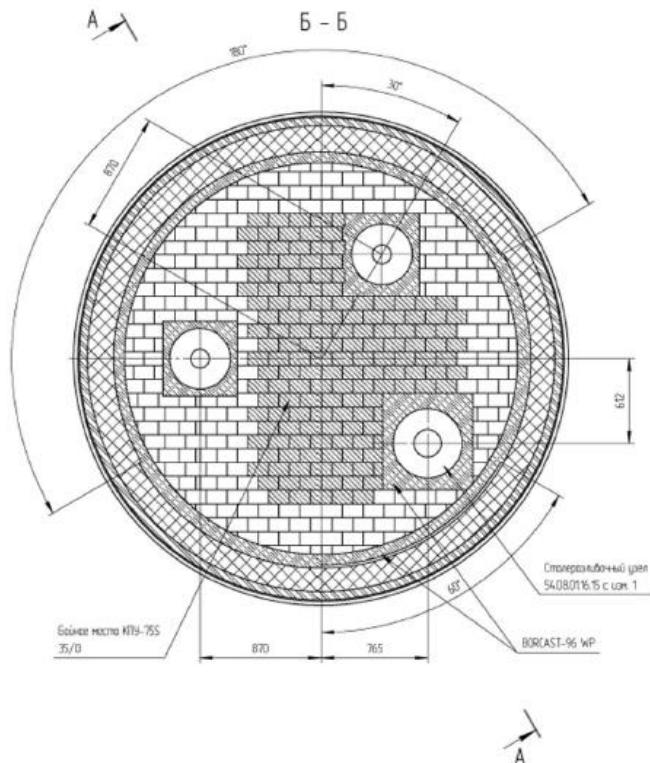


Рис. 2. Схема расположения продувочных устройств

Гидродинамические и теплофизические процессы в сталеразливочном ковше описываются [4]:

Уравнением теплопроводности:

$$c\rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \left(u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] = \lambda \Delta T. \quad (1)$$

Уравнением Навье-Стокса в трех компонентах и уравнением неразрывности:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial u^2}{\partial x} + \frac{\partial uv}{\partial y} + \frac{\partial uw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial uv}{\partial x} + \frac{\partial v^2}{\partial y} + \frac{\partial vw}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right); \quad (3)$$

$$\frac{\partial w}{\partial t} + \frac{\partial uw}{\partial x} + \frac{\partial vw}{\partial y} + \frac{\partial w^2}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) + \vec{g} \beta \Delta T + \vec{g} \beta_\Gamma; \quad (4)$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0, \quad (5)$$

где c – теплоемкость при постоянном давлении, Дж/кг, ρ - плотность расплава, кг/м³; T – текущая температура, ^0C ; t – текущее время; u , v , w – компоненты скорости вдоль координат x, y, z соответственно, м/с; λ - коэффициент теплопроводности, Дж/кгК; P – давление, Н/м²; g – ускорение свободного падения, м/с²; β - коэффициент объемного расширения, 1/К; β_Γ – коэффициент газосодержания, определенный в работе [1].

На внутренних стенах АКП выполняется условия прилипания и непроницаемости для компонент скорости. Между теплоизолирующими слоями стенок АКП выполняются граничные условия 4 рода:

$$\lambda_i \frac{\partial T}{\partial n} = \lambda_{i+1} \frac{\partial T}{\partial n}, T_i = T_{i+1}, \quad (6)$$

где: λ_i - коэффициент теплопроводности i -го слоя футеровки, Вт/м·К.

На внешней границе стенок АКП выполняются граничные условия вида:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha(T_b - T_{cp}), \quad (7)$$

где: T_b - температура брони; T_{cp} - температура окружающей среды; α – коэффициент теплообмена. Коэффициент α находится по формуле М.А. Михеева $Nu = C(Gr Pr)^n$ [5].

В основе метода решения лежит «двуихполовой метод» или вихрь ω - функция тока ψ . Из уравнений (2) – (4) исключается давление. Для этого: первое уравнение дифференцируется по y , второе уравнение по x , и вычитается из второго уравнения первое; дифференцируется первое уравнение по z , а третье уравнение по x , вычитается из первого уравнения третье; дифференцируется второе уравнение по z , а третье уравнение по y , вычитается из третьего уравнения второе.

Вектор вихря определяется следующим образом:

$$\omega = \nabla \times \vec{V}; \quad (8)$$

или (в покомпонентной записи через орты i, j, k) в виде: $\omega = \omega_x \vec{i} + \omega_y \vec{j} + \omega_z \vec{k}$, где:

$$\omega_x = \frac{\partial w}{\partial y} - \frac{\partial v}{\partial z}; \quad \omega_y = \frac{\partial u}{\partial z} - \frac{\partial w}{\partial x}; \quad \omega_z = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}. \quad (9)$$

Затем решается уравнение для вихря скорости [4]. Значения скорости определяются из решений трех уравнений Пуассона, которые легко выводятся из уравнения неразрывности (5) с учетом определения вихря скорости (8) $\nabla^2 \vec{V} = \nabla \times \omega$, или в скалярной форме:

$$\Delta u = \frac{\partial \omega_z}{\partial y} - \frac{\partial \omega_y}{\partial z}; \quad \Delta v = \frac{\partial \omega_x}{\partial z} - \frac{\partial \omega_z}{\partial x}; \quad \Delta w = \frac{\partial \omega_y}{\partial x} - \frac{\partial \omega_x}{\partial y}. \quad (10)$$

Граничные условия для вихря скорости следующие:

• условия непроницаемости и прилипания при $x = const$ с учетом условий (9) записываются в виде: $\omega_x = 0; \quad \omega_y = -\partial w / \partial x; \quad \omega_z = -\partial v / \partial x$;

• условия непроницаемости и прилипания при $y = const$:

$$\omega_x = \partial w / \partial y; \quad \omega_y = 0; \quad \omega_z = -\partial u / \partial y;$$

• условия непроницаемости и прилипания при $z = const$:

$$\omega_x = -\partial v / \partial z; \quad \omega_y = \partial u / \partial z; \quad \omega_z = 0;$$

Наиболее приемлемый метод решения уравнений переноса, применяемый для широкого класса задач механики сплошных сред – метод конечных разностей (метод сеток). В данном методе область непрерывного изменения аргумента заменяется конечным дискретным множеством точек (узлов), которые образуют пространственно-временную разностную сетку [6].

Применение неявной разностной схемы для уравнений переноса позволит повысить устойчивость алгоритма, а также увеличить допустимые значения шага Δt . Несмотря на то, что при переходе к неявным аппроксимациям увеличивается время счета на каждом слое, общий расчет машинного времени сокращается из-за уменьшения числа расчетных слоев. Неявные схемы имеют более сложную конструкцию, чем явные, поэтому требуют дополнительных усилий при разработке схемы и ее отладке на ЭВМ. Данная схема перспективна в первую очередь для решения стационарных задач по методу установления и при расчете крупномасштабных нестационарных процессов, когда выбор большого шага по времени не противоречит физическому смыслу.

