

ISSN 2663-4228

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ
*Основан
в 1997 году*

Серия Г
**Технические
науки**

2/2018

**Редакционная коллегия журнала «Вестник Донецкого национального
университета. Серия Г: Технические науки»**

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

Зам. главного редактора – д-р техн. наук, проф. **В.В. Данилов**

Ответственный секретарь – **И.А. Третьяков**

Члены редколлегии: д-р техн. наук, проф. **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** (Московский энергетический институт, 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. Шарий**; канд. техн. наук, доц. **Т.В. Ермоленко**; д-р техн. наук, проф. **Ф.В. Недопекин**; д-р. ф.-м. наук, д-р. техн. наук, проф. **В.К. Толстых**; д-р. техн. наук, проф. **Г.В. Аверин**; председатель Госкомэкополитики при Главе ДНР **Р.В. Кишкань**; д-р. хим. наук, проф. **А.И. Сердюк**; д-р. техн. наук, проф. **А.П. Симоненко**.

**The Editorial Board of the journal “Bulletin of Donetsk National University.
Series G: Technical science”**

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

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

Executive Secretary – **I. A. Tretiakov**

The Members of the Editorial Board: Dr. of tech., prof. **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** (Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation); Cand. of tech., docent, **I.A. Molokovskiy**; Cand. of tech., docent **V.V. Paslyon**; Cand. of phys. and math., docent **V.I. Timchenko**; Cand. of tech., docent **T.V. Sharii**; Cand. of tech., docent **T.V. Ermolenko**; Dr. of tech., prof. **F.V. Nedopekin**; Dr. of phys. and math., Dr. of tech., prof. **V.K. Tolstykh**; Dr. of tech., prof. **G.V. Averin**; Chairman of the State Committee on Ecological Policy at the Head of the DPR **R.V. Kishkan**; Dr. of chem., prof. **A.I. Serdiuk**; Dr. of tech., prof. **A.P. Simonenko**.

Адрес редакции: ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ул. Университетская, 24, 283001, г. Донецк

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

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

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

*Печатается по решению Ученого совета
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
Протокол №7 от 29.06.2018 г.*

Вестник Донецкого национального университета

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ

Серия Г: Технические науки

№ 2

Донецк 2018

СОДЕРЖАНИЕ

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

- Болонов Н.И., Пометун Е.Д., Силенко Е.М., Силенко С.Е., Лебедев В.Н.* Экспериментальное исследование перемежаемой турбулентности в следе за цилиндром с помощью адаптивных алгоритмов 3
- Третьяков И.А., Белик Т.В.* Алгоритм расчета акустооптического устройства по виду электрооптической кривой 9

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- Молоковский И.А., Лозинская В.Н.* Беспроводная связь в технологических сетях промышленных предприятий 20
- Рябченко В.Ю., Паслён В.В.* Обзор способов уменьшения эффективной поверхности рассеивания радиотехнических объектов 27
- Данилов В.В., Тимченко В.И., Иванов С.В.* Электроакустический преобразователь 34

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Шарий Т.В., Черкашин Е.И.* Распознавание голосовых команд управления роботом на основе спектра модуляции речевого сигнала 41
- Бабичева М.В., Шевченко А.С.* Распознавание лиц в режиме реального времени сверточной нейронной сетью 49

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Кухарев А.Л., Белоусов В.В.* Принципы повышения интенсивности теплообмена в жидких средах дуговых многоэлектродных печей 57

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

- Белоусов В.В., Бодряга В.В., Недопекин Ф.В.* Подавление выбросов бурого дыма при переливах чугуна азотно-водным аэрозолем 68
- Сердюк А.И., Назарова М.В.* Экологически чистый электролит на основе малеиновой кислоты для переработки отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов 73
- Правила для авторов 79

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997

Series G: Technical science

No 2

Donetsk 2018

CONTENTS

INSTRUMENT ENGINEERING, METROLOGY AND INFORMATION-MEASURING INSTRUMENTS AND SYSTEMS

- Bolonov N., Pometun E., Silenko E., Silenko S., Lebedev V.* Experimental study of movable turbulence in the cylinder through adaptive algorithms 3
- Tretiakov I., Belik T.* Algorithm of the calculation of acoustical device by electro-optical curve 9

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Molokovskiy I.O., Lozinskaya V.N.* Wireless communication in technological networks of industrial enterprises 20
- Ryabchenko V.Yu., Paslyon V.V.* Research of ways of reduction the radar cross-section radiotechnical objects 27
- Danilov V.V., Timchenko V.I., Ivanov S.V.* Electroacoustic transducer 34

COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

- Sharii T.V., Cherkashin E.I.* Recognition of robot voice control commands based on the modulation spectrum of speech signal 41
- Babicheva M.V., Shevchenko A.S.* Real time persons recognitional with a convolution neural network 49

INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING

- Kukharev A.L., Bilousov V.V.* Principles of increasing intensity heat exchange in liquids environments of arc multi-electrode furnace 57

ECOLOGICAL SAFETY OF CONSTRUCTION AND URBAN SERVICES

- Bilousov V., Bodryaga V., Nedopekin F.* Suppression of a red fume emissions at pig iron overflow by nitro-gen-water aerosol 68
- Serdyuk A.I., Nazarova M.V.* Ecologically clean electrolyte based on maleic acid for recycling of used lead-acid batteries 73
- Instructions for authors 79

П Р И Б О Р О С Т Р О Е Н И Е , М Е Т Р О Л О Г И Я И И Н Ф О Р М А Ц И О Н Н О - И З М Е Р И Т Е Л Ь Н Ы Е П Р И Б О Р Ы И С И С Т Е М Ы

УДК 62-1/-9

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕМЕЖАЕМОЙ ТУРБУЛЕНТНОСТИ В СЛЕДЕ ЗА ЦИЛИНДРОМ С ПОМОЩЬЮ АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ

© 2018 *Н.И.Болонов, Е.Д.Пометун, Е.М.Силенко, С.Е.Силенко, В.Н.Лебедев*

Произведена обработка данных перемежаемой турбулентности в следе за цилиндром в стратифицированном течении при низком числе Рейнольдса с помощью алгоритма и устройства классификации, обеспечивающих большую точность полученных результатов. Установлено, что крупные вихри оказывают определяющее влияние на формирование поверхности раздела следа за цилиндром. Стратификация влияет, прежде всего, на крупномасштабную вихревую структуру потока и значительно меньше на мелкомасштабную структуру.

Ключевые слова: турбулентность, функция и коэффициент перемежаемости, алгоритм классификации, многослойная стратификация, след.

Введение. Перемежаемость в турбулентных течениях представляет собой чередование в поле турбулентных пульсаций областей с отличающимися статистическими свойствами. Примером может служить перемежаемость, вызванная движением внешней границы турбулентности, океаническая перемежаемость. Вертикальная и горизонтальная структура морских гидрофизических полей характеризуется пятнами, слоями, внутри которых локализуется мелкомасштабное перемешивание. Поэтому зондирование таких полей приводит к перемежаемости получаемых данных. Причины ее возникновения самые различные, но во многих практически важных случаях она может быть описана моделью предложенной Коважным в виде:

$$X(t) = I(t)X_1(t) + [1 - I(t)]X_2(t), \quad (1)$$

где $X_1(t)$, $X_2(t)$ – данные чередующихся структур – случайные процессы; $I(t)$ – ноль-единичная случайная функция перемежаемости, которая равна единице, если в момент времени в исследуемой точке течения движение подчиняется статистике $X_1(t)$ и равна нулю – если статистике $X_2(t)$.

подавляющее число публикуемых работ по экспериментальному исследованию перемежаемости посвящено измерению этой функции и ее статистических характеристик таких, например, как коэффициент перемежаемости γ , средняя частота следования турбулентных «вспышек» f_γ . Коэффициент перемежаемости γ представляет собой среднее значение функции перемежаемости и определяется выражением:

$$\gamma = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T I(t) dt, \quad (2)$$

где T – время, в течение которого определяется среднее значение функции перемежаемости.

Несовпадение статистических данных полученных разными авторами при исследовании перемежаемости, обусловлено погрешностями измерения функции перемежаемости. В последнее время был предложен ряд способов и устройств измерения функции перемежаемости, точность которых в сильной степени зависит от устанавливаемых при измерении параметров. Снижение уровня погрешности возможно в процессе оптимизации значений установочных параметров измерителей функции перемежаемости – порогов классификации.

Общие положения. Анализ турбулентных пульсаций в процессе получения информации для выработки решений о принадлежности сигнала к той или иной статистике определяет ряд условий, накладываемых на используемый аппарат, способы подготовки и оценки исходных данных, технические принципы построения классификаторов. К их числу относится ограниченное время принятия решений, которое должно учитывать как динамические характеристики первичных измерительных преобразователей, так и особенности турбулентного сигнала. Для получения статистически достоверных оценок, зачастую при ограниченном объеме измерений, срабатывания классификатора должны быть инвариантны к изменению фонового – нетурбулентного сигнала и исходного – турбулентного.

Основная трудность при первичной обработке поступающих в классификатор стохастических сигналов заключается в их нестационарности в широком частотном и динамическом диапазоне. Причем статистические характеристики турбулентных и нетурбулентных сигналов пересекаются и изменяются в зависимости от нетурбулентного сигнала, перемежаемости, времени существования турбулентных пульсаций и т.д.

Отсутствие априорных данных о характере закона распределения, а также перемежающаяся структура турбулентных пульсаций определяют необходимость использования непараметрических критериев и экспериментальных методов, основанных на экспертных оценках, имитационных моделях и физических представлениях. Для увеличения разделимости статистик перемежаемого турбулентного течения необходимо, по возможности, осуществлять то или иное преобразование исходного выбранного сигнала, например, дифференцирование, фильтрацию, а для устранения выборочной изменчивости произвести его квадрирование и сглаживание на соответствующем малом интервале времени.

Эксперимент по изучению перемежаемости почти всегда проводится при весьма ограниченной априорной информации, поэтому наиболее приемлемым следует считать самообучение классификаторов, обеспечивающие минимум ошибок измерения функции и коэффициента перемежаемости [1].

Метод самообучения классификатора по сигналу перемежаемой турбулентности предложенный в ряде опубликованных работ выполненных в разное время в Донецком университете и СКТБ «Турбулентность» [2, 3], имеет лучшие качественные характеристики по отношению к известным методам [4, 5], где величины пороговых параметров в процессе классификации определялись эмпирически. Такой подход не имеет общности и не раскрывает сущности процесса классификации, что затрудняет оценку достоверности измерений.

Решение о принадлежности сигнала к одной из структур принимается согласно алгоритму [1]:

$$I^*(t) = [x_n(t) \geq C] \vee \{ [x_n(t) < C] \wedge (\Delta t_{np} \leq \tau_{y\delta}) \}. \quad (3)$$

Здесь Δt_{np} – длительность провалов сигнала $x_n(t)$ на уровне C ; C и $\tau_{y\delta}$ – пороговые установки классификатора; \vee , \wedge – операции логического суммирования и умножения.

Параметр $\tau_{y\delta}$ в этом случае может интерпретироваться как параметр, не позволяющий классификатору менять решение в течение времени, меньшего $\tau_{y\delta}$. Преимущество такого алгоритма заключается в том, что время удержания решения постоянно и равно $\tau_{y\delta}$. Поскольку распределение длительностей провалов Δt_{np} может быть оценено применением хорошо разработанной теории выбросов, возможно аналитическое определение уровней ошибок классификации, обусловленных ложными провалами [6].

Согласно алгоритму (3), функции $I^*(t)$ зависят от установочных параметров классификации C и $\tau_{y\delta}$. Поэтому только для определенных оптимальных значений C_{opt} , $\tau_{y\delta,opt}$ функция $I^*(t)$ будет наиболее близка к истинной функции перемежаемости. Согласно теории классификации, нахождение этих оптимальных значений и сводится к процедурам обучения или самообучения классификаторов. Эффективность этих процедур подтверждена тестовыми испытаниями как на имитаторах перемежаемого сигнала – метод статистических испытаний Монте-Карло, так и в ходе натуральных и лабораторных экспериментов на реальных физических течениях [7].

Основная часть. Таким реальным физическим течением, реализованным в лабораторном эксперименте, является турбулентный след за цилиндром. Исследование перемежаемости турбулентного следа представляет большой интерес, так как по структуре его границы можно судить о динамике крупных вихрей в следе.

Эксперимент был осуществлен на созданном в Донецком университете гидродинамическом стенде, позволяющем получать многослойный стратифицированный поток. Подробно стенд описан в [8, 9].

Исследование характеристик перемежаемости турбулентного следа проводилось в области установившегося течения при продольной координате $x/d=160$, где d – диаметр цилиндра; числа Фруда: $Fr = \infty$ (однородная жидкость); $Fr = 217$ (стратифицированный поток) и числе Рейнольдса $Re = 1060$. В первом случае, при $Fr = \infty$, цилиндр подогревался электронагревательным элементом, а температура всех слоев была одинаковой. Во втором случае, при наличии стратификации ($Fr = 217$), цилиндр не нагревался и устанавливался на границе раздела слоев разной температуры.

Наилучшая разделяемость турбулентных структур достигалась при дифференцировании исходного сигнала, а классификация осуществлялась по квадрату производной пульсаций температуры [10]. Так как обработка такого типа сигнала традиционными методами затруднена, для анализа данных перемежаемости использовался самообучающийся адаптивный алгоритм (3).

На рис.1 представлены полученные профили коэффициента перемежаемости $\gamma = \overline{I(t)}$ (а) и средней частоты появления турбулентного сигнала f_γ – (б). Вертикальная координата следа z здесь нормирована масштабом подобия

$l_0 = \sqrt{(x-x_0)d}$, где $x_0 = -40d$. Эти профили в исследуемом течении также, как и в однородной жидкости хорошо аппроксимируются гауссовской кривой распределения, что означает определяющее влияние больших вихрей на формирование поверхности раздела турбулентность – нетурбулентность.