Результаты численного моделирования. На рис. 3 представлены остаточные значения температур блоков футеровочного слоя по истечению одной прогонки, полученные в результате экспериментов [7]. Для наглядности полученных результатов произведено масштабирование путем вычета определенного значения температуры – 1269 °C.

Блоки футеровки	Положение вертикали, град.											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
34	3,5939	3,5939	3,5939	3,5939	3,5939	2,4446	2,4446	2,4446	2,4446	2,4446	2,4446	2,4446
33	3,9886	3,9886	3,9886	3,9886	3,9886	3,4292	3,4292	3,4292	3,4292	3,4292	3,4292	3,4292
32	3,6238	3,6238	3,6238	3,6238	3,6238	3,4456	3,4456	3,4456	3,4456	3,4456	3,4456	3,4456
31	3,0748	3,0748	3,0748	3,0748	3,0748	3,0801	3,0801	3,0801	3,0801	3,0801	3,0801	3,0801
30	2,5726	2,5726	2,5726	2,5726	2,5726	2,691	2,691	2,691	2,691	2,691	2,691	2,691
29	2,147	2,147	2,147	2,147	2,147	2,8428	2,8428	2,8428	2,8428	2,8428	2,8428	2,8428
28	1,7899	1,7899	1,7899	1,7899	1,7899	2,0247	2,0247	2,0247	2,0247	2,0247	2,0247	2,0247
27	1,515	1,515	1,515	1,515	1,515	1,7408	1,7408	1,7408	1,7408	1,7408	1,7408	1,7408
26	1,3289	1,3289	1,3289	1,3289	1,3289	1,4907	1,4907	1,4907	1,4907	1,4907	1,4907	1,4907
25	1,2136	1,2136	1,2136	1,2136	1,2136	1,2713	1,2713	1,2713	1,2713	1,2713	1,2713	1,2713
24	1,1474	1,1474	1,1474	1,1474	1,1474	1,0704	1,0704	1,0704	1,0704	1,0704	1,0704	1,0704
23	1,1078	1,1078	1,1078	1,1078	1,1078	0,8801	0,8801	0,8801	0,8801	0,8801	0,8801	0,8801
22	1,0715	1,0715	1,0715	1,0715	1,0715	0,6857	0,6857	0,6857	0,6857	0,6857	0,6857	0,6857
21	1,0209	1,0209	1,0209	1,0209	1,0209	0,4904	0,4904	0,4904	0,4904	0,4904	0,4904	0,4904
20	0,9641	0,9641	0,9641	0,9641	0,9641	0,4525	0,4525	0,4525	0,4525	0,4525	0,4525	0,4525
19	0,956	0,956	0,956	0,956	0,956	0,7817	0,7817	0,7817	0,7817	0,7817	0,7817	0,7817
18	0,8624	0,8624	0,8624	0,8624	0,8624	1,2987	1,2987	1,2987	1,2987	1,2987	1,2987	1,2987
17	0,7993	0,7993	0,7993	0,7993	0,7993	1,8942	1,8942	1,8942	1,8942	1,8942	1,8942	1,8942
16	0,9074	0,9074	0,9074	0,9074	0,9074	2,3225	2,3225	2,3225	2,3225	2,3225	2,3225	2,3225
15	1,0392	1,0392	1,0392	1,0392	1,0392	2,7111	2,7111	2,7111	2,7111	2,7111	2,7111	2,7111
14	1,1094	1,1094	1,1094	1,1094	1,1094	2,9939	2,9939	2,9939	2,9939	2,9939	2,9939	2,9939
13	1,1467	1,1467	1,1467	1,1467	1,1467	5,2279	5,2279	5,2279	5,2279	5,2279	5,2279	5,2279
12	1,2096	1,2096	1,2096	1,2096	1,2096	3,455	3,455	3,455	3,455	3,455	3,455	3,455
11	1,3619	1,3619	1,3619	1,3619	1,3619	3,6249	3,6249	3,6249	3,6249	3,6249	3,6249	3,6249
10	1,6521	1,6521	1,6521	1,6521	1,6521	3,7754	3,7754	3,7754	3,7754	3,7754	3,7754	3,7754
9	1,9497	1,9497	1,9497	1,9497	1,9497	3,9187	3,9187	3,9187	3,9187	3,9187	3,9187	3,9187
8	2,2246	2,2246	2,2246	2,2246	2,2246	4,0741	4,0741	4,0741	4,0741	4,0741	4,0741	4,0741
7	2,4693	2,4693	2,4693	2,4693	2,4693	4,2518	4,2518	4,2518	4,2518	4,2518	4,2518	4,2518
6	2,6644	2,6644	2,6644	2,6644	2,6644	4,4453	4,4453	4,4453	4,4453	4,4453	4,4453	4,4453
5	2,851	2,851	2,851	2,851	2,851	4,6536	4,6536	4,6536	4,6536	4,6536	4,6536	4,6536
4	3,2283	3,2283	3,2283	3,2283	3,2283	4,9491	4,9491	4,9491	4,9491	4,9491	4,9491	4,9491
3	4,1909	4,1909	4,1909	4,1909	4,1909	5,5892	5,5892	5,5892	5,5892	5,5892	5,5892	5,5892
2	7,3942	7,3942	7,3942	7,3942	7,3942	8,1535	8,1535	8,1535	8,1535	8,1535	8,1535	8,1535
1	18,642	18,642	18,642	18,642	18,642	18,039	18,039	18,039	18,039	18,039	18,039	18,039

Рис. 3. Остаточные значения температур футеровочного слоя по истечению одного цикла прогонки

Исходя из рисунка, следует обратить внимание, что ряды значений температур имеют схожий вид в пределах от 0° до 150° и от 180° до 330°.

В секторе от 180° до 330° расположены продувочные фурмы. Можно предположить, что износ стенок ковша напрямую связан с режимом продувки и расположением донных пробок.

Для подтверждения данной теории было исследовано вихревое движение расплава при положении вертикали, находящейся на диагонали $240^\circ - 60^\circ$, представленной зеленым цветом на рис. 4. При исследовании данной области, оси фурм расположены друг против друга относительно выбранной вертикали, рис. 5.

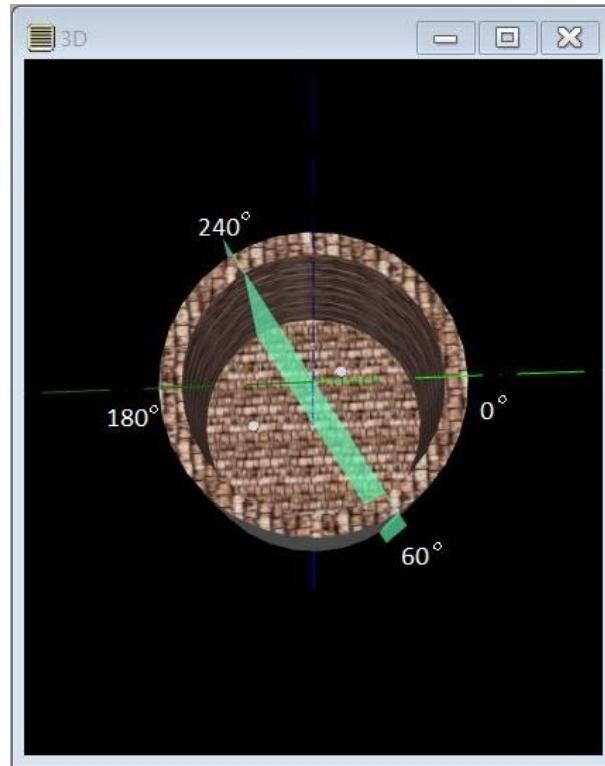


Рис. 4. Исследуемое положение вертикали

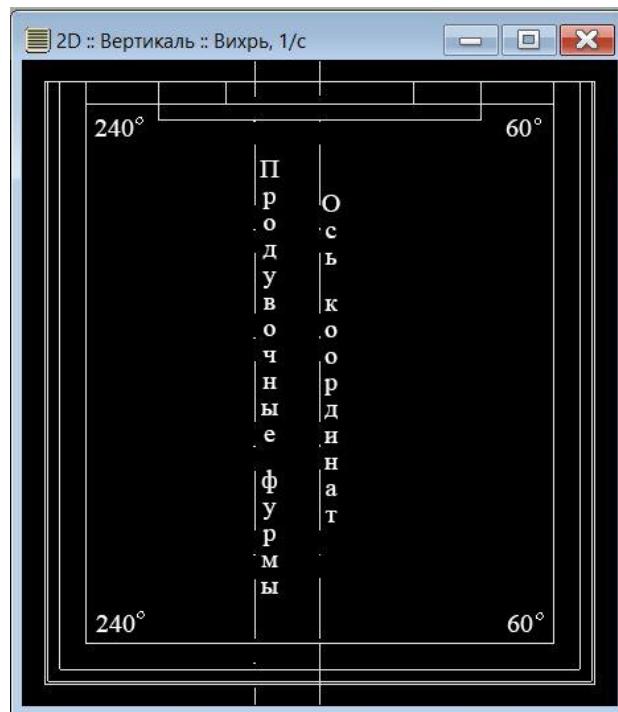
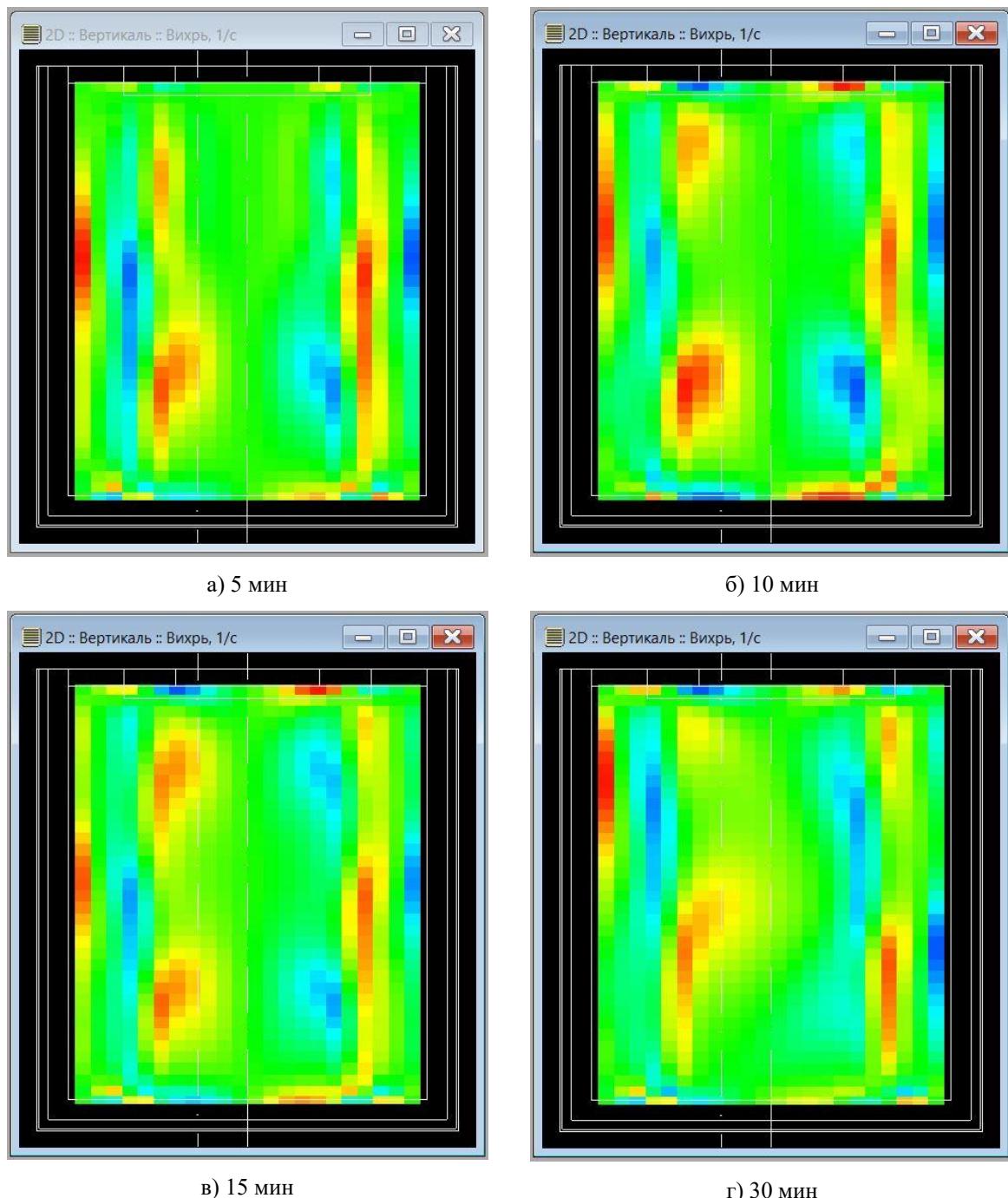


Рис. 5. Расположение фурм при положении вертикали на диагонали $240^\circ - 60^\circ$

Таким образом потоки инертного газа, поступающие из фурм, движутся параллельно. А угловые скорости вращений вихря могут суммироваться при воздействии на стенку ковша. На рис. 6 (а-е) красным представлено максимальное значение вектора угловой скорости вращений вихря, синим – минимальное значение вектора, застойные зоны отображены зеленым цветом.