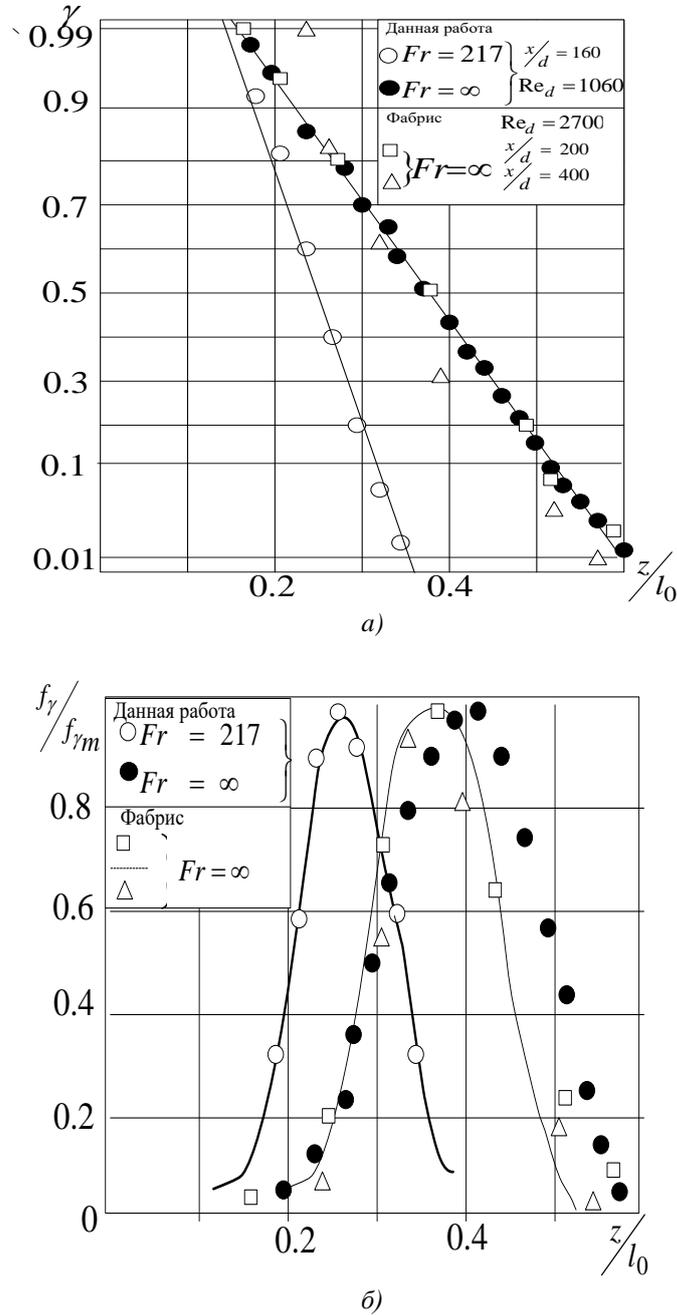


Рис. 1. Профили коэффициента перемежаемости γ (а) и средней частоты появления турбулентного сигнала f_γ (б) в следе за цилиндром

Количественно оценив ширину перемежающейся области по значениям $\gamma = 0,01 \div 0,99$, можно отметить уменьшение ее в 2–3 раза в исследуемом течении по

сравнению со случаем однородной жидкости. Так как эта величина характеризует вертикальный размер крупных вихрей, то полученный результат свидетельствует об его пропорциональном уменьшении в исследуемом течении. Горизонтальный размер крупных вихрей можно оценить по средней длительности единичных участков функции перемежаемости $L = \gamma U_0 / f_\gamma$ при $\gamma = 0,5$. В исследуемом сечении стратифицированного следа эта величина равна $0,5l_0$ и, примерно, в 2 раза больше аналогичного значения, полученного для однородной жидкости. Таким образом, коллапс следа за цилиндром в стратифицированной жидкости приводит к существенной деформации крупных вихрей: сжатию в вертикальном и растяжению в горизонтальном направлениях.

Статистические характеристики пульсаций температуры, вычисленные при зонном осреднении по турбулентным участкам сигнала, незначительно изменяются по сечению следа. Это означает, по-видимому, что мелкомасштабная структура турбулентности в перемежающейся области течения и его центре одинакова как для однородной жидкости, так и при наличии стратификации.

Полученные результаты находятся в полном соответствии с феноменологическими представлениями, полученными методами визуализации, однако метод зонных осреднений позволяет получить количественные результаты даже при сравнительно малой разделимости перемежающихся структур и низких числах Рейнольдса.

Выводы. Применение разработанных алгоритмов для статистического исследования турбулентного следа за цилиндром подтвердило общепринятое представление о гауссовости распределения коэффициента перемежаемости и частоты следования турбулентных «вспышек» в поперечном сечении следа. Этот факт косвенно подтверждает применимость метода обработки сигнала для исследования перемежаемой турбулентности.

Результаты обработки перемежаемости турбулентного следа за цилиндром в стратифицированном потоке позволили установить ряд важных физических свойств и параметров турбулентности такого вида, в частности, геометрию крупных вихрей и их деформацию. По сравнению со случаем однородной жидкости крупные вихри в стратифицированном следе сжаты по вертикали и растянуты по горизонтали.

Статистические характеристики пульсаций температуры, вычисленные при зонном осреднении по турбулентным участкам сигнала, незначительно изменяются по сечению следа, что указывает на однородность мелкомасштабной турбулентности. Наличие стратификации прежде всего влияет на крупномасштабную вихревую структуру потока и значительно меньше на мелко масштабную структуру.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы изучения явления перемежаемости / И.Л. Повх, А.Д. Тищенко, Г.М. Агафонов, Н.Т. Киреев // Механика турбулентных потоков. – М., 1980. – С. 238-247.
2. Силенко Е.М. Сравнительный анализ измерителей функции перемежаемости / Е.М.Силенко, А.К.Скрыльников, А.Д.Тищенко // Проблемы гидромеханики в освоении океана: В кн.: тр. III респ. Конференции по прикладной гидромеханике, ч. I. – Киев, 1984. – С. 88-89.
3. А.с. 515124. И. Кл2 G06 G7/57 Способ измерения коэффициента перемежаемости / И.Л. Повх, А.Д.Тищенко, А.А. Зори и др. – №2029014/18-24; заявл. 03.06.74; опубл. 25.05.76, Бюл. №19.
4. Antonia R.A., Atkinson J.D. Use of a pseudo-turbulent signal to calibrate an intermittency measuring circuit. – J. Fluid Mech., 1974, vol.64 ht 4.
5. La Rue J.C. Detection of the turbulent – nonturbulent interface in slightly heated turbulent shear flows. – Phys. Fluids, 1974, vol. 17, N 8.

6. Алгоритмы обработки данных при исследовании перемежаемых течений жидкостей / А.Д. Тищенко, Г.М. Агафонов, Н.Т. Киреев, В.З. Карчикан // В кн.: II Всесоюз. Совещание «Экспериментальные методы и аппаратура для исследования турбулентности»: Тезисы доклада. Новосибирск: Ин-т теплофизики СО АН СССР, 1976.
7. Исследование на ЭВМ перемежаемости следа за цилиндром в температурно-стратифицированном потоке адаптивными алгоритмам / И.Л. Повх, Н.И. Болонов, В.Г. Лобачев и др. // Струйные течения жидкостей и газов: тез. Всесоюз. науч. конф.: (2-5 июня, 1982г.). – Новополюцк, 1982. – Ч. 1. – С. 30-37.
8. Болонов Н.И. Гидродинамическая труба для создания и исследования развития многослойного стратифицированного потока / Н.И. Болонов, В.Г. Лобачев // Известия АН СССР. Сер.: Физика атмосферы и океана. – 1979. – Т. 15, №3. – С. 335-338.
9. Болонов Н.И. Моделирование развития турбулентного следа в слоисто-стратифицированной среде / Н.И. Болонов, В.Г. Лобачев, Н.А. Пригода // Вісн. Донецьк. ун-ту. Сер. А, Природничі науки. – 2009. – №2.
10. Разделимость статистик перемежаемого турбулентного течения / Е.М. Силенко, С.Е. Силенко, И.И. Худяков, Н.А. Пригода // Донецкие чтения 2016. Образование, наука и вызовы современности: Материалы I Международной научной конференции (Донецк, 16-18 мая 2016 г.). – Том 1. Физико-математические, технические науки и экология / Под общей редакцией проф. С.В. Беспаловой. – Ростов-на-Дону: Издательство Южного федерального университета, 2016. – С. 189.

Поступила в редакцию 13.04.2018 г.

EXPERIMENTAL STUDY OF MOVABLE TURBULENCE IN THE CYLINDER THROUGH ADAPTIVE ALGORITHMS

N.Bolonov, E.Pometun, E.Silenko, S.Silenko, V.Lebedev

The processing of the intermittent turbulence data in the wake of the cylinder in a stratified flow with a low Reynolds number is carried out using an algorithm and a classification device that ensure greater accuracy of the results obtained. It is established that large eddies exert a decisive influence on the formation of the interface between the track behind the cylinder. First of all, stratification affects the large-scale vortex structure of the flow and is considerably smaller on a small-scale structure.

Key words: turbulence, function and intermittency coefficient, classification algorithm, multilayer stratification, trail.

Пометун Екатерина Дмитриевна, аспирант кафедры ФНПМиЭ им.И.Л. Повха, ГОУ ВПО «ДонНУ». ДНР, Донецк.
Alternativa19031992@rambler.ru.
г. Донецк, ул. Нестерова 23,а.
Телефон для контактов: +380668521654

Pometun Ekaterina Dmitrievna, Post-graduate student, Donetsk National University

Болонов Николай Иванович, доктор технических наук, профессор. кафедры ФНПМиЭ им. И.Л.Повха. ГОУ ВПО «ДонНУ». ДНР, Донецк

Bolonov Nikolay Ivanovich, doctor of technical sciences, professor, Donetsk National University

Силенко Евгений Михайлович, ст. научн. сотр. ГОУ ВПО «ДонНУ». ДНР, Донецк

Silenko Evgeniy Mihaylovich, senior scientific collaborator, Donetsk National University, Donetsk

Силенко Сергей Евгеньевич, вед. инж. ГОУ ВПО «ДонНУ». ДНР, Донецк

Silenko Sergey Evgeniyevich, leading engineer, Donetsk National University, Donetsk

Лебедев Владимир Николаевич, заведующий лабораторией, старший преподаватель кафедры ФНПМиЭ им.И.Л. Повха.. ГОУ ВПО «ДонНУ». ДНР, Донецк, lvn@ukr.net.

Lebedev Vladimir Nikolayevich, Head of the laboratory, senior lecturer of the department, Donetsk National University

УДК 535.421

АЛГОРИТМ РАСЧЕТА АКУСТООПТИЧЕСКОГО УСТРОЙСТВА ПО ВИДУ ЭЛЕКТРООПТИЧЕСКОЙ КРИВОЙ

© 2018 *И.А. Третьяков, Т.В. Белик*

В настоящей работе предложен алгоритм расчета акустооптического модулятора по виду его амплитудно-частотной характеристики, включающий расчет геометрии акустооптического взаимодействия, расчет элементов согласующей цепи и углового режима дифракции. Предложена классификация технических характеристик акустооптического модулятора.

Ключевые слова: Акустооптический модулятор, электрооптические кривые, согласующая цепь, параметр Клейна-Кука, угол Брэгга, дифракция.

Введение. Акустооптические устройства предназначены для управления лазерным пучком, принцип действия которого основан на акустооптическом эффекте, и находят применение в качестве элемента ввода данных в оптоэлектронные системы спектрального и корреляционного анализа радиосигналов, реализующее линейные преобразования энергии управляющего радиосигнала в энергию лазерного пучка, а частоты радиосигнала в угол отклонения пучка. Как элемент оптических систем спектрального и корреляционного анализа радиосигналов акустооптические устройства, частности, акустооптические модуляторы, представлены в работах [1,2].

Акустооптический модулятор (АОМ) отличается от других акустооптических устройств (например, акустооптических затвора, дефлектора, фильтра, расщепителя лазерного пучка и др.) геометрией акустооптического взаимодействия, создающей линейную модуляционную характеристику, входной и выходной оптикой (оптической схемой формирования лазерного пучка определенной формы до поступления его на АОМ и после выхода) и схемой электрического согласования с трактом управляющего радиосигнала [3].

Постановка задачи. Сложность физического явления дифракции света на акустических колебаниях, а также сложность математического аппарата, описывающего данное явление [4], практически исключают возможность инженерного проектирования акустооптических устройств управления лазерным пучком, используемых в обработке информации, вычислительной технике, медицине и промышленности. Возникает необходимость разработки алгоритма расчета акустооптического устройства для ввода данных в оптоэлектронные системы.

Алгоритм расчета акустооптического устройства. Предлагаемый алгоритм расчета АОМ содержит следующее:

-Выбор материалов светозвукопровода (СЗП), электроакустического преобразователя (ЭАП), акустической нагрузки, связующих слоев с учетом совместимости по физико-химическим свойствам.

-Определение параметров электрической эквивалентной схемы электроакустического преобразователя (ЭАП) в виде пьезоэлектрической пластины (пьезопреобразователя), кристалла или пленки.

-Определение геометрии акустооптического взаимодействия.

-Расчет электрической цепи, согласующей ЭАП с источником радиосигнала.

-Расчет электрооптической эффективности и углового режима дифракции.

Необходимыми исходными данными для расчета АОМ являются:

- Длительность обрабатываемого радиосигнала – T , мкс.
- Среднеарифметическая частота рабочего диапазона – f_a , МГц.
- Относительная полоса рабочих частот – $\Delta\Omega$.
- Уровень неравномерности электрооптической частотной характеристики – Δ_H , дБ.
- Длина волны лазерного излучения – λ , мкм.
- Мощность источника радиосигнала на согласованной нагрузке – P_0 , Вт.
- Выходное сопротивление источника радиосигнала – R_Γ , Ом.

Выбор соответствующих материалов с учетом их совместимости по физико-химическим свойствам изложен в [5].

Электрическая эквивалентная схема электроакустического преобразователя на основе пьезоэлектрической пластины (ПП) для АОМ обоснована в [2] и представлена на рис. 1.

Определение параметров электрической эквивалентной схемы ПП сводится к определению безразмерных параметров последовательного L_kCR контура (без учета диссипативных потерь в элементах ЭАП на основе ПП): коэффициента электрической связи

$$k = \frac{C}{C_0} = \frac{k_{эм}^2}{(1 - k_{эм}^2)} \text{ и добротности } Q = \frac{1}{(\omega_0 CR)}, \text{ где:}$$

C – динамическая емкость последовательного L_kCR – контура;

C_0 – статическая емкость пьезопластины ЭАП;

$k_{эм}$ – коэффициент электромеханической связи используемой пьезоэлектрической пластины;

ω_0 – резонансная частота последовательного L_kCR – контура эквивалентной схемы ПП.