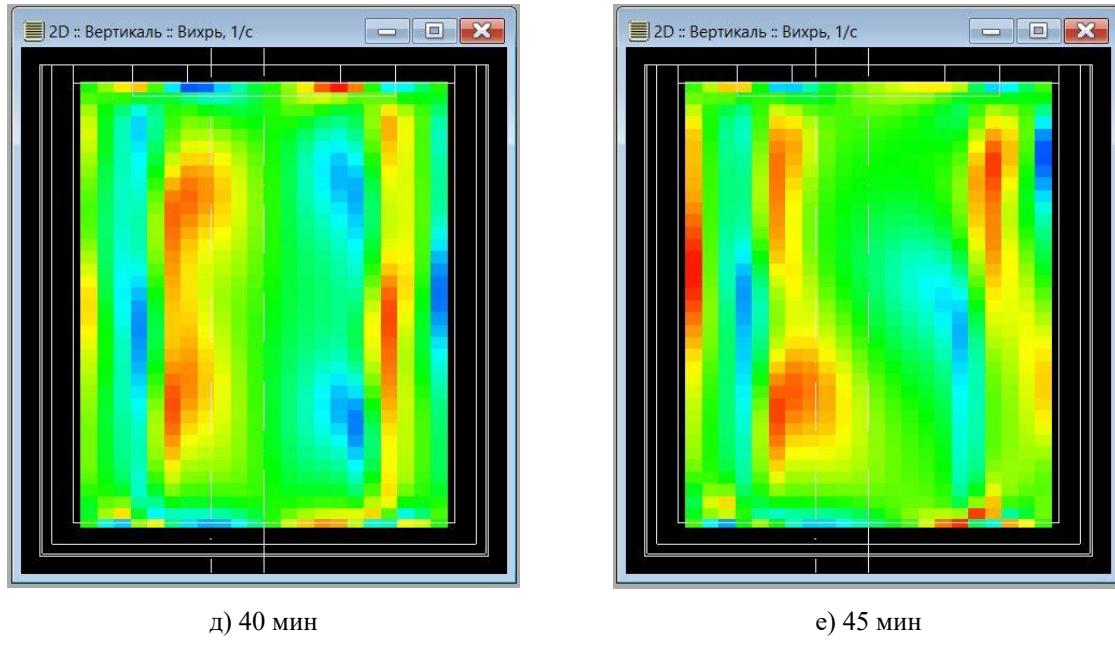


Рис. 6. Значения вихря представленные в цветовом эквиваленте

При исследовании рисунков можно сделать выводы о имеющихся зонах повышенного износа футеровки, образуемых в следствие высоких скоростей движения расплава [8].

При сопоставлении данных со значениями столбца «240°» рис. 3 наблюдаются значительные теплопотери в области 20 блока. А на рис. 6 (а-е) в левой части у стенки ковша, величина модуля угловой скорости вращений вихря достигает максимума, а вектор скорости направлен вверх. Исходя из этого можно сделать вывод, что в данной области и будет предполагаемое максимальное истощение стенки ковша.

В свою очередь, изучая значения столбца 60 градусов, и динамику движения расплава в правой части рис 6 (а-е) было выявлено, что вихревые потоки в этой области воздействуют на более обширную часть стенки ковша-печи, а, следовательно, с меньшей силой, т.к. она рассредоточена.

Выводы. Таким образом в ходе работы было исследовано воздействие конвективного движения расплава на футеровочный слой стенки ковша-печи с помощью методов численного моделирования. В ходе работы были выявлены области максимального воздействия вихря на стенку АКП, которые в свою очередь являются предположительным местом истощения футеровки. Поэтому остается открытым вопрос дальнейшего изучения гидродинамических и теплофизических процессов в ванне АКП, решение которого позволит существенно сократить затраты в области внепечной обработки стали.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Белоусов В. В. Численное моделирование процессов перемешивания при продувке ванны агрегата «ковш-печь» / В. В. Белоусов, Е. И. Куликов, В. Ф. Комаров // Математичне моделювання. – 2007. – № 2 (17). – С. 61–63.
2. Повышение стойкости футеровки агрегатов внепечной обработки стали. / А. А. Метелкин, О. Ю Шешуков, И. В. Некрасов, О. И. Шевченко ; М-во образования и науки РФ ; ФГАОУ ВПО «УрФУ им. первого Президента России Б.Н.Ельцина», Нижнетагил. технол. ин-т (фил.). – Нижний Тагил : НТИ (фил.) УрФУ, 2015. – 144 с.
3. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в агрегате ковш-печь./ А. А. Беззуб, В. В. Белоусов, Ф. В. Недопёкин [и др.] // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2020. – № 3. – С. 66–71.
4. Затвердевание металлов и металлических композиций : учебник / В. А. Лейбензон, В. Л. Пилищенко, В. М. Кондратенко [и др.]. – Киев : Наук. думка, 2009. – 411 с.

5. Белоусов В. В. Основы тепломассопереноса и теплофизика замкнутых объемов / В. В. Белоусов, Н. И. Болонов. – Донецк : Юго-Восток, 2003. – 135 с.
6. Тихонов А. Н. Уравнения математической физики / А. Н. Тихонов, А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1977. – 736 с.
7. Беззуб А. А. Исследование износа футеровочного слоя стенки агрегата ковш-печь./ А. А. Беззуб, Ф. В. Недопёкин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2020. – № 4. – С. 62–67.
8. Филиппов С. И. Развитие учения о кинетике сталеплавильных процессов в СССР / С. И. Филиппов // Металлургия СССР (1917-1957) : [сборник статей] / под ред. акад. И. П. Бардина. – Москва : Металлургия, 1958. – Т. 1. – С. 360–380.

Поступила в редакцию 05.02.2021 г.

RESEARCH OF THE IMPACT OF CONVECTIVE MOTION OF THE MELT ON THE LINING LAYER OF THE LADLE-FURNACE

Bezzub A.A.

This article is devoted to the issues of modeling hydrodynamic and thermophysical processes in a ladle-furnace unit (ACF). This paper presents the results of studying the wall lining layer using numerical simulation methods, namely, the effect of convective motion on the lining.

Keywords: ladle-furnace unit, numerical modeling, convective motion, vortex, lining layer.

Беззуб Александра Андреевна

аспирант заочной формы обучения кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л. Повха, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: apilipec@mail.ru

Bezzub Alexandra Andreevna

Post-graduate student of extramural studies at the Department of Physics of Nonequilibrium Processes, Metrology and Ecology named after I.L. Povha of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 504.3.054

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ПАВ И ТЕМПЕРАТУРЫ НА АТМОСФЕРНЫЙ ВОЗДУХ В БОРФТОРИСТОВОДОРОДНОМ ЭЛЕКТРОЛИТЕ ПРИ УТИЛИЗАЦИИ СВИНЦОВЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

© 2021 *Рипная М.М., Башевая Т.С., Сердюк А.И.*

В данной статье рассмотрены закономерности влияния концентрации поверхностно-активных веществ, а именно сульфидно-спиртовой барды и температуры, на выбросы фторидов и свинца с поверхности борфтористоводородного электролита, а также интенсивности процесса для электрохимической переработки отработавших свой срок службы свинцово-кислотных аккумуляторов.

Ключевые слова: свинцово-кислотные аккумуляторы, борфтористоводородный электролит, выбросы, поверхностное натяжение, температура, плотность тока.

Введение. В аккумуляторах содержатся тяжелые металлы, кислоты, которые, попадая в воздух, воду или почву, наносят значительный ущерб окружающей среде. Утилизацию аккумуляторов проводят с целью улучшения экологической ситуации.

При электрохимической переработке свинца в промышленности обычно применяют кремний- и борфтористоводородные растворы.

Недостатком электрохимического метода переработки аккумуляторов является выбросы вредных веществ с поверхности электролитов.

Борфтористоводородные электролиты более устойчивы и менее чувствительны к загрязнению посторонними металлами.

В работе [1] показано, что выбросы с поверхности борфтористоводородного электролита в 10 раз более низкие, чем при использовании кремнийфтористоводородного электролита при 25 °C.

Поверхностно-активные вещества (ПАВ), входящие в состав борфтористоводородного электролита повышают технологические параметры вновь образованного свинцового покрытия, улучшая микроструктуру поверхностного слоя.

В работах [2-4] показано, что величина выбросов фторидов с поверхностей фторсодержащих электролитов при введении в их состав различных ПАВ зависит от вида ПАВ. Наличие в растворах электролитов ПАВ приводит к снижению их поверхностного натяжения, что может оказывать влияние на выбросы фторидов с зеркала электролита. Наиболее эффективно снижается поверхностное натяжение при введении в электролит ПАВ – сульфитно-спиртовая барда (ССБ). ССБ - отход лесохимических производств, образующийся при сульфитной варке древесной целлюлозы.

В статье [5] изучалась зависимость интенсивности выделения газа и вредных газообразных продуктов от приложенной плотности тока 163 A/m², 498 A/m² и 906 A/m². Оптимальным с точки зрения скорости процесса и выделения выбросов авторы считают борфтористоводородный электролит следующего состава, г/л: Pb(BF₄)₂ – 30, HBF₄ – 180, Н₃ВО₃ – 30, ПАВ – 1. Максимальная рабочая плотность тока составляла 400 A/m².

Основная часть. Для определения концентрации фторидов в выбросах использовали фотоколориметрический метод с ализарин-комплексоном и нитратом лантана [6].

Фотометрическое определение свинца и его соединений в воздухе проводилось согласно методическим указаниям [7].

Определение поверхностного натяжения проводилось методом наибольшего давления газовых пузырьков [8].

Целью данной работы является определение количественной зависимости выбросов фторидов и соединений свинца в атмосфере от поверхностного натяжения электролита в результате изменения концентрации ПАВ - ССБ, а также температуры электролита.

Для исследования использовался электролит определенного состава с добавлением ССБ в различных концентрациях (0-1 г/л). Рабочая катодная плотность тока составляла 0,8 от максимально допустимой. При концентрации ССБ равной 1 г/л наблюдается наименьшее значение поверхностного натяжения.

Изучили воздействие концентрации ПАВ - ССБ на поверхностное натяжение (σ) электролита (г/л: $\text{Pb}(\text{BF}_4)_2$ – 30, HBF_4 – 180, H_3BO_3 – 30, ПАВ – 1.) на границе с воздухом и представили абсолютные и удельные выбросы фторидов и свинца с зеркала борфтористоводородного электролита при температуре 25 °C (табл. 1).

Таблица 1. Абсолютные и удельные выбросы фторидов и соединений свинца с поверхности электролита, рабочая допустимая плотность тока (Дк) и скорость осаждения свинца на катоде в зависимости от поверхностного натяжения (σ) электролита на границе с воздухом от концентрации ССБ (Сссб) в электролите при 25°C

Сссб, г/л	σ , мН/м	Абсолютные выбросы фторидов, г/(час·м ²)	Абсолютные выбросы свинца, г/(час·м ²)	Дк, А/м ²	Скорость осаждения свинца на катоде, кг/(м ² ·час)	Удельные выбросы фторидов, г/(час· кг · м ²)	Удельные выбросы свинца, г/(час· кг · м ²)
0	74,6	1,38	0,0035	189	0,31	4,45	0,0113
0,19	70,5	1,41	0,0040	195	0,38	3,71	0,0105
0,45	62,6	1,84	0,0051	222	0,51	3,61	0,0100
0,5	60,5	2,26	0,0063	256	0,64	3,53	0,0098
0,6	57,1	2,45	0,007	261	0,71	3,45	0,0098
0,7	56,8	2,85	0,0083	270	0,83	3,43	0,0097
0,84	50,9	3,48	0,0087	295	1,02	3,41	0,0085
0,96	48,4	3,52	0,0091	315	1,06	3,32	0,0086
1	44,8	4,06	0,0100	320	1,24	3,27	0,0081

Исходя из таблицы 1 видно, наблюдается рост выбросов фторидов и свинца по мере уменьшения поверхностного натяжения на границе раствор – воздух.

Результаты опытов оформили в виде графика зависимости количества выбросов фторидов и свинца от поверхностного натяжения в зависимости от концентрации органической добавки.