Если волновые акустические сопротивления ПП $z_{ПП}$, связующих ПП и СЗП слоев, а также СЗП $z_{СЗП}$ близки, а диссипативные потери в ПП и связующих слоях малы, то при расчете добротности эквивалентной схемы можно считать, что

$$Q = \frac{\pi}{2} \left(\frac{z_{ПП}}{z_{СЗП}} \right).$$

Частотную характеристику электрооптической эффективности (ЭОЧХ) акустооптического модулятора определим в соответствии с [1] в виде:

$$K_d(\Omega) = K_a \prod_{i=1}^4 k_i(\Omega), \tag{1}$$

где K_a – акустооптическая эффективность;

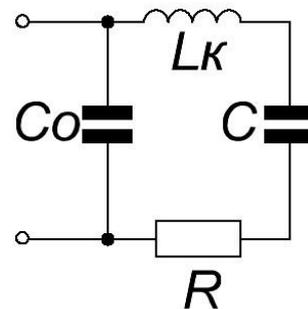


Рис. 1. Электрическая эквивалентная схема пьезопреобразователя АОМ

$k_1(\Omega)$ – частотная зависимость энергетической эффективности преобразования электрической цепи, согласующей ПП с источником управляющего радиосигнала;

$k_2(\Omega)$ – частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная механизмом акустооптического взаимодействия;

$k_3(\Omega)$ – частотная зависимость акустооптической эффективности, обусловленная затуханием акустической волны при распространении в СЗП;

$k_4(\Omega)$ – частотная зависимость диссипативных потерь в ЭАП и элементах узла электрического возбуждения ЭАП.

Частотная зависимость преобразования согласующей цепи, в соответствии с [2], имеет вид $k_1(\Omega) = \frac{P_H}{P_0} = 1 - |\Gamma|^2$ и определяется параметрами внешней согласующей цепи и параметрами электрической эквивалентной схемы ПП, где P_H – электрическая мощность, поглощаемая входом электрической согласующей цепи; P_0 – мощность управляющего радиосигнала.

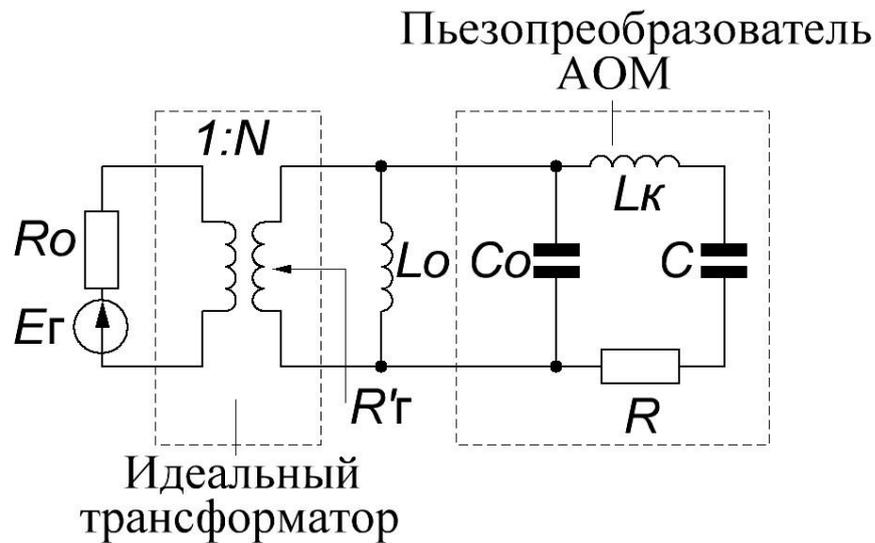


Рис. 2. Полосовая двухзвенная согласующая цепь

Для полосовой двухзвенной согласующей цепи, оптимальной в смысле Фано, (рис. 2) модуль коэффициента отражения в сечении «источник управляющего радиосигнала – согласующая цепь» имеет вид

$$|\Gamma|^2 = \frac{\left[Q\sqrt{k} - 1 - (1/Q\sqrt{k})(\Omega - 1/\Omega)^2 Q^2 \right]^2 + (\Omega - 1/\Omega)^2 Q^2 (1 - 1/Q\sqrt{k})^2}{\left[Q\sqrt{k} + 1 - (1/Q\sqrt{k})(\Omega - 1/\Omega)^2 Q^2 \right]^2 + (\Omega - 1/\Omega)^2 Q^2 (1 + 1/Q\sqrt{k})^2},$$

где $\Omega = f/f_0$ – относительная частота; $f_0 = 1/(2\pi\sqrt{L_k C})$ – частота последовательного резонанса электрической эквивалентной схемы ПП; $f_0 = \sqrt{f_n f_g}$ – среднегеометрическая частота частотной характеристики согласующей цепи; f_n и f_g –

соответственно нижняя и верхняя частоты рабочего диапазона по уровню неравномерности частотной характеристики согласующей цепи.

Зависимость $k_1(\Omega)$ представлена на рис. 3.

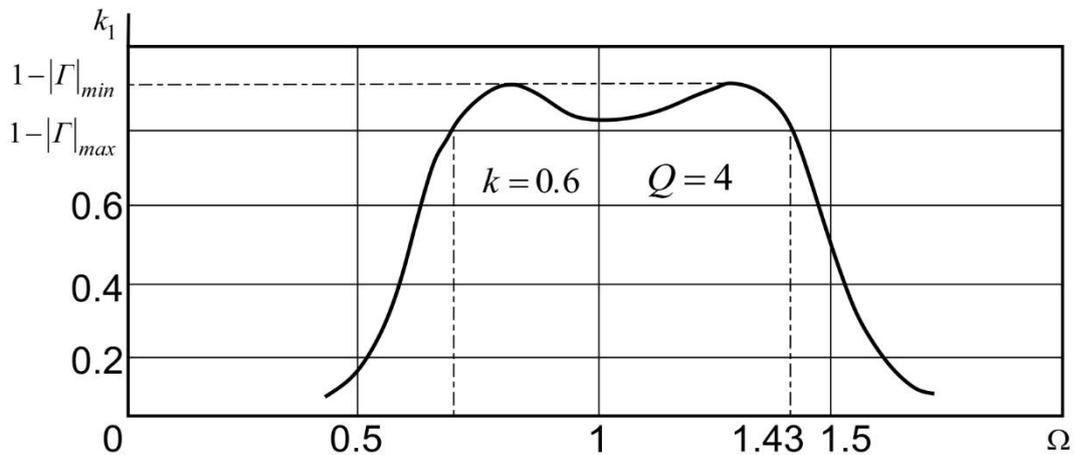


Рис. 3. Частотная зависимость преобразования согласующей цепи

$$k_2(\Omega) = \left[\frac{\sin 0,25 Q_{kk} (P^2 \Omega^2 - P \Omega)}{0,25 Q_{kk} (P^2 \Omega^2 - P \Omega)} \right]^2,$$

где $P = f_B / f_0$ – относительная расстройка среднегеометрической частоты характеристики $k_1(\Omega)$ по отношению к частоте Брэгга – $f_B = 2n \sin \Theta_B / \lambda$; n – показатель преломления среды СЗП; Θ_B – угол Брэгга.

При переменном параметре Клейна – Кука Q_{kk} и $P=1$ семейство частотных характеристик $k_2(\Omega)$ изотропного акустооптического взаимодействия показано на рис. 4.

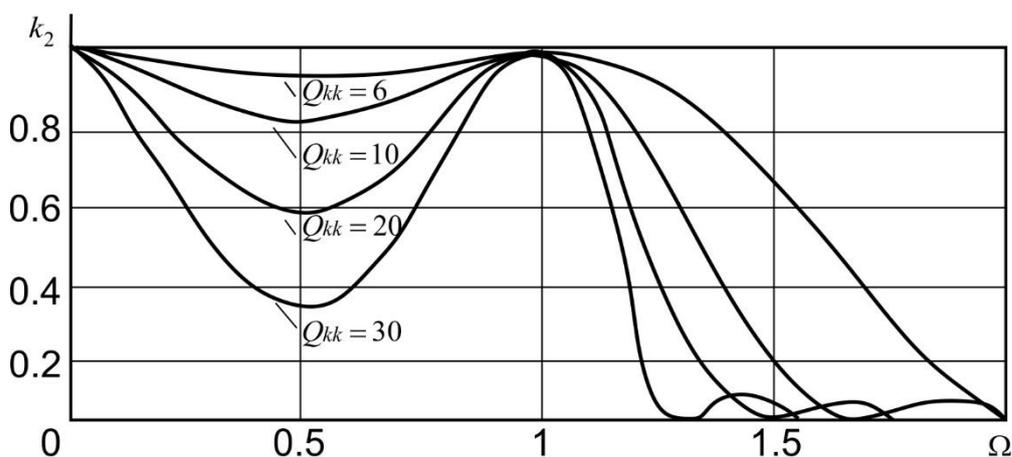


Рис. 4. Семейство частотных характеристик изотропного акустооптического взаимодействия

$$k_3(\Omega) = \frac{P_{ак}}{P_a} = \frac{1 - \exp(-x_0\Omega^2)}{x_0\Omega^2},$$

где $P_{ак}$ – мощность акустической волны, излучаемой ПП; P_a – мощность акустической волны, участвующей в акустооптическом взаимодействии; $x_0 = 2\alpha_0 V_a T f_0^2$; α_0 – коэффициент затухания акустической волны; V_a – скорость акустической волны в СЗП.

Семейство частотных характеристик $k_3(\Omega)$ с переменным параметром x_0 показано на рис. 5.

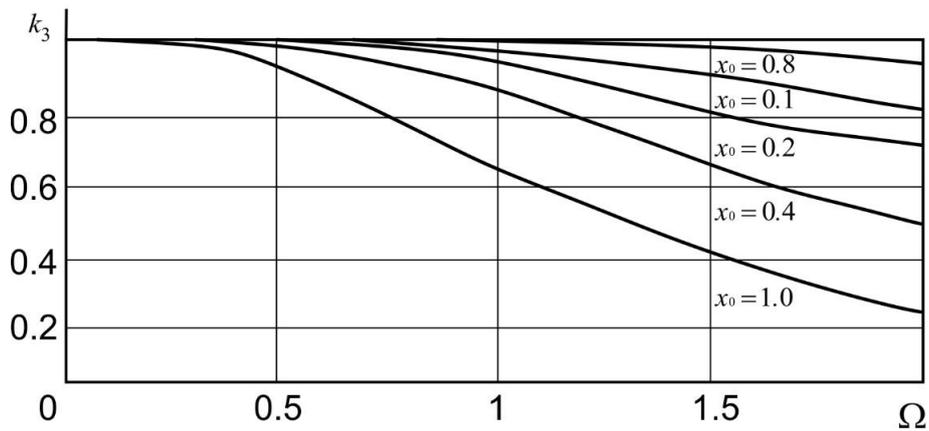


Рис. 5. Затухания акустической волны в СЗП в зависимости от параметра x_0

Сведения о механизме диссипативных потерь в тракте электроакустического преобразователя $k_4(\Omega)$ практически отсутствуют [4]. Естественно предположить, что в отсутствии диссипативных потерь, т. е. когда $k_4(\Omega) = 1$, мощность, поглощаемая согласующей цепью, равна мощности, излучаемой ПП ($P_n = P_a$).

Раскрывая (1), сделав переобозначения, запишем ЭОЧХ акустооптического модулятора в виде:

$$K_d(\Omega) = K_a \prod_{i=1}^4 k_i(\Omega) = A Q_{kk} \prod_{i=1}^4 k_i(\Omega) = \frac{\pi n^2 \Lambda_B^2 M_2}{4H\lambda^3 \cos^2 \Theta_B} \frac{2\pi\lambda L}{n\Lambda_B^2} \prod_{i=1}^4 k_i(\Omega),$$

где $k_1(\Omega) = f(k, Q, \Omega)$; $k_2(\Omega) = f(Q_{kk}, P, \Omega)$; $k_3(\Omega) = f(x_0, \Omega)$; $k_4(\Omega) = 1$;

$A = \frac{\pi n^2 \Lambda_B^2 M_2}{4H\lambda^3 \cos^2 \Theta_B}$ – параметр взаимодействия; Λ_B – длина акустической волны на частоте, при которой углы падающей и дифрагировавшей оптических волн

относительно нормали к фронту акустической волны равны; $M_2 = \frac{n^6 p^2}{\rho V_a^3}$ –

акустооптическая добротность среды СЗП; p – фотоупругая постоянная среды СЗП; ρ – плотность среды СЗП; H – поперечный размер внешнего электрода; λ – длина

волны лазерного пучка в вакууме; $Q_{kk} = \frac{2\pi\lambda L}{n\Lambda_B^2}$ – параметр Клейна – Кука [1]; L – продольный размер внешнего электрода.

Дальнейший анализ проведем по нормированной ЭОЧХ:

$$K'_d(k, Q, x_0, Q_{kk}, P, \Omega) = \frac{K_d(A, P_0, k, Q, x_0, Q_{kk}, P, \Omega)}{4H\lambda^3 \cos^2 \Theta_B} = Q_{kk} k_1(k, Q, \Omega) k_2(Q_{kk}, P, \Omega) k_3(x_0, \Omega) k_4(\Omega). \quad (2)$$

В (2) параметры k , Q и x_0 определяются физическими свойствами материалов узла акустооптического взаимодействия [1] и параметрами обрабатываемого сигнала, т. е. после изготовления заготовки АОМ они становятся неуправляемыми. Управляемыми параметрами ЭОЧХ являются Q_{kk} и P . Таким образом, заданный вид электрооптической частотной характеристики можно получить соответствующим выбором значений этих параметров. Это предлагается реализовать численными методами, для чего на ЭВМ рассчитывается семейство нормированных ЭОЧХ при различных значениях Q_{kk} и P (рис. 6). Для изотропной дифракции в случаях, представляющих практический интерес, значения параметров лежат в пределах $Q_{kk} = 10 \dots 50$ и $P = 0,4 \dots 1,4$.