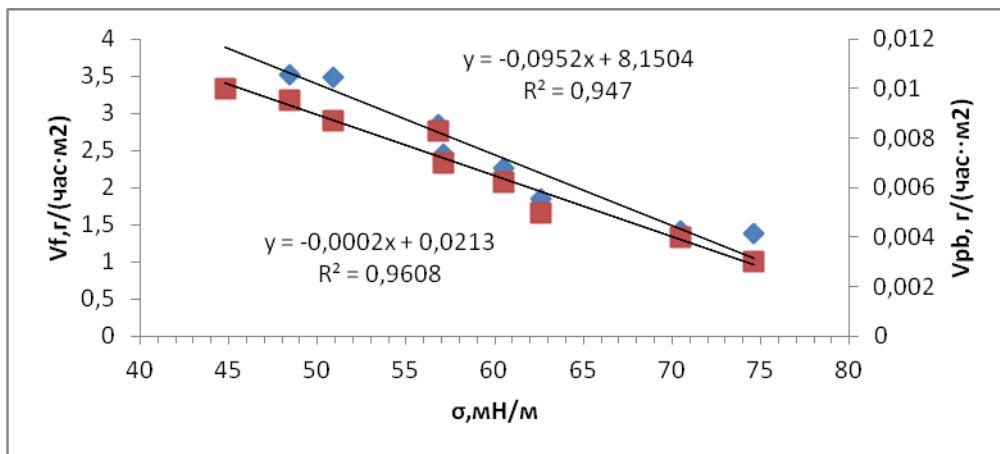


Рис. 1. Зависимость выбросов фторидов и свинца (синие и красные квадратики соответственно) от величины поверхностного натяжения

Изменение выбросов фторидов (V_f) и свинца (V_{pb}) от величины поверхностного натяжения (рис. 1) описывается по методу наименьших квадратов (МНК) следующими уравнениями:

$$V_f = -0,0952 \times \sigma + 8,1504. \quad (1)$$

$$V_{pb} = -0,0002 \times \sigma + 0,0213. \quad (2)$$

Хорошая корреляция выбросов фторидов и свинца от величины поверхностного натяжения говорит о зависимости этих величин друг от друга. Так как на поверхностное натяжение электролита состав его неорганической части мало влияет (изменения величины поверхностного натяжения в зависимости от состава электролита за исключением ПАВ находится в пределах её ошибки определения), то уравнения (1) и (2) может быть применимо для борфтористоводородного электролита любого минерального состава при 25°C.

Также наблюдается увеличение Дк (189-320 А/м^2) по мере увеличения концентрации ПАВ и уменьшения поверхностного натяжения на границе раствор-воздух. Но ПАВ также понижает межфазное поверхностное натяжение на границе раздела свинец - электролит. По-видимому, этим можно объяснить усиление рассеивающей способности электролита с ростом концентрации ССБ и увеличение Дк за счет этого. Пропорционально Дк растет скорость осаждения свинца на катоде, и также уменьшаются удельные выбросы фторидов и свинца, приходящиеся на единицу массы выделенного свинца.

Таким образом, введение в состав электролита ПАВ, несмотря на увеличение абсолютных выбросов фторидов и свинца в атмосферу, приводит к росту скорости извлечения свинца из раствора и уменьшению удельных выбросов данных загрязняющих веществ.

Известно, что повышение температуры водных растворов также снижает их поверхностное натяжение. В связи с этим изучили влияние температуры (20-45°C) на поверхностное натяжение (σ) данного электролита на границе с воздухом, а также определили абсолютные и удельные выбросы фторидов и свинца с зеркала борфтористоводородного электролита, рабочую допустимую плотность тока и скорость осаждения свинца на катоде (табл. 2).

Показано, что повышение температуры электролита от 20 до 45 °С способствует интенсификации процесса электроосаждения свинца, т.е. появляется возможность работать при более высоких плотностях тока (так как подвижность ионов возрастает) и с большей скоростью наблюдается выделения свинца из электролита.

Таблица 2. Абсолютные и удельные выбросы фторидов и соединений свинца с поверхности электролита (г/л: $\text{Pb}(\text{BF}_4)_2$ – 30, HBF_4 – 180, H_3VO_3 – 30, ССБ – 1.), рабочая допустимая плотность тока (Дк), скорость осаждения свинца на катоде и поверхностное натяжение (σ) в зависимости от температуры электролита

Температура, °С	Поверхностное натяжение на границе раствор – воздух, мН/м	Абсолютные выбросы фторидов, г/(час·м ²)	Абсолютные выбросы свинца г/(час·м ²)	Рабочая допустимая плотность тока, А/м ²	Скорость осаждения свинца на катоде, кг/(м ² ·час)	Удельные выбросы фторидов, г/(час·м ²)	Удельные выбросы свинца г/(час·м ²)
20	45,1	3,70	0,0086	311	1,13	2,75	0,0028
25	44,8	4,06	0,01	320	1,19	3,27	0,004
30	44,2	5,80	0,014	348	1,28	4,35	0,005
35	43,7	7,15	0,017	360	1,35	5,05	0,007
40	43,0	8,08	0,02	400	1,39	5,81	0,01
45	42,5	8,30	0,023	410	1,40	6,40	0,012

Исходя из данных таблицы 2, наблюдается более сильный рост Дк (в 10 раз) по мере при увеличении температуры раствора по сравнению с ростом с увеличением концентрации ССБ. Такое резкое увеличение можно объяснить ростом рассеивающей способности электролита с повышением температуры раствора, а не только снижением поверхностного натяжения.

С ростом температуры электролита наблюдается рост выбросов фторидов и свинца.

Следовательно, более сильный рост выбросов фторидов (в 19 раз) и свинца (в 26 раз) при увеличении температуры раствора по сравнению с ростом с увеличением концентрации ССБ можно объяснить, в основном, увеличением летучести фторидов и соединений свинца с повышением температуры раствора.

Представили табличные данные в виде графика зависимости выбросов фторидов и свинца от величины поверхностного натяжения при изменении температуры от 20 до 45 °С.

Используя МНК, аппроксимировали полученные данные линейной зависимостью выбросов фторидов (V_f) и свинца (V_{pb}) от величины поверхностного натяжения в зависимости от температуры электролита (рис. 2) и представили уравнения:

$$V_f = -1,8192 \times \sigma + 85,925.$$

$$V_{pb} = -0,0052 \times \sigma + 0,2418.$$

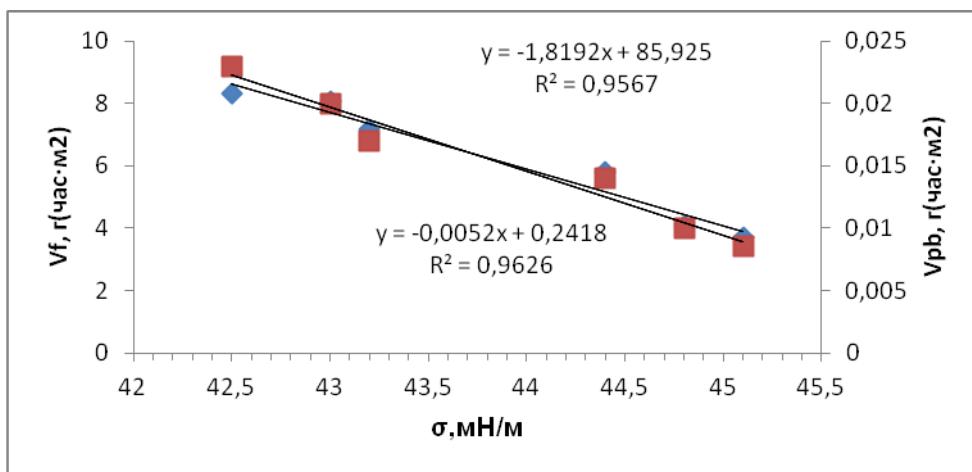


Рис. 2. Зависимость выбросов фторидов и свинца (синие и красные квадратики, соответственно) от величины поверхностного натяжения в зависимости от температуры

Следовательно, при одинаковой температуре электролита влияние природы и концентрации ПАВ в электролите на Дк , в основном, можно объяснить изменением поверхностного натяжения на границе раствор – воздух и раствор – твердое тело (свинцовая пластина).