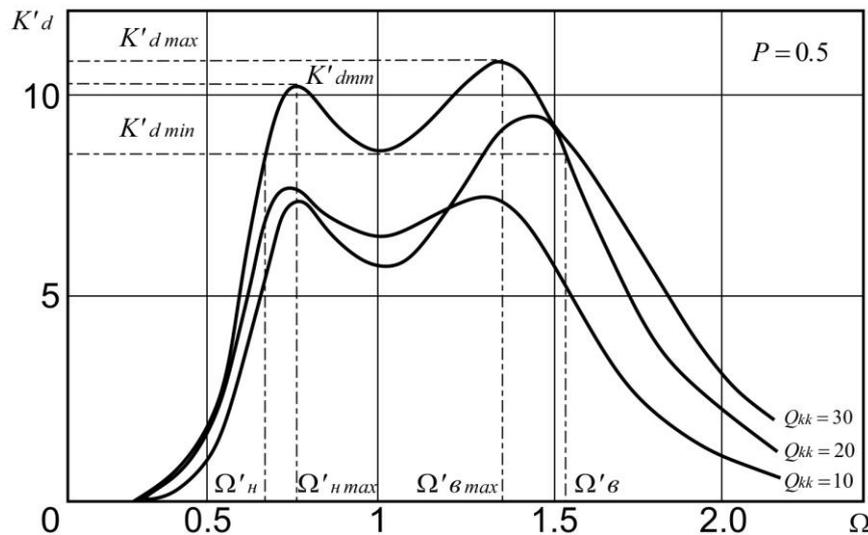


Рис. 6. Семейство нормированных ЭОЧХ акустооптического модулятора

Из множества рассчитанных ЭОЧХ выбирается характеристика, соответствующая заданной, и таким образом, становятся известными искомые значения Q_{kk} и P .

По выбранной кривой ЭОЧХ для создаваемого АОМ определяются следующие безразмерные параметры:

- уровень неравномерности $\Delta_n = 10 \lg(K'_{d \max} / K'_{d \min})$, дБ;
- относительные верхняя и нижняя частоты Ω'_b и Ω'_n ;

- среднегеометрическая относительная частота полосы пропускания по уровню не-равномерности $\Omega_{0\Gamma} = \sqrt{\Omega'_e - \Omega'_n}$;

- относительная полоса по уровню неравномерности $\Delta_{отн} = \Omega'_e - \Omega'_n / \Omega_{0\Gamma}$;

- среднеарифметическая относительная частота полосы пропускания по уровню не-равномерности $\Omega_{аотн} = 0,5(\Omega'_e - \Omega'_n)$;

- перекося частотной характеристики $\Delta_{\Pi} = \frac{K'_{d\max} - K'_{d\min}}{(\Omega'_{\max e} - \Omega'_{\max n})K'_{d\min}}$;

- электрооптическое затухание (характеризует потери электрооптической эффективности относительно максимально возможной) $a_{\Pi} = 10 \lg(Q_{kk} / K'_{d\min})$.

Далее по выбранному Q_{kk} определяется длина акустооптического взаимодействия:

$$L = \frac{Q_{kk} n V_a^2}{2n \lambda f_B^2}.$$

Влияние на ЭОЧХ дифракционной расходимости акустической волны, определяемой поперечным размером H пьезоэлектрической пластины, сводится к минимуму – выбором такого значения, при котором для акустических волн обеспечивается режим ближней зоны в нижней части рабочего диапазона частот. Для электродов прямоугольной формы:

$$H = \sqrt{\frac{2V_a^2 T}{f'_n}},$$

где $f'_n = f_0 \Omega_{0\Gamma}$. Размер СЗП в направлении распространения акустической волны определяется из соотношения $D = V_a T$, соответственно площадь верхнего электрода равна $s = LH$.

При расчете электрической согласующей цепи размерные параметры четырехэлементной эквивалентной схемы определим из следующих соображений. Статическая емкость ПП равна [2]:

$$C_0 = \varepsilon^s \varepsilon_0 s / t,$$

где ε^s – диэлектрическая проницаемость зажатой пластины пьезоэлектрика; $\varepsilon_0 = 8,85$ пФ/м; $t = V_a / (2f_0)$ – толщина ПП.

Сопротивление излучения ПП определяется как $R = 1/(\omega_0 C_0 k Q)$.

Очевидно, что исходными данными для расчета являются:

- площадь внешнего электрода s ;
- параметры четырехэлементной эквивалентной схемы ПП;
- волновое сопротивление передающего тракта R_{Γ} ;
- число звеньев согласующей цепи n (для определенности примем $n = 2$) ;
- тип частотной характеристики рабочего затухания (например, Чебышева).

В результате расчетов определяются общие параметры согласования и параметры элементов согласующей цепи:

- максимально достижимая относительная полоса частотной характеристики рабочего затухания $\Delta\Omega = 2\Delta f / f_0 = (k - 1/Q^2)^{0,5}$;

- абсолютная полоса по уровню максимального рабочего затухания $2\Delta f = f_0\Delta\Omega$;

- нижняя граничная частота $f_n = -\Delta f + [(\Delta f)^2 + f_0^2]^{0,5}$;

- верхняя граничная частота $f_в = f_n + 2\Delta f$;

- граничная обобщенная расстройка $\xi_p = \pm(\Omega_{в,н} - 1/\Omega_{в,н})Q = \pm(kQ^2 - 1)^{0,5}$, где $\Omega_{в} = f_{в}/f_0$, $\Omega_{н} = f_{н}/f_0$ – относительная верхняя и нижняя частота;

- оптимальное внутреннее сопротивление источника управляющего радиосигнала $R'_Г$, определяемое из соотношения $H_0 = R'_Г/R_Г = (\xi^2 + 1)^{0,5} = (kQ^2)^{0,5}$, где H_0 равен максимальному коэффициенту стоячей волны по напряжению $H_0 = KCBH_{\max}$, $\Delta R'_Г = R_Г H_0$;

- максимальный модуль коэффициента отражения $|\Gamma|_{\max} = (H_0 - 1)/(H_0 + 1)$;

- частоты минимумов двугорбой частотной характеристики рабочего затухания:

$$\Omega_{в,н \min} = \pm v_{\min} / 2 \pm [(v_{\min} / 2)^2 + 1]^{0,5} ,$$

$$v_{\min} = (\Omega_{в,н} - 1/\Omega_{в,н}) = \pm [(H_0^2 - 1)/2]^{0,5} / Q ,$$

$$f_{н \min} = f_0 \Omega_{н \min} , f_{в \min} = f_0 \Omega_{в \min} ;$$

- максимальное рабочее затухание $a_{p \max} = 10 \lg(1 - |\Gamma|_{\max}^2)^{-1}$;

- минимальный модуль коэффициента отражения:

$$|\Gamma|_{\min}^2 = \frac{(H_0^2 - H_0 - \xi_{н \min}^2)^2 + \xi_{н \min}^2 (H_0 - 1)^2}{(H_0^2 + H_0 - \xi_{н \min}^2)^2 + \xi_{н \min}^2 (H_0 + 1)^2} , \text{ где } \xi_{н \min}^2 = (H_0^2 - 1)/2 ;$$

- уровень неравномерности частотной характеристики рабочего затухания:

$$\Delta a_n = a_{p \max} - a_{p \min} = 10 \lg \left(\frac{1 - |\Gamma|_{\min}^2}{1 - |\Gamma|_{\max}^2} \right) ;$$

- величина индуктивности, параллельной пьезопреобразователю $L_0 = 1/(\omega_0^2 C_0)$.

Параметры частотной характеристики рабочего затухания согласующей цепи показаны на рис. 7.

Так как требуемое сопротивление источника управляющего радиосигнала $R'_Г$ часто отличается от волнового сопротивления передающего тракта $R_Г$, необходим трансформатор с полосой пропускания не уже чем у согласующей цепи. В области метрового и дециметрового диапазонов используют четвертьволновые трансформаторы на микроаксиальных кабелях. Перспективно применение трансформаторов типа

длинной линии и неоднородных – на основе полосковых волноводов. Если требуется повышение сопротивления от источника радиосигнала к согласующей цепи, а значение $L_0 > 1$ мкГн, целесообразно применение автотрансформатора на основе той же индуктивности.

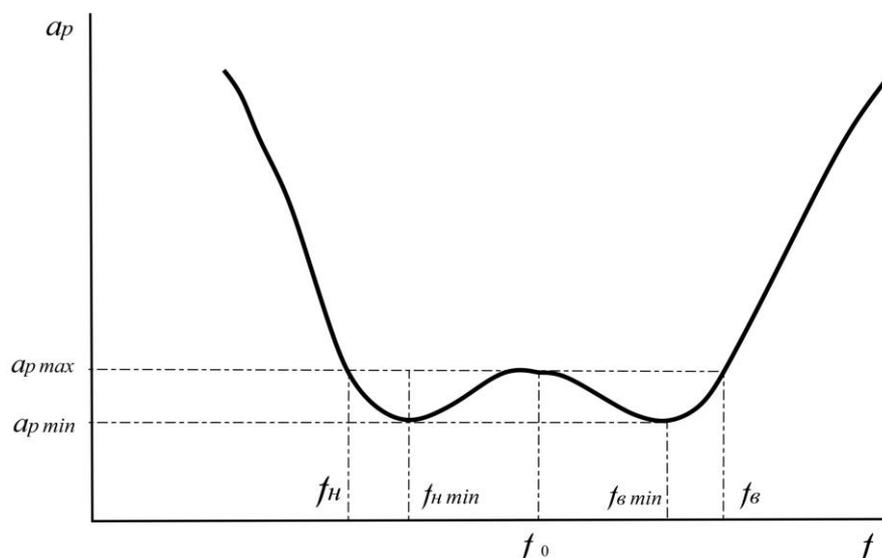


Рис. 7. Параметры ЧХ рабочего затухания согласующей цепи

Расчет электрооптической эффективности проводится по уровню неравномерности частотной характеристики (рис. 6) согласно выражению:

$$K_{d \min} = K'_{d \min} (k, Q, x_0, Q_{kk}, P, \Omega) A P_0 = \frac{\pi M_2 n \lambda_B^2}{4 h \lambda} P_0 K'_{d \min} .$$

Угол, под которым устанавливается акустооптический модулятор в оптическую систему (угол между нормалью к направлению распространения акустической волны и направлением распространения лазерного пучка от источника), или угловой режим дифракции, определяется по формуле $\Theta_B = \arcsin(\lambda f_B / 2V_a)$.

При такой последовательности алгоритма инженерного расчета АОМ и с учетом возможности выходного метрологического контроля предлагается сводить результаты в следующие группы технических характеристик (табл. 1).

Таблица 1. Классификация технических характеристик АОМ

Электрооптические характеристики	Тип электрооптической характеристики (ЭОЧХ)
	Среднегеометрическая частота ЭОЧХ f_{CT}
	Уровень неравномерности ЭОЧХ Δ_H
	Абсолютная полоса рабочих частот $2\Delta f_{abc}$
	Электрооптическая эффективность $K_{d \min}$
	Электрооптическое затухание a_{II}
	Длительность обрабатываемого сигнала T

	Параметр Клейна-Кука Q_{kk}
	Угол Брэгга Θ_B
Электрические характеристики	Тип согласующей цепи (например, двухзвенная, Чебышева)
	Тип частотной характеристики рабочего затухания (например, равноволновая)
	Максимальный $KCBH$ в передающем тракте $KCBH_{\max}$
	Волновое сопротивление передающего тракта R_{Γ}
	Максимальное рабочее затухание $a_{\Pi \max}$
	Неравномерность частотной характеристики рабочего затухания Δa_{Π}
	Среднегеометрическая частота характеристики рабочего затухания f_C
	Относительная полоса частотной характеристики рабочего затухания $\Delta\Omega$
Конструктивные характеристики	Продольный размер внешнего электрода ЭАП, определяющий длину акустооптического взаимодействия L
	Поперечный размер внешнего электрода H
	Полуволновая толщина пьезоэлектрической пластины d
	Размер оптической апертуры вдоль направления распространения акустической волны D
	Долговременность обеспечения температурной стабильности электрооптических и электрических характеристик АОМ t_1
	Диапазон уровней вибрации, обеспечивающий стабильность электрооптических и электрических характеристик АОМ
	Диапазон уровней удара, обеспечивающий стабильность электрооптических и электрических характеристик АОМ

Выводы. В данной работе впервые рассмотрен алгоритм расчета акустооптического устройства ввода информации в оптоэлектронные системы спектрального и корреляционного анализа радиосигналов. Особенностью данного алгоритма расчета является предположение [1] об отсутствии искажений в акустооптической ячейке, работающей на линейном участке модуляционной характеристики АОМ. Предлагаемый алгоритм предусматривает расчет акустооптического устройства как в режиме Брэгга, так и в режиме Рамана – Ната.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов В.В. Классификационный анализ акустооптических устройств управления лазерным пучком / В.В. Данилов // Технология и конструирование в электронной аппаратуре. – 2000. – №2-3. – С.52-57.
2. Данилов В.В. Акустооптический модулятор / В.В. Данилов // Радиотехника. – Изд-во Харьковского техн. ун-та радиотехники. – 1999. – № 112. – С. 66-74.
3. Белик Т.В. Лазерное модуляционное устройство / Т.В. Белик, В.В. Данилов, Е.В. Деркаченко // ПТЭ. – 1992. – № 4. – С. 236-237.
4. Данилов В.В. Материалы и технология реализации акустооптических устройств / В.В. Данилов // Материалы VI междунар. Крымской конф. «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 1996. – С. 452-455.
5. Балакший В.И. Физические основы акустооптики. / В.И. Балакший, В.Н. Парьгин, Л.Е. Чирков. – М.: Радио и связь, 1985.

Поступила в редакцию 17.05.2018 г.

ALGORITHM OF THE CALCULATION OF ACOUSTICAL DEVICE BY ELECTRO-OPTICAL CURVE

I.Tretiakov, T.Belik

In this paper, an algorithm for calculating an acoustooptic modulator in terms of its amplitude-frequency characteristic, including calculation of the geometry of the acoustooptic interaction, calculation of the elements of the matching circuit and the angular diffraction regime is proposed. The classification of technical characteristics of an acoustooptic modulator is proposed.

Keywords: Acoustooptic modulator, electro-optical curves, matching circuit, the Klein-Cook parameter, Bragg angle, diffraction.

Третьяков Игорь Александрович

ассистент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

E-mail: es75i@mail.ru

Белик Татьяна Владимировна

ст. преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.

E-mail: tblom@mail.ru

Tretiakov Igor

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

Belik Tatyana

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

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ



УДК 621.395

БЕСПРОВОДНАЯ СВЯЗЬ В ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ СЕТЯХ ПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

© 2018 *И.А. Молоковский, В.Н. Лозинская*

В статье рассмотрены вопросы использования беспроводной связи в подземных выработках угольных шахт. В диапазоне частот от 200 МГц до 1 ГГц предложено использовать более высокие частоты, что позволяет реализовать беспроводную связь в технологической сети, с точки зрения скоростной передачи информации и количества одновременно подключенных абонентов.

Ключевые слова: электромагнитные волны; частота; потери; модель распространения; беспроводная связь; технологическая связь, скорость передачи.

Введение. Рост механизации производственных процессов в шахтах выдвигал на передний план проблему создания качественной связи между различными группами сотрудников. При этом считалось желательным, чтобы весь персонал, выполняющий функции надзора и контроля, в любое время мог связаться друг с другом и с центральным диспетчерским пунктом. С другой стороны, в шахтах часто возникает проблема с повреждением кабеля. Именно для решения таких проблем направлено использование беспроводной связи [3,4]. К достоинствам такого подхода можно отнести: отсутствие применения дополнительного оборудования при расширении сети подземных выработок; возможность использования любым сотрудником, независимо от своего местонахождения; структурная надежность. Однако, условия распространения электромагнитных волн в шахтах, по сравнению с поверхностью, менее благоприятны. Надежная радиосвязь возможна в прямолинейных горных выработках и лишь в пределах прямой видимости. Затухания и отражения радиоволн каменным углем, боковыми породами и креплениями сильно ограничивают дальность действия радиосвязи.

Постановка проблемы. При частотах в диапазоне 200-1000 МГц горная порода и уголь выступают как диэлектрики с относительно низкими потерями и мало изменяющимися параметрами. При таких условиях разумно предположить, что передача принимает форму волноводного распространения в выработке, поскольку отрезки сверхвысоких частот (СВЧ) меньше размеров выработки. Электромагнитная волна, перемещается вдоль прямоугольной выработки в диэлектрической среде, может распространяться в любом из нескольких волноводных режимов. Все эти режимы – режимы «с потерями» вследствие того, что любая часть волны, которая ударяется о стену выработки, частично преломляется в окружающий диэлектрик и частично преломляется обратно в волновод. Преломленная часть волны об диэлектрик и представляет собой потерю энергии. Следует заметить, что скорости затухания волноводных режимов, которые рассматриваются в данной работе, зависят практически полностью от потери преломления для доминирующего и высоких режимов, которые возбуждаются при рассеянии сигнала, а не от омической потери. Поэтому проблема организации радиоканала в условиях подземной части угледобывающих предприятий является актуальной.

Целью данной статьи является выработка рекомендаций по организации радиоканала в неблагоприятных условиях.

Основная часть. Для достижения поставленной цели ограничимся следующими характеристиками среды распространения: выработка с прямоугольным поперечным сечением. Режимы распространения сигналов с наименьшими темпами затухания в прямоугольной выработке в диэлектрической среде представлены двумя режимами, электрическое поле E которых поляризовано преимущественно в горизонтальном (E_h) и вертикальном (E_v) направлениях. Эффект омической потери вследствие небольшой проводимости окружающего материала считается незначительным при частотах, которые представляют интерес для данного исследования.

Наибольшую скорость потери сигнала при высоких частотах относительно рассчитанных значений режима E_h (при независимости скорости потери от направления антенны) можно рассчитать, если обеспечить рассеяние энергии преобладающего режима E_h . Это реализуется с учетом воздействия шероховатости и наклона стен выработки. Рассеянная энергия переходит в различные режимы, и может считаться «диффузным» излучающим компонентом, который сопровождает режим E_h . Такой диффузный излучающий компонент находится в динамическом равновесии с режимом E_h . Это означает, что скорость его генерирования благодаря рассеянию режима E_h сбалансирована скоростью его потери путем преломления в окружающий диэлектрик. Так как диффузный компонент состоит частично из режима E_v и многих волноводных режимов более высокого порядка (все из которых имеют намного более высокие скорости потери на преломление, чем основной режим E_h), то точка динамического равновесия такова, что уровень диффузного компонента находится намного ниже, чем в режиме E_h в любой точке выработки [7].

На рисунке 1 приведена горизонтальная проекция, отображающая типичную геометрию боковой стенки выработок в подземной части угледобывающего предприятия. Кровля и почва этих выработок также обладают широкомасштабными вариациями наклона, так как выработки созданы в соответствии с волнистостью угольного пласта.

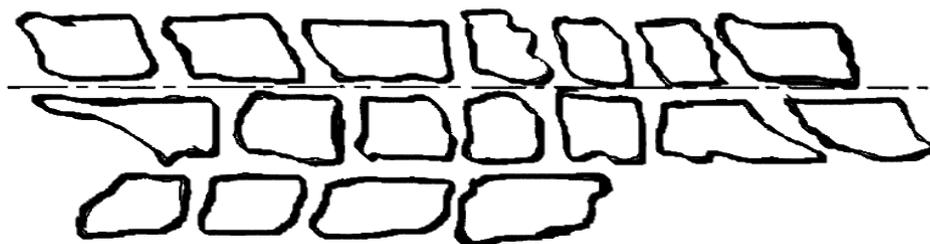


Рис. 1. Пример угольных горизонтальных выработок в поперечном разрезе

Математическая модель распространения электромагнитных волн должна рассчитывать оценку общих потерь сигнала в прямой выработке. Данная величина будет состоять из суммы оценок потерь распространения, влияния компонента диффузного излучения и вносимых потерь в приемных и передающих антеннах. Далее будут представлены оценки скорости потерь компонентов для режима E_h вследствие прямого преломления, шероховатости и наклона; общей скорости потерь распространения; вносимых потерь для двух полуволновых антенн; общих потерь для пяти различных расстояний.

Режим E_h в основной выработке состоит из пучка излучения, полученного вследствие небольшого соотношения между длиной волны и размерами выработки. Такой луч действует в большей степени в геометрической оптике, и практически не поддается влиянию выработок в диагональном штреке [8]. Следовательно, режим E_h очень слабо соотносится с режимами диагонального штрека.

В диэлектрической среде прямоугольной выработки режимы распространения электромагнитных волн представлены двумя режимами E_h и E_v . На рисунке 2 представлена геометрия волновода.

Система координат центрирована в выработке, при этом x – горизонтально, y – вертикально и z – вдоль выработки, как показано на рисунке 2.

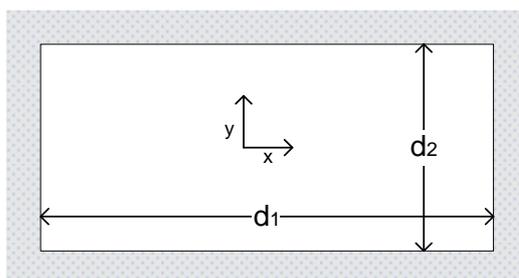


Рис. 2. Геометрия волновода

Основные компоненты поля режима E_h в выработке представлены следующим образом [5,6]:

$$E_x = E_0 \cos k_1 x \cos k_2 y \exp(-ik_3 z); \quad (1)$$

$$H_y = \frac{k_3}{\omega \mu_0} E_0 \cos k_1 x \cos k_2 y \exp(-ik_3 z), \quad (2)$$

где E_0 – напряженность электрического поля как функция пространственных координат; k_1, k_2, k_3 – постоянные распространения вдоль осей x, y, z .

Кроме поперечных компонент поля имеются небольшие продольные компоненты E_z и H_z , и небольшой поперечный компонент H_x . Для частот, которые рассматриваются в данной работе, k_1 и k_2 – небольшие по сравнению с k_3 . Это означает, что распространение волн происходит преимущественно в направлении z . С точки зрения геометрической оптики луч выполняет небольшой угол скольжения по стенам выработки.

Рассеянная диэлектриком волна состоит из двух видов прогрессивных форм: поперечных и продольных. Постоянная распространения k_3 для режима – это собственное значение, определенное граничными условиями непрерывности тангенциальных компонентов E и H на стенках выработки. Благодаря простой форме волны, указанной в (1) и (2) эти условия могут быть соблюдены только приблизительно. Однако можно получить достаточное приближенное значения k_3 . Воображаемая часть k_3 , которая возникает благодаря неплотному характеру режима, образует затухание волны определенной скорости. Потеря L_{Eh} в дБ для режима E_h рассчитывается из выражения [1]:

$$L_{Eh} = 4,3 \cdot \lambda^2 \cdot r \cdot \chi \left(\frac{K_1}{d_1^3 \sqrt{K_1 - 1}} + \frac{1}{d_2^3 \sqrt{K_2 - 1}} \right), \quad (3)$$

где K_1 – диэлектрическая постоянная боковых стен;
 K_2 – диэлектрическая постоянная кровли и почвы выработки;
 d_1, d_2 – ширина и высота выработки, соответственно;
 χ – коэффициент влияния конструктивных особенностей горной выработки;
 r – расстояние между приемо-передающими элементами.

Соответствующий результат для режима E_v следующий [1]:

$$L_{Ev} = 4,3 \cdot \lambda^2 \cdot r \cdot \chi \left(\frac{1}{d_1^3 \sqrt{K_1 - 1}} + \frac{K_2}{d_2^3 \sqrt{K_2 - 1}} \right). \quad (4)$$

Коэффициент влияния конструктивных особенностей горной выработки выведен в результате проведенных экспериментов. Для очистного забоя подземной части угледобывающего предприятия данный коэффициент может принимать значение от 0,5 до 0,8.

На рисунке 3 показаны темпы потери при преломлении радиосигнала в дБ/30м в качестве функции частоты, рассчитанной по формулам (3) и (4) для режимов E_h и E_v в выработке шириной 4,2 м и высотой 2,1 м, что характерно для откаточной выработки в соединении мощного пласта угля, и для $K_1 = K_2 = 10$, что соответствует углю на всех стенах выработки. Видно, что скорость потери при преломлении радиосигнала намного больше для режима E_v .

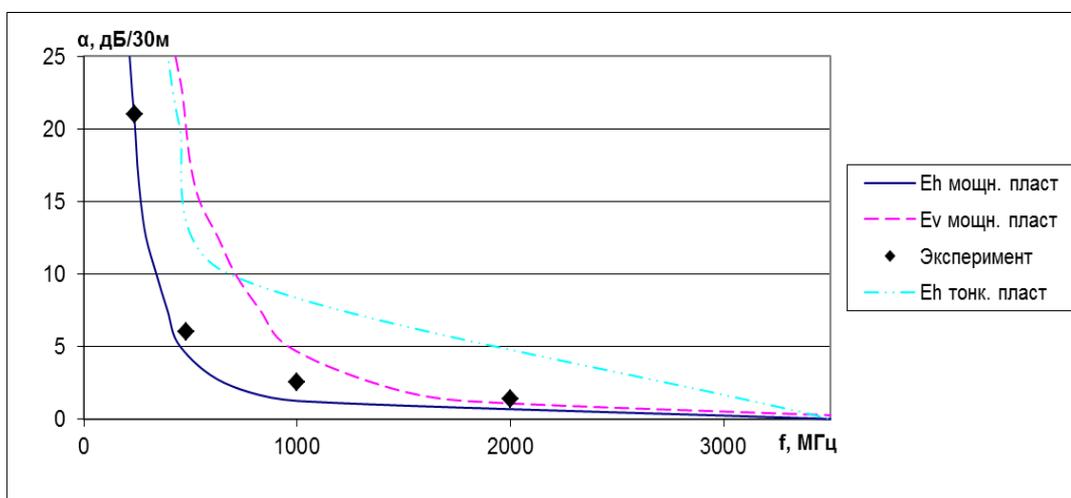


Рис. 3. Темпы потери при преломлении радиосигнала для режимов E_h и E_v в мощном и тонком пластах угля

Как упоминалось ранее рассеяние режима E_h в другие режимы для генерирования диффузного излучения возникает под воздействием двух факторов: шероховатость стенки и наклон стенки, которые представлены в выработках угледобывающих предприятий до обозначенной степени.

Шероховатость в данном случае считается местным изменением в уровне поверхности относительно среднего уровня поверхности стены. В случае нормального

распределения уровня поверхности, определенного посредством среднеквадратической шероховатости h , потеря в дБ путем режима E_h представлена формулой [1]:

$$L_{roughness} = 4,343\pi^2 h^2 \lambda r \chi \left(\frac{1}{d_1^4} + \frac{1}{d_2^4} \right). \quad (5)$$

Это также следствие диффузного компонента вследствие шероховатости.

Потеря вследствие шероховатости увеличивается вместе с длиной волны. Причина состоит в том, что на лучевой картине определенного режима угол скольжения луча на стенах волновода увеличивается вместе с длиной волны. Потеря варьируется непосредственно с углом скольжения и числом отскоков на единицу длины, и обратно пропорционально в зависимости от длины волны. Рост длины волны увеличивает первые два коэффициента и уменьшает третий. Результирующий эффект – повышение потери вместе с увеличением длины волны.

Наклон с длинным диапазоном стен выработки относительно средних плоскостей, которые определяют величины d_1 и d_2 в выработке, приводит к тому, что энергия в режиме E_h отклоняется от направлений, определенных условием баланса фаз для данного режима. Можно рассчитать средний коэффициент связи такого отклоненного излучения обратно в режим E_h , и таким образом найти скорость потери вследствие наклона. Результат в дБ следующий [1]:

$$L_{tilt} = \frac{4,343\pi^2 \theta^2 r \chi}{\lambda}, \quad (6)$$

где θ – среднеквадратический наклон.

Уравнение (6) также позволяет рассчитать скорость, при которой диффузный компонент набирает энергию из режима E_h в результате наклона.

По уравнениям (5) и (6) видно, что учет влияния шероховатости наиболее важен при низких частотах.

На рисунке 4 показано влияние шероховатости и наклона стенок выработки на распространение радиосигнала в режиме E_h , что добавляет темпы потери преломления. Кривые рассчитываются для среднеквадратической шероховатости в размере 1,2 м и для различных допущенных значений θ . Влияние наклона стенок выработки намного больше, чем воздействие шероховатости в рассматриваемом диапазоне частоты.