При разных температурах, в основном, изменение Дк можно объяснить ростом рассеивающей способности электролита на границе раздела раствор – твердое тело (свинцовая пластина) за счет увеличения температуры электролита.

Выводы. Таким образом, изменяя концентрацию ПАВ, входящих в состав борфтористоводородных электролитов, а также повышая температуру электролита можно добиться максимальной скорости извлечения свинца и минимального удельного количества выбросов фторидов и свинца в атмосферный воздух. Следует отметить, что рабочей температурой для кремнийфтористоводородного электролита является 25°C [9]. При более высоких температурах кремнийфтористоводородная кислота разлагается с выделением в атмосферу газообразных соединений фтора. Борфтористоводородный электролит может использоваться в гальванических процессах при температурах $40 - 45^\circ\text{C}$.

Результаты, полученные вследствие проведенных исследований, могут быть использованы для разработки новых составов электролитов, обеспечивающих более высокую экологическую безопасность и скорость извлечения свинца при электрохимической переработке свинцово-кислотных аккумуляторных батарей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Сердюк А. И. Повышение экологической безопасности при переработке отработанных свинцово-кислых аккумуляторов в борфтористоводородном электролите / А. И. Сердюк, М. М. Ялалова // Строительство и техногенная безопасность. – 2018. – №10(62). – С. 201-208.
- Ялалова М. М. Влияние ПАВ на выбросы фторидов с поверхности борфтористоводородного электролита для переработки свинцовых аккумуляторов / М. М. Ялалова, А. И. Сердюк // Вестник Донбасской академии строительства и архитектуры. – 2018. – № 5(133). – С. 37-41.
- Исаева-Парцвания Н. В. Выбросы вредных веществ при электрохимической переработке свинцово-кислотных аккумуляторов в электролитах на основе кремнефтористоводородной кислоты / Н. В. Исаева-Парцвания, А. И. Сердюк, А. Б. Ступин // Вестник Донецкого национального университета. Естественные науки. – 2005. – №. 2. – С. 327-331.

4. Исаева-Парцвания Н. В. Повышение экологической безопасности при электрохимической переработке свинцово-кислотных аккумуляторов в кремнефтористых электролитах / Н. В. Исаева-Парцвания, А. И. Сердюк, А. Б. Ступин // Сборник научных трудов Донецкого национального университета. Государственное управление. Механизмы образования природопользования. – 2005. – №. 57. – С. 41-47.
5. Назарова В. В. Исследование интенсивности выделения газа на электродах и выделения фторидов при переработке свинцово-кислотных аккумуляторов с целью определения безопасных параметров процесса / В. В. Назарова, А. В. Дмитрович // Вестник Донбасской национальной академии строительства и архитектуры. – 2011. – С. 45-51.
6. ПНД Ф 13.1.45-03. Количественный химический анализ атмосферного воздуха и выбросов в атмосферу. Методика выполнения измерений массовой концентрации фтористого водорода в пробах промышленных выбросов фотометрическим методом. Введ. 22.12.2003. – М.: ФГУ «ФЦАМ МПР России», 2003. – 18 с.
7. МУ 2013-79. Методические указания на фотометрическое определение свинца и его соединений в воздухе. – М.: Минздрав СССР, 1979. – 25 с.
8. Щукин Е. Д. Коллоидная химия : учебник / Е. Д. Щукин, А. В. Перцов, Е. А. Амелина. – М.: Юрайт, 2017. – 444 с.
9. Оствальд Г. В. Электрохимия: учебно-методическое пособие / Г. В. Оствальд, С. Ф. Спицына. – Барнаул: РИО Алтайского ГАУ, 2017. — 63 с.

Поступила в редакцию 09.02.2021 г.

REGULARITIES OF INFLUENCE OF SAS CONCENTRATION AND TEMPERATURE ON ATMOSPHERIC AIR IN HYDROBORFLUORIDE ELECTROLYTE DURING DISPOSAL OF LEAD ACCUMULATORS

Ripnaia M.M., Bashevaia T.S., Serdiuk A.I.

This article discusses the regularities of the influence of the concentration of surfactants, namely, sulfide-alcohol stillage and temperature on the emissions of fluorides and lead from the surface of hydrofluoride electrolyte, as well as the intensity of the process for electrochemical processing of lead-acid batteries that have worked out their service life.

Keywords: lead-acid batteries, hydrofluoride electrolyte, emissions, surface tension, temperature, current density.

Рипная Маргарита Маратовна

ассистент кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Макеевка.

E-mail: yalalova-rita@mail.ru

Ripnaia Margarita Maratovna

Assistant Lecturer at Department of Technospheric security of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Makeevka.

Башевая Татьяна Сергеевна

кандидат технических наук, доцент, заведующая кафедрой техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Макеевка.

E-mail: bashevaya@mail.ru

Bashevaia Tatiana Sergeevna

Candidate of Technical Sciences, Docent, Head of the Department of Technospheric security of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Makeevka.

Сердюк Александр Иванович

доктор химических наук, профессор, профессор кафедры техносферной безопасности ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,
ДНР, г. Макеевка.

E-mail: ecoalserdiuk@rambler.ru

Serdyuk Alexander Ivanovich

Doctor of Chemical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Technospheric security of Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture,
DPR, Makeevka.

ПОЗДРАВЛЕНИЕ С УСПЕШНОЙ ЗАЩИТОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Физико-технический факультет поздравляет ответственного секретаря журнала «Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки», заведующего учебной лабораторией кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий Третьякова Игоря Александровича с успешной защитой диссертационной работы «Автоматизация процедуры структурного анализа массивов экспериментальных данных научных исследований» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в диссертационном совете Д 01.024.04.



В период обучения в аспирантуре Третьяков И.А. продолжал работать по совместительству ассистентом кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий, успешно совмещая учёбу и научную деятельность в аспирантуре с работой, о чём свидетельствует диплом победителя Университетского конкурса «Молодой ученый года» в 2018 году в номинации «Лучший аспирант года», диплом лауреата Университетского конкурса «Молодой ученый года - 2019» в номинации «Лучший молодой ученый года», диплом победителя Общеуниверситетского конкурса «Молодой ученый года - 2020».