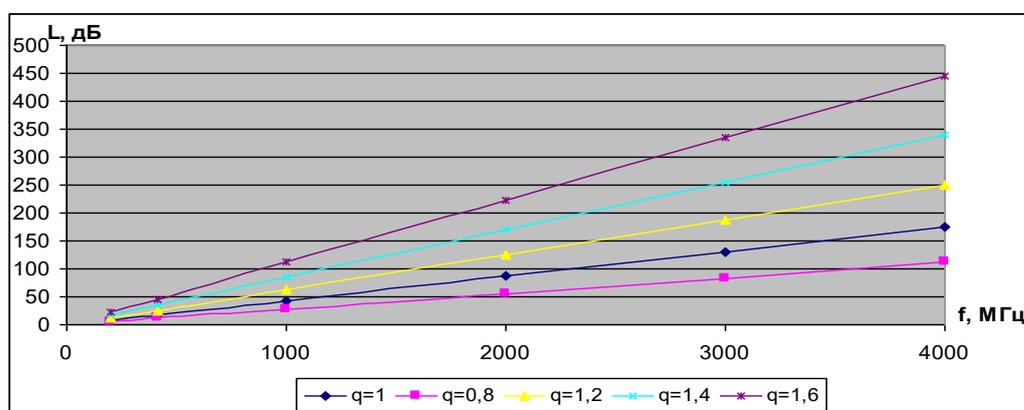


Рис. 4. Зависимость потерь радиосигнала от частоты, возникающих при изменении среднеквадратического наклона и влиянии шероховатости

Выводы. Проанализировав все приведенные исследования, можно сделать вывод, что в диапазоне от 200 до 3000 МГц наиболее выгодными являются частоты, близкие к 1 ГГц. На этих частотах ослабление сигнала значительно больше, чем на более низких. Этот недостаток можно устранить за счет установки дополнительного оборудования – повторителей. Т.к. эти частоты дают возможность использования большую скорость передачи информации. Также возможно использовать более большую ширину спектра, что является крайне необходимым при использовании большого количества абонентов и при использовании в условиях сложной обстановки с большим количеством препятствий. Результатами данной статьи является возможность технической реализации систем промышленной связи на базе беспроводных технологий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Молоковский И.А. Влияние окружающей среды на передачу радиосигналов в промышленных телекоммуникационных системах [Текст] / И.А.Молоковский // Матеріали VIII Міжнародної науково-технічної конференції «Сучасні інформаційно-комунікаційні технології». Львів: ДУІКТ, 2012 р. – С. 147-149.
2. Турупалов В.В. Информационная система обеспечения безопасности промышленных предприятий [Текст] / В.В. Турупалов // Науковий вісник Чернівецького університету «Комп'ютерні системи та компоненти. Збірник наукових праць. Том 3. Випуск 2 – Чернівці, 2012. – С. 65-68.
3. Турупалов В.В. Спеціалізована телекомунікаційна мережа в системі управління вугільною шахтою [Текст] / В.В. Турупалов, Р.В. Федюк, В.О. Попов // Автоматика-2004: 11-я міжнародна конференція по автоматичному управлінню, 27–30 вересня 2004 г.: тези докл. – К, 2004. – Т. 4. – С. 113.
4. Каличак М.Г. Режимы работы самоорганизующихся сетей в условиях промышленности [Текст]/ М.Г. Каличак, И.А. Молоковский // Автоматизация технологических объектов и процессов. Поиск молодых. Сборник научных трудов XVI научно-технической конференции аспирантов и студентов в г. Донецке 25-26 мая 2016 г. – Донецк, ДонНТУ, 2016. – 341 с. – С. 17-18.
5. Молоковский И.А. Расчет основных параметров передачи данных в сетях промышленных телекоммуникаций [Текст] / И.А. Молоковский, В.В. Турупалов, Е.Г. Игнатенко // Сборник научных трудов Донецкого национального технического университета, серия: Вычислительная техника и автоматизация – Донецк, 2012. -Выпуск 22 (200). – С. 115-119.
6. Савкин М. М. Распространение радиоволн в горных выработках [Текст] / М. М. Савкин // Радиосвязь и высокочастотная телемеханика в горной промышленности: сб. науч. тр. / СО АН СССР. – Новосибирск, 1964. – С. 7–38.
7. Studies on wireless communication systems for underground coal mines [Текст] / L.K. Bandyopadhyay, S. Kumar, P.K. Mishra A. and oth. // Proceedings of International Seminar on Coal Science and Technology – Emerging Global Dimensions: Allied Publishers. – New Delhi, 2008. – P.56–64.
8. Zhang, Y.P. Theory of radio wave propagation in railway tunnels [Текст] / Y.P. Zhang, Y. Hwang // IEEE Transaction Vehicle Technology. – 2008. – V.47. – P.1027–1032.

Поступила в редакцию 02.04.2018 г.

WIRELESS COMMUNICATION IN TECHNOLOGICAL NETWORKS OF INDUSTRIAL ENTERPRISES

I.O. Molokovskiy, V.N. Lozinskaya

In the article the author considers the problem of wireless communications. In the frequency range 200 MHz – 1 GHz is proposed to use higher frequencies. In the article a detailed description of each process functions.

Keywords: electromagnetic waves; frequency; losses; distribution model; wireless connection; technological connection, transmission speed.

Молоковский Игорь Алексеевич

кандидат технических наук, доцент; ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, доцент кафедры «Автоматика и телекоммуникации» e-mail: mia@donntu.org

Molokovskiy Igor Alekseevich

Candidate of Engineering Sciences, Assistant Professor; State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Donetsk, Assistant Professor at the Department of «Automation and Telecommunications»

Лозинская Виктория Николаевна

кандидат технических наук; ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, доцент кафедры «Автоматика и телекоммуникации», E-mail: lvn_04@mail.ru

Lozinskaya Vicktoriya Nickolaevna

Candidate of Engineering science; State Higher Education Establishment «Donetsk National Technical University», Donetsk, Assistant Professor at the Department of «Automation and Telecommunications»

УДК 623.77

ОБЗОР СПОСОБОВ УМЕНЬШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ РАСSEИВАНИЯ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ

© 2018 В.Ю. Рябченко, В.В. Паслён

Рассмотрены способы уменьшения эффективной поверхности рассеивания объектов, имеющих в своем составе антенные конструкции. Рассмотрены различные виды маскировок, подробно описана радиомаскировка, применение различных радиопоглощающих материалов и сред. Предлагается усовершенствовать уже существующий способ уменьшения эффективной поверхности рассеивания радиотехнических объектов за счет их защиты обтекателем.

Ключевые слова: эффективная поверхность рассеивания; радиотехнические объекты; радиопоглощающие материалы, способ уменьшения.

Введение. Во все времена желание разведать обстановку противника и остаться при этом незамеченным всегда было на первом плане. Вместе с разведкой развивались и способы маскировки. Способ уменьшения эффективной поверхности рассеивания является отдельным видом маскировки радиотехнических объектов.

Постановка задачи. Определить основные причины заметности радиотехнических объектов, которые имеют в своем составе антенные системы. Провести анализ радиопоглощающих материалов и исследовать предложенный способ маскировки, используя сферообразный защитный обтекатель из радиопрозрачного материала и заполненного радиопоглощающей средой.

Методика исследования. Главным моментом в исследовании данной проблемы является проектирование в программном продукте CST Studio модели объекта, имеющего в своем составе антенную систему, над которой устанавливается радиопрозрачная сферообразная защита. Данный способ позволяет решить поставленную задачу путем моделирования и получить результаты, максимально приближенные к реальным.

Маскировка – комплекс мероприятий, направленных на скрытие от противника войск и объектов, а также на введение его в заблуждение относительно наличия, расположения, состава, состояния, действий и намерений войск [1].

Началом нового этапа развития маскировки послужили наблюдения над маскировочной окраской животных и птиц. Американский художник Эббот Тейер сформулировал теорию, исходя из основ мимикрии. Он установил, что темными, обычно, являются те участки тел животных, которые чаще обращены к свету, а светлыми – которые спрятаны от солнца. Данный принцип камуфляжа получил название «закон Тэйера», либо «Противотени» [2].

Новым и важным этапом в развитии отечественного камуфляжа были двадцатые годы, когда командование Красной армии приняло решение о формировании Высшей школы военной маскировки, которые позже стали курсами усовершенствования командного состава. Главной задачей такой школы (позже, курсов) являлось повышение квалификации командования. В данных учреждениях преподавали, как правило, специалисты и офицеры, имевшие опыт, в частности, в области маскировочных работ в войсках. Результатом научной деятельности сотрудников данных учреждений стали специальные наставления о маскировке, выпущенные в 1924 году ещё во время Высшей школы. Издаваемые материалы повлекли за собой ряд

других работ советских авторов в области маскировки. Это привело к тому, что маскировка толковалась конкретно и имела свое место в комплексе мероприятий по военной хитрости. Маскировка занимает важное место в стратегических расчетах, так как она позволяет обмануть противника и выиграть при равных условиях [3].

Изучение маскировочной военной хитрости включало детальное рассмотрение обмана-имитации, дезинформации и демонстративных действий для устрашения противника. Как и прежде, самой доступной и эффективной оставалась маскировка, основанная на свойствах местности. Усовершенствование маскировочной стратегии способствовало серьёзному росту противодействия: способы разведки противника становились всё более сложными и ухищрёнными.

Уже в 1927 году появились три вида маскировочной одежды. В Государственном институте АН СССР были начаты фундаментальные научные исследования основ маскировки войск и техники с привлечением выдающихся ученых С.М.Вавилова, В.В.Шаронова и др.

В начале 30-х годов в СССР были разработаны костюмы с унифицированным деформирующим рисунком больших амёбообразных пятен, которые в сочетании с мешковатостью самого костюма, хорошо «разбивали» силуэт человека.

Помимо костюмов были разработаны ковры, имитирующие траву, оригинальная маскировочная бахрама-лента с вплетённым в неё мочалом, которой обматывались по голове и плечам. Таким образом, маскировка перешла на новый этап, скрывая более тщательным образом не только солдат, но и военную технику [4].

Наряду с маскировкой средства разведки также становились более сложными и точными. Так, во время Второй мировой войны использовалось, примерно, 5-6 видов разведки, сейчас же доступными являются приблизительно 20 разведывательных способов. Таким образом, средства разведки становятся приоритетными объектами в первоочередности поражения.

На особом счету средства радиолокационной, радиотехнической, телевизионной и других видов разведки, находящихся на наземных (надводных) и воздушных носителях. Они не только выполняют функции сбора информации об устройствах и системах путем непрерывного слежения за их электромагнитным излучением, но и сами являются демаскирующими объектами, даже если они находятся в нерабочем состоянии.

Уже в 1955 году были сформированы радиотехнические войска как отдельный вид ПВО[5]. Они добывают информацию без непосредственного контакта с объектами, находясь на очень больших расстояниях, при разных погодных условиях и в разное время года и суток. Это позволяет оставаться незамеченными, а потому и малоуязвимыми.

Для их маскировки недостаточно обычного камуфляжа: чтобы достигнуть аналогичного эффекта с учетом современного развития радиотехнологий необходимо применять специальные покрытия для объектов, которые позволяют снизить их радиозаметность, также маски-экраны и помехи, которые уменьшают вероятность обнаружения объекта средствами радиолокационной разведки на открытой местности и т.д.

Многие авторы утверждают, что по интенсивности переговоров можно определить, в каком направлении идет более активный рабочий процесс, при этом содержание радиопереговоров не известно. Даже такого рода информация не должна быть доступна посторонним.

Помимо радиомаскировки объектов, посредством постановки различных видов помех, следует применять противорадиолокационную маскировку объектов - снижение заметности объекта. Данный способ заключается в уменьшении вторичного

(отраженного, рассеянного) излучения радиолокационных целей, которое не связано с работой собственных радиоэлектронных станций маскируемых объектов.

Так, защищаемый объект должен в первую очередь минимизировать свою заметность (видимость) по отношению к поисковым системам противника. Данное направление маскировки является наиболее важным, так как отраженное излучение радиолокационных объектов возникает за счет облучения электромагнитной волной другими радиолокационными станциями.

Объекты разведки могут быть обнаружены за счет электромагнитного облучения и излучения самим объектом [6]:

- посредством рассеяния энергии падающих радиоволн;
- дополнительное излучение обеспечивают элементы конструкции такого объекта;
- взаимодействие со средой, в которой движется объект в различных частотных диапазонах за счет нагревания поверхности объекта из-за трения о воздух и сопровождается более низкочастотным излучением ИК- и радиодиапазона.

Для снижения радиолокационной заметности (РЛЗ) могут использоваться следующие методы: использование поглощающих материалов; уменьшение острых кромок, неровностей поверхности и уголкового отражателей; отклонение отраженных сигналов в сторону от направления на РЛС; отклонения отражений в соответствующие направления; устранение уголкового перехода; снижение ЭПР антенны; радиопоглощающие композитные материалы [7].

Уменьшение РЛЗ объектов является важным фактором увеличения эффективности их применения. Так, сами радиолокационные станции представляют собой один из основных компонентов вооруженных сил любой развитой страны. Использование объектов с низким значением эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) обеспечивает успешное преодоление системы обнаружений и обороны противоборствующей стороны. ЭПР является оценкой радиолокационной заметности объектов.

Заметность объектов для средств радиолокационной разведки принято оценивать величиной эффективной поверхности рассеяния (ЭПР) [8]:

$$\sigma_0 = \frac{\xi P_{\text{отр}}}{\Pi_1} = \frac{\xi F(\alpha, \beta) P_{\text{рас}}}{\Pi_1} = SF(\alpha, \beta) \xi, \quad (1)$$

где $\xi \in [0; 1]$ – коэффициент деполяризации рассеянного целью поля (ξ); $P_{\text{отр}}$ мощность отраженного радиолокационной целью сигнала; Π_1 – плотность потока мощности радиолокационного сигнала в окрестности точки расположения цели; $F(\alpha, \beta)$ – значение диаграммы обратного рассеяния (ДОР) цели в направлении на радиолокатор; S – полная площадь рассеяния цели.

Физически ЭПР представляет собой размерный коэффициент, который имеет размерность м^2 и является энергетической характеристикой, а не геометрической площадью. Объекты радиолокационной разведки имеют сложную форму. Значения ЭПР для каждого конкретного направления (α, β) могут сильно отличаться [6].

Интенсивность отражения от объекта достигается путем выбора формы отражающего объекта. Значение ЭПР во многом определяется формой объекта, а также соотношением его геометрических размеров и длины волны. Так, установлено, что наименьшую ЭПР имеет конус при его облучении со стороны вершины. Чем сложнее объект, тем больше его значение ЭПР. Примеры значений различных сложных объектов приведены ниже в таблице 1.