Работая на кафедре Игорь Александрович активно принимает участие в жизни университета: с 2016 по 2020 гг. исполнял обязанности заместителя ответственного секретаря приёмной комиссии; с 2017 года исполняет обязанности заместителя заведующего кафедры по научной деятельности; с 2018 года является ответственным секретарём научного журнала «Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки»; с 2021 года является заместителем декана Физико-технического факультета по научной работе.

Третьяков И.А. является автором 7 учебных и учебно-методических пособий, 25 научных статей (в том числе в зарубежных изданиях), 11 материалов докладов по итогам научных конференций.

Желаем ему не останавливаться на достигнутом, самосовершенствоваться в выбранной стезе, дальнейшего развития в выбранном научном пути и идей на докторскую диссертацию!

Коллектив Физико-технического факультета ДонНУ

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список литературы, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.donnu.g@donnu.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редакцию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.

5. Обязательные требования к оформлению статей:

- **Размер бумаги:** А4.
- **Ориентация:** книжная.
- **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
- **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
- **Межстрочный интервал:** одинарный.
- **Абзацный отступ:** 1 см.
- **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Аннотация, список литературы, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
- **Подрисуточные подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и **год** – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела **фамилия(и) и инициалы автора(ов)** – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание **Ключевые слова:** – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых литературных источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ 7.1-2003 «Библиографическая запись. Библиографическое описание» и ГОСТ 7.05-2008 «Библиографическая ссылка». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо включение в список литературы источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «*Поступила в редакцию xx.xx.20xx г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, **фамилия(и) и инициалы автора(ов)**, аннотация и ключевые слова (*Keywords*) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
 - **Фамилия, имя, отчество;**
 - ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
 - страна, город;
 - адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 539.2:534.242

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ УПРУГОЙ СРЕДЫ ПРИ УДАРНОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

© 2021 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В статье проведен анализ возможности использования метода акустического резонанса для определения параметров упругой среды. Использование регламентированных условий возбуждения упругих колебаний и последующая цифровая обработка позволяют определить качество технических изделий как добротность акустического резонатора.

Ключевые слова: дефектоскопия, резонансная спектроскопия, коэффициент упругости.

Введение. Контроль и диагностика механического состояния [1] и целостности...

Постановка задачи. Представляется важным выявление в ...

Методы резонансной акустической спектроскопии. Широкое распространение в диагностике целостности изделий строительных материалов [2] и ...

Выводы. Таким образом, полученные результаты позволяют...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лебедев А. В. Резонансная акустическая спектроскопия при низких добротностях / А. В. Лебедев, Л. А. Островский, А. М. Сутин, И. А. Соустова [и др.] // Акуст. журнал. – 2003. – Т. 49. – № 1. – С. 92-99.
2. Data from ECG recording : [сайт]. – URL: <https://bioelectromagnetism.wordpress.com/2012/11/28/data-from-ecg-recording-in-todays-class/> (дата обращения: 01.03.2021). – Текст : электронный.

Поступила в редакцию xx.xx.2021 г.

DETERMINATION OF PARAMETERS OF THE RESILIENT MEDIUM UNDER IMPACT

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

In this paper the possibility of using the acoustic resonance method to determine the parameters of an elastic medium is analyzed. The use of regulated conditions for the excitation of elastic vibrations and subsequent digital processing make it possible to determine the quality of technical products as the q-factor of an acoustic resonator.

Keywords: flaw detection, resonance spectroscopy, resiliency coefficient.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заведующий учебной лабораторией кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Head of laboratory at Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir Vasilevich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Head of the Department of Radiophysics and Infocommunication Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

8. Рисунки и таблицы располагаются по тексту строго в пределах печатного поля книжной ориентации страниц после их первого упоминания в тексте статьи. Вся текстовая информация на рисунках должна быть четкой и разборчивой и не иметь лишних деталей. Каждый рисунок должен иметь подрисуночную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: «Рис. №. Название». Каждая таблица должна иметь заглавие в формате: «Таблица №. Название». Во избежание смещений рисунков рекомендуется размещать их в таблицах с двумя строками с параметром «Нет границ» (в первой строке размещается рисунок, во второй - подрисуночная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами, допускается применение букв при нумерации рисунков, состоящих из нескольких частей. Сканированные рисунки не допускаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

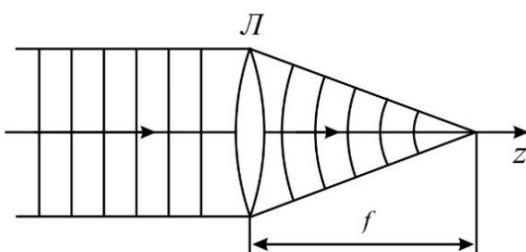


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

Элемент	Номинал	Единица измерения
C _{out}	25	пФ
C ₁	10	нФ
C ₂	100	мкФ
L ₁	150	мкГн
L ₂	460	нГн
L ₃	765	нГн
R ₁	0,39	МОм

9. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». После формул ставится тот знак препинания, который необходим исходя из построения фразы. Нумеровать следует только те формулы, на которые имеются ссылки в тексте. Ссылки на формулы приводятся в круглых скобках. Каждая формула отделяется от основного текста интервалом в 6 пт. перед и после. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редакторов формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0 и выше с параметрами:

- **текст и переменная:** наклонный;
- **матрица-вектор:** полужирный наклонный;
- **размер:** обычный - 12 пт., крупный индекс - 9 пт., мелкий индекс - 7 пт., крупный символ - 18 пт., мелкий символ - 12 пт.

Образец оформления формулы:

$$y_t = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i y_{t-i} + b \xi_t. \quad (1)$$

10. Материалы представляются по адресу:

283001, Донецкая Народная Республика, г. Донецк, пр. Театральный, д. 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Зам. главного редактора: Симоненко Александр Петрович, каб. 260.

Ответственный секретарь: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Контактные тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88

E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru

Научное издание

Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки

– 2021. – № 1.

Технический редактор: И.А. Третьяков

Адрес редакции:
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
283001, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24
Тел.: +38 (062) 302 07 81, +38 (062) 302 92 88
E-mail: vestnik.donnu.g@donnu.ru
URL: <http://donnu.ru/vestnikG>

Подписано в печать 26.03.2021 г.
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 12,9.
Тираж 100 экз. Заказ. №

Издательство ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
283001, ДНР, г. Донецк, ул. Университетская, д. 24.
Тел.: +38 (062) 302 92 27.
Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности
в Государственный реестр
серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.