Таблица 1. ЭПР различных объектов

Наименование объекта	σ [м ²]
Самолёт-истребитель	3-12
Транспортный самолёт	40-70
Катер	50
Авианосец	50000
Автомобиль	3-10
Танк Т-90	29
Человек	0,8-1

Как видно из таблицы, объекты, имеющие более сложную форму и большие геометрические размеры, обладают большей поверхностью рассеивания. Но не только это. Также влияет и наличие изломов на объекте, за счет которых осуществляется отражение волны и материал, из которого изготовлена отражающая поверхность. Всем известной является технология «Стелс», сутью которой является наличие как можно больше таких изломов на объекте, что усложняет вычисление ЭПР. В определенных диапазонах объект, изготовленный по указанной технологии, остается «невидимым» для радаров и на экранах не отображается.

Таким образом, равно важным фактором является угол падения волны на объект. Так, падение плоской волны на поверхность, расположенной нормально к направлению излучения, обеспечивает большой коэффициент отражения.

Пример такого отражения волны от плоской поверхности на частоте 10 ГГц изображен ниже на рисунке 1.

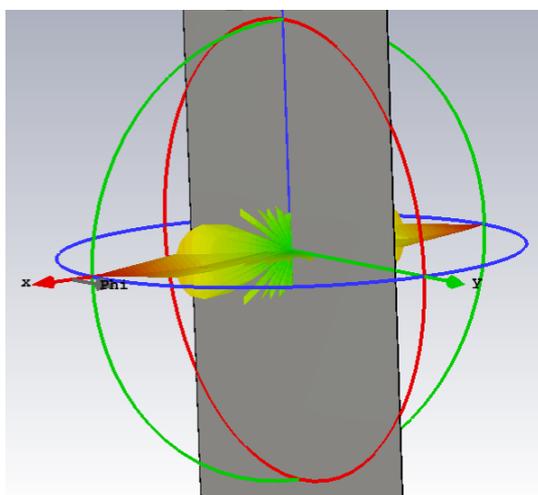


Рис. 1. ЭПР плоской поверхности

Исходя из данного рисунка видно, что при падении электромагнитного излучения на плоский объект наибольшее отражение осуществляется под прямым углом по отношению к объекту. При данном моделировании ЭПР объекта составил 18 м².

На рисунке 2 изображен фронт отражения ЭПР от объекта на частоте равной 10 ГГц в полярной системе координат.

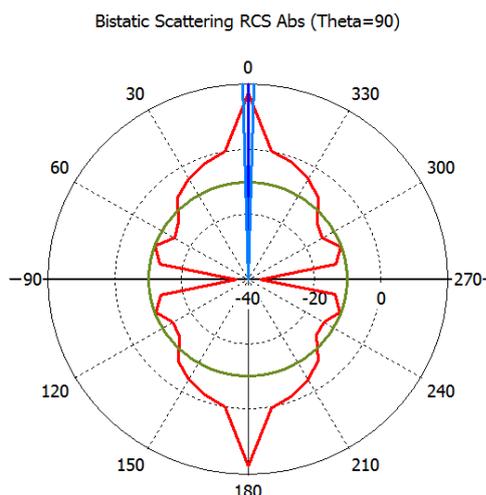


Рис. 2. ЭПР плоского объекта в полярной системе координат

Оптимальным вариантом для уменьшения ЭПР является применение сферы. Она является совершенным эталоном при экспериментальных исследованиях, так как это единственное тело, рассеивающее энергию во все стороны равномерно, то есть является всенаправленным отражателем. Задача о рассеянии и дифракции плоской электромагнитной волны на сфере исследована наиболее полно по сравнению со всеми другими телами простой и сложной формы [6].

Методы снижения отраженного сигнала иначе называются методами уменьшения ЭПР. Уменьшения ЭПР осуществляют в настоящее время двумя основными способами, применяемыми как отдельно, так и совместно: во-первых – за счет выбора малоотражающей формы радиолокационной цели, во-вторых – применением специальных поглощающих покрытий.

Общими недостатками, ограничивающих использование радио поглощающих материалов для маскировки техники и объектов является относительно малая диапазонность и значительная масса. Поэтому их наносят на те места (части) техники и объектов, больше отражающих электромагнитную энергию. Такие места называют блестящими точками. К ним относят стыки, резкие переходы, действующих как угловые радио отражатели, острые кромки, значительные по площади участки поверхности малой кривизны. Наиболее широко радиопоглощающие материалы применяют для маскировки от радиолокационного обнаружения ракет, космических аппаратов, надводных кораблей и подводных лодок [9].

Сделать объекты малозаметными для РЭС чрезвычайно сложно, возможно лишь несколько уменьшить вероятность их обнаружения, если покрыть материалами, поглощающими энергию ЭВМ, или применить малоотражающие формы. Однако ощутимого результата в снижении радиовидимости можно добиться только в случае резкого снижения ЭПР объектов.

Интерференционные покрытия состоят из попеременных слоев диэлектрика (пластмасса, каучук) и пленки электропроводящего материала. В них при падении плоской электромагнитной волны на поверхность электропроводящей пленки в результате наложения падающей и отраженной волны в диэлектрике возникают стоячие волны. Поскольку характеристики интерференционных покрытий связаны с длиной волны, то они эффективны в ограниченном диапазоне радиоволн. Для

расширения полосы рабочих частот интерференционные покрытия делают многослойными. В них концентрация поглощающего материала увеличивается от одного слоя к другому. В результате этого рабочий диапазон увеличивается в 3-4 раза. Наиболее эффективно покрытия работают при нормальном падении волны, когда электромагнитная энергия ослабляется в несколько десятков раз. Для других направлений интенсивность ослабления резко падает [9].

Существующая на данный момент модель колпака по уменьшению эффективной поверхности рассеивания использует одну сферу вокруг радиотехнического объекта. Данный колпак устанавливался перед излучающим раскрывом антенны. Используемая конструкция устанавливается герметично, так как внутрь закачивается газообразная смесь, которая обладает характеристиками, приближенными к металлическим. Система оснащена устройством нагнетания и откачивания рабочей среды (газообразного вещества), содержит камеру для его хранения, блок контроля параметров рабочей среды под колпаком. Данные составляющие размещены с внешней стороны под основанием антенны [10].

С целью уменьшить радиозаметность РЛС в данной работе предполагается использование двух сфер, между которыми будет закачиваться радиопоглощающая среда. Модель представлена на рисунке 3.

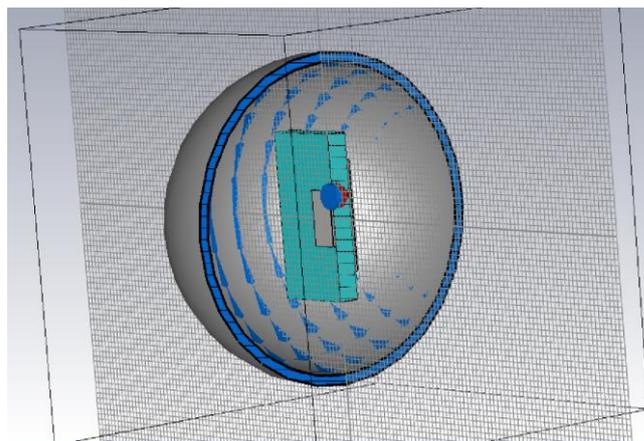


Рис. 3. Модель исследуемого объекта по уменьшению ЭПР

Для наглядности и получения необходимых результатов антенную систему поместили в сферообразный обтекатель без моделирования земной поверхности. Это исключает попадание химической субстанции на поверхность антенной системы. Одним из преимуществ является то, что исключен контакт с самой антенной системой и её состояние, а также технические характеристики не подвергаются химическому воздействию. Следующим фактором является неизменность сигнала во время рабочей фазы радиотехнического объекта: полезный сигнал не претерпевает изменений за счет прохождения сквозь сферы.

Выводы. В данной статье рассмотрен способ уменьшения эффективной поверхности рассеивания объектов, имеющих в своем составе антенную систему. Описаны несколько видов маскировок, большое внимание уделено радиомаскировке, применению различных радиопоглощающих материалов и радиопоглощающих сред. В статье решается задача усовершенствования уже существующего способа уменьшения ЭПР радиотехнических объектов посредством использования сферообразного колпака, чтобы устранить влияние радиопоглощающей среды.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1 Королёв А.Ю. Маскировка вооружения, техники и объектов / А.Ю.Королёв, А.А.Королёва, А.Д.Яковлев – Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2015. – 155 с.
- 2 Википедия. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Тайер,_Эббот_Хэндерсон (дата обращения: 04.10.2017).
- 3 Накануне и в ходе Второй мировой войны/Военная хитрость. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.k2x2.info/istorija/voennaja_hitrost/p4.php (дата обращения: 04.10.2017).
- 4 Обозник. История тыла российской армии. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.oboznik.ru/?p=41153> (дата обращения: 25.03.2017).
- 5 Armsdata [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://armsdata.net/nuclear/111.html> (дата обращения: 04.10.2017).
- 6 Куприянов А.И. Теоретические основы радиоэлектронной разведки: учеб. пособие / А.И.Куприянов, П.Б.Петренко, М.П.Сычев. — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. — 381, [1] с. : ил.
- 7 Основы теории радиоэлектронной борьбы / Под ред. Николенко Н.Ф. – М., 1987.– 352 с
- 8 Фелиппо Нери. Введение в системы радиоэлектронной защиты / Фелиппо Нери. – М.: ОНТИПИ ФГУП ЦНРТИ, 200. – 358 с.
- 9 Палий А.И. Радиоэлектронная борьба: 2-е изд., перераб. и доп. / А.И.Палий. – М.: Воениздат, 1989. – 350с., ил.
- 10 Патент на корисну модель №91502 (UA). Пристрій для зменшення ефективної поверхні розсіювання антен / Демідов О. О. (UA), Пасльон В. В. (UA). – Бюл. №13, 10.07.2014

RESEARCH OF WAYS OF REDUCTION THE RADAR CROSS-SECTION RADIOTECHNICAL OBJECTS

V.Yu. Ryabchenko, V.V. Paslyon

Ways to reduce the radar cross-section (RCS) of the complex objects, that have in their structure antenna systems, are considered. Various types of disguises are considered; radio-masking in detail and the use of various radio-absorbing materials and radio-absorbing media is described. The article is devoted to the improvement of the already existing method of reducing the RCS of radio engineering objects by using a spherical cap. Modification implies eliminating the influence of the radio-absorbing medium on the antenna system.

Keywords: the radar cross-section; radio technical objects; systems; radio-absorbing materials.

Поступила в редакцию 03.04.2018 г.

Рябченко Валентина Юрьевна, студентка
ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР
e-mail: valentinaryabchenko@yandex.ru
Моб. Тел: МТС – 050 51 41 780
Феникс - 071 320 26 08

Ryabchenko Valentina Yuryevna, student
Donetsk National Technical University, Donetsk,
DPR

e-mail: valentinaryabchenko@yandex.ru

Паслён Владимир Владимирович, канд. техн. наук, доц.; зав. кафедрой радиотехники и технической защиты информации; ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет», г. Донецк, ДНР
e-mail: paslen@yandex.ru;
Донецк-30, Довженко 57а, кв. 37
Моб. 071-340-46-15

Paslyon Vladimir Vladimirovich, Ph.D. (Tech.),
Head of the Radio Engineering and Information Protection Department;
e-mail: paslen@yandex.ru;
Donetsk National Technical University, Donetsk,
DPR

ЭЛЕКТРОАКУСТИЧЕСКИЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ

© 2018 В.В. Данилов, В.И. Тимченко, С.В. Иванов

Предложено математическое описание процесса определения коэффициента передачи электроакустического преобразователя по результатам измерения его входного импеданса.

Ключевые слова: электроакустический преобразователь, электрический импеданс, пластина пьезоэлектрика, акустооптическая ячейка.

Введение. Перспективность использования акустооптических устройств (АОУ) в оптических системах высокопроизводительной обработки сигналов, где они применяются в качестве элементов ввода информации, показана в [1,2]. Как известно [2], производительность любой оптической системы обработки информации определяется быстродействием ее функциональных элементов и, в первую очередь, элементом ввода информации в лазерный пучок. Конструктивно-компоновочной основой любого АОУ является акустооптическая ячейка (АОЯ), быстродействие которой (на уровне физической модели) определяется широкополосностью частотно-зависимых параметров ее элементов [3]. К элементам АОУ относят: электрическую цепь согласования АОЯ с источником управляющего радиосигнала, электроакустический преобразователь (ЭАП), среду акустооптического взаимодействия (АОВ), акустическую нагрузку и др. В реальных АОУ их функции соответственно выполняют [4]: электрическая согласующая цепь, пьезоэлектрический преобразователь (ПП) на основе кристаллических пластин или пленок, светозвукопровод (СЗП), акустическая нагрузка.

В работе [3] отмечалось, что процесс определения коэффициента электрической связи k для сильно акустически нагруженных ПП (добротность $Q < 10$) широко известным методом характеристических частот резонанса и антирезонанса приводит к относительной погрешности порядка 20 – 350%. Такая погрешность связана с неточностью определения добротности Q , поскольку используемая в [1-3] физическая модель ПП не учитывает комплексной частотно-зависимой акустической нагруженности ПП.

В данной работе, используя представление эквивалентных схем (в частности, четырехэлементного двухполюсника) с учетом комплексной частотно-зависимой акустической нагруженности ПП АОЯ [4], рассматривается входной электрический импеданс ЭАП, созданного на основе пьезоэлектрической пластины, и определяется коэффициент преобразования электрической мощности в акустическую не на основе использования добротности, а на основе определения ее входного импеданса.

Метод эквивалентных схем на основе электроакустических аналогий ставит элементам электроакустического тракта АОЯ в соответствие токи и напряжения, являющиеся подобием скоростей и сил в различных его участках при движении упругой волны вдоль структуры, показанной на рис. 1. Здесь ВЭ — верхний электрод, ПП — пьезоэлектрический преобразователь, СС — связующие ПП со средой АОВ (СЗП) слои, которые создаются методами микроэлектронной технологии [5].

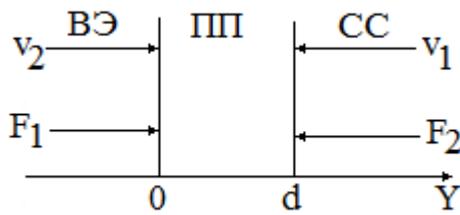


Рис. 1. Структура электроакустического преобразователя в виде пьезоэлектрической пластины с двухсторонней акустической нагрузкой

Рассмотрим пластинку пьезоэлектрика (ПП) толщиной d , имеющей площадь поперечного сечения S . Предположим, что на поверхности

задан потенциал $U = U_0 \exp(i\omega t)$, где U_0 – амплитудное значение приложенного напряжения, $i = \sqrt{-1}$, ω – циклическая частота, t – время, а смещение части материала зависит от координаты Y , направленно перпендикулярно поверхности (рис. 1).

Амплитуда смещения ξ удовлетворяет волновому уравнению и может быть представлена в виде:

$$\xi = [b_1 \sin(kY) + b_2 \cos(kY)] \exp(i\omega t),$$

где b_1, b_2 – амплитудные значения смещения, k – волновое число.

Отсюда следует, что колебательные скорости v_1 и v_2 равны:

$$v_1 = \frac{\partial \xi}{\partial t} \Big|_{Y=0} = i\omega b_2, \quad v_2 = \frac{\partial \xi}{\partial t} \Big|_{Y=d} = i\omega b_1 \sin(kd) - v_1 \cos(kd), \quad b_1 = \frac{v_2 - v_1 \cos(kd)}{i \sin(kd)}.$$

Для материалов, обладающих пьезоэффектом, справедливы следующие уравнения для механического напряжения T и электрической индукции D [6]:

$$T = c^E (\partial \xi / \partial Y) - e^T E; \tag{4}$$

$$D = c^T (\partial \xi / \partial Y) + \varepsilon^T E, \tag{5}$$

где c^E – модуль упругости, измеренный при постоянном электрическом поле E ; e^T – пьезоэлектрический модуль, измеренный при постоянном напряжении T ; ε^T – диэлектрическая проницаемость, измеренная при постоянной механической деформации $\eta = \partial \xi / \partial Y$.

Для нахождения сил F_1 и F_2 подставим напряженность поля в уравнение (4), тогда

$$T = c^D \eta - eD / \varepsilon^T. \tag{6}$$

Электрическая индукция D связана с током I , текущим через ПП площадью S , соотношением $D = I / (i\omega S)$. Учитывая, что $F_1 = -ST \Big|_{Y=0}$, получаем:

$$F_1 = -iZ_p [v_2 / \sin(kd) - v_1 / \text{tg}(kd)] + ieI / (\omega \varepsilon^T), \tag{7}$$

где $Z_p = Sc^D k / \omega$ – волновое акустическое сопротивление ПП.

$$\text{Аналогично, для } F_2 = -ST \Big|_{Y=d} = -iZ_p [v_1 / \sin(kd) - v_2 / \text{tg}(kd)] + ieI / (\omega \varepsilon^T). \tag{8}$$

Интегрируя уравнение (5) с учетом отсутствия зарядов ($\text{div } \vec{D} = 0$), получим:

$$Dd = c(\xi \Big|_{Y=d} - \xi \Big|_{Y=0}) - U \varepsilon^T, \tag{9}$$

где $U = \int_0^d E dY$ – разность потенциалов на электродах пластины.

$$U = [-e/(i\omega\varepsilon^n)](v_2 - v_1) + Id/(i\omega S\varepsilon^n). \quad (10)$$

Совокупность (7), (8), (10) описывает шестиполюсник, характеризуемый двумя механическими сторонами и одной электрической. Для такого шестиполюсника Мэзоном [7] предложена эквивалентная схема, включающая в себя идеальный электромеханический трансформатор (рис. 2).

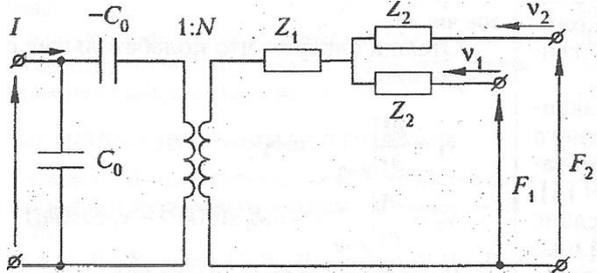


Рис. 2. Эквивалентная схема двусторонне нагруженного ПП

Коэффициент трансформации шестиполюсника (рис. 2) равен $T = eC_0/\varepsilon^n$, $C_0 S\varepsilon^n/d$ – статическая емкость зажатого ПП. Импедансы Z_1 и Z_2 имеют значения $Z_1 = -iZ_p/\sin(kd)$, $Z_2 = -iZ_p \operatorname{tg}(kd/2)$. В составе схемы имеется практически не реализуемый элемент – отрицательная емкость. (Далее это не создает каких-либо затруднений, поскольку схема трансформируется так, что в ней используются только реальные элементы.)

Предположим, что ПП на выходах (F_1, v_1) и (F_2, v_2) механически нагружен на импедансы ВЭ и СС, равные Z_d и Z_{pr} , соответственно. Акустический импеданс данной системы со стороны вторичной обмотки электромеханического трансформатора (акустическая сторона) равен

$$Z_a = \frac{(iZ_p \operatorname{tg}\varphi + Z_d)(iZ_p \operatorname{tg}\varphi + Z_{pr})}{2iZ_p \operatorname{tg}\varphi + Z_d + Z_{pr}} - \frac{iZ_p}{\sin(2\varphi)}, \quad (11)$$

где $\varphi = kd/2$ – фазовая постоянная.

Использование разложений функций $\operatorname{tg}\varphi$ и $\sin 2\varphi$ в окрестности частоты полуволнового резонанса ПП ($d = \lambda/2$, $\omega = \omega_0$) при $\varphi = \pi(1 + \delta)/2$ приводит Z_a к виду

$$Z_a = (Z_d + Z_{pr})/4 + iZ_p \pi \delta / 4. \quad (12)$$

Здесь $\operatorname{tg}\varphi = (\pi^2 \delta^2 - 8)/4\pi\delta$, $\sin(2\varphi) = -\pi\delta$, $\delta = (\omega - \omega_0)/\omega_0$ – относительная частотная расстройка.

Выражение для Z_a эквивалентно импедансу нагруженного последовательного колебательного контура $\tilde{L}\tilde{C}$. Схема ПП на рис. 2 принимает вид, показанный на рис. 3.

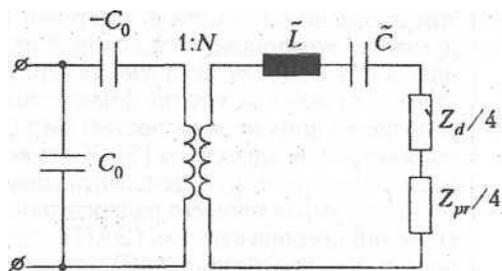


Рис. 3. Трансформированная эквивалентная схема

При переносе элементов на электрическую часть импеданс Z_a необходимо разделить на N^2 . Тогда, с учетом $-C_0$, получим электрическую эквивалентную схему ПП (рис. 4). Здесь для компенсации емкости C_0 добавлена индуктивность L_0 , подключаемая снаружи ПП. Значения L, C : $L = Z_p \pi / (2\omega_r K)$, $C = 2K / (2\omega_r Z_p)$.

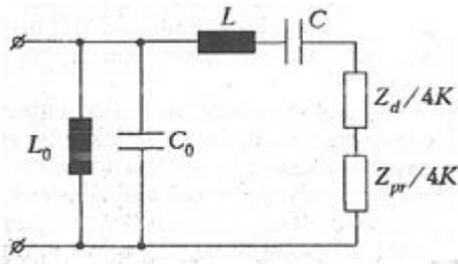


Рис. 4. Электрическая эквивалентная схема ПП

Коэффициент трансформации $N^2 = K$ равен

$$K = \frac{k_{ЭМ}^2}{1 - k_{ЭМ}^2} \frac{\pi^2 C_0^2 \rho_3 V_p^2}{8 \varepsilon^n}, \quad (13)$$

где ρ_p, V_p – плотность материала ПП и скорость звука в ПП, соответственно. Частоту резонанса $\omega_p = 1/\sqrt{LC}$ свободной ПП можно найти используя уравнение [6], связывающее ее с частотой антирезонанса $\omega_p = \pi V_p / d$:

$$k_{ЭМ}^2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} \frac{\omega_r}{\omega_a}\right) = \pi \omega_r / (2\omega_a). \quad (14)$$

Квадрат коэффициента электромеханической связи $k_{ЭМ}^2$ характеризует долю электрической энергии, перешедшей в упругую механическую энергию, и с коэффициентом электрической связи k связан выражениями $k = C / C_0$, $k = k_{ЭМ}^2 / (1 - k_{ЭМ}^2)$.

Входной электрический импеданс ПП с шунтирующей индуктивностью L_0 равен

$$Z_e = \frac{i\omega L_0 [R + i(\omega C + X)]}{(1 - \omega^2 L_0 C_0) [R + j(\omega L - 1/\omega C + X)] + i\omega L_0}, \quad (15)$$

где $R = R(\Omega)$ и $X = X(\Omega)$ – вещественная и мнимая части суммы импедансов ВЭ и СС; $\Omega = \omega / \omega_0$ – относительная частота. (Частотные зависимости $R = R(\Omega)$ и $X = X(\Omega)$, нормированные на акустическое сопротивление светозвукопровода, определены в [4].)

Частота резонанса нагруженной ПП ω_0 является решением трансцендентного уравнения для реактивной составляющей импеданса в контуре относительно величины $\Omega_0 = \omega_0 / \omega$:

$$\Omega_0^2 = -1 + \Omega_0 C X(\Omega_0) = 0. \quad (16)$$

Умножив числитель и знаменатель (15) на ωC , а также учитывая соотношения для ω_r и k и что $\omega_0 = 1/\sqrt{L_0 C_0}$, получим:

$$Z_e = \frac{i\omega L_0 [\omega RC + i(\Omega^2 - 1 + \omega CX)]}{(1 - \omega^2 / \omega_0^2) [\omega RC + i(\Omega^2 - 1 + \omega CX)] + ik\omega^2 / \omega_0^2}. \quad (17)$$

Компоненты (17) представим в виде:

$$\omega CX = (\omega / \omega_r) \omega_r CX = \Omega \sqrt{\frac{C}{L}} X = \Omega \sqrt{\frac{\bar{C}}{\bar{L}}} X = \frac{2\Omega X}{2Z_p} = \frac{2\Omega}{\pi} \bar{X}, \quad (18)$$

$$\omega RX = (\omega / \omega_r) \omega_r RX = \Omega \sqrt{\frac{C}{L}} R = \frac{2\Omega}{\pi} \bar{R}, \quad (19)$$

где \bar{X}, \bar{R} – нормированные на Z_p значения X и R .

С учетом выражений (18), (19) входной импеданс (17) принимает вид

$$Z_e = \frac{i\omega L_0 [2\Omega \bar{R} / \pi + i(\Omega^2 - 1 + 2\Omega \bar{X} / \pi)] \Omega_0^2}{(\Omega_0^2 - \Omega^2) [2\Omega \bar{R} / \pi + i(\Omega^2 - 1 + 2\Omega \bar{X} / \pi)] + ik\Omega^2}. \quad (20)$$

Для ПП, не зашунтированного индуктивностью L_0 , Z_e равен

$$Z_e = \frac{-i}{\omega_r C_0 \Omega} \frac{2\Omega \bar{R} / \pi + i(\Omega^2 - 1 + 2\Omega \bar{X} / \pi)}{2\Omega \bar{R} / \pi + i(\Omega^2 - 1 - k + 2\Omega \bar{X} / \pi)}. \quad (21)$$

При дальнейшем анализе возбуждения упругих волн в структуре ВЭ-ПП-СС-СЗП воспользуемся коэффициентом отражения Γ на входе эквивалентной схемы (рис. 4):

$$-\Gamma(i\omega) = \frac{Z_e(i\omega) - R_g}{Z_e(i\omega) + R_g}, \quad (22)$$

где R_g – волновое сопротивление слева от входа ПП.

Величина акустической мощности, излучаемой ПП в направлении ВЭ и СС, равна [2].

$$P_a = P_0 (1 - |\Gamma|^2), \quad (23)$$

где P_0 – мощность подводимого радиосигнала.

Учитывая, что ВЭ и СС образуют делитель мощности, акустическая мощность, отдаваемая через СС в СЗП, равна

$$P_a = \bar{P}_a \frac{\operatorname{Re} Z_{pr}}{\operatorname{Re}(Z_{pr} + Z_a)}. \quad (24)$$

В качестве примера практической значимости (21) ниже приведены результаты сравнительного анализа (см. рис. 5) расчетов частотной зависимости модуля входного электрического импеданса $|Z_e|$ пьезопреобразователей АОЯ по предложенной методике и величин $|Z_e|$, полученных экспериментально для структур ПП-СС-СЗП.

Исследовались структуры [3] $LiNbO_3 - Ep - SiO_2$, $LiNbO_3 - Ep - T\Phi 10$, $LiNbO_3 - Cu - In - Cu - SiO_2$, $LiNbO_3 - In - PbMoO_4$ (YZ-срез), $LiNbO_3 - In - T\Phi 1$, где Ep – связующий слой на основе эпоксидной смолы ЭД-20, $Cu - In - Cu$ – связующие слои типа «медь-индий-медь». Резонансные частоты структур, согласно [3], составляли соответственно 4,22, 25,09, 168,2, 70,78, 23,98 МГц, при этом начальная и конечная частоты анализа выбирались равным $0,2F_r$ и $2F_r$ соответственно.

Из приведенных графиков видно, что значения импедансов в дальней области от резонанса с незначительным различием можно считать одинаковыми. Подобное свойство объясняется слабым влиянием фазовых соотношений в эквивалентном контуре и комплексной частотно-зависимой акустической нагруженности в реальной структуре ПП-СС-СЗП. Таким образом, в этой области аппроксимацию зависимости $|Z_e|$ посредством четырехэлементной эквивалентной схемы можно считать удовлетворительной.

Иная ситуация имеет место в окрестности резонанса. При этом, в общем случае, изменяется вещественная и мнимая части акустического импеданса СС в сечении, смежном

с ПП. Вносимая реактивная составляющая нагрузки смещает резонансную частоту системы в целом, а также частоту антирезонанса. Изменения крутизны зависимости импеданса и его экстремальные значения в резонансной области обусловлены частотной зависимостью вещественной части акустического импеданса нагрузки.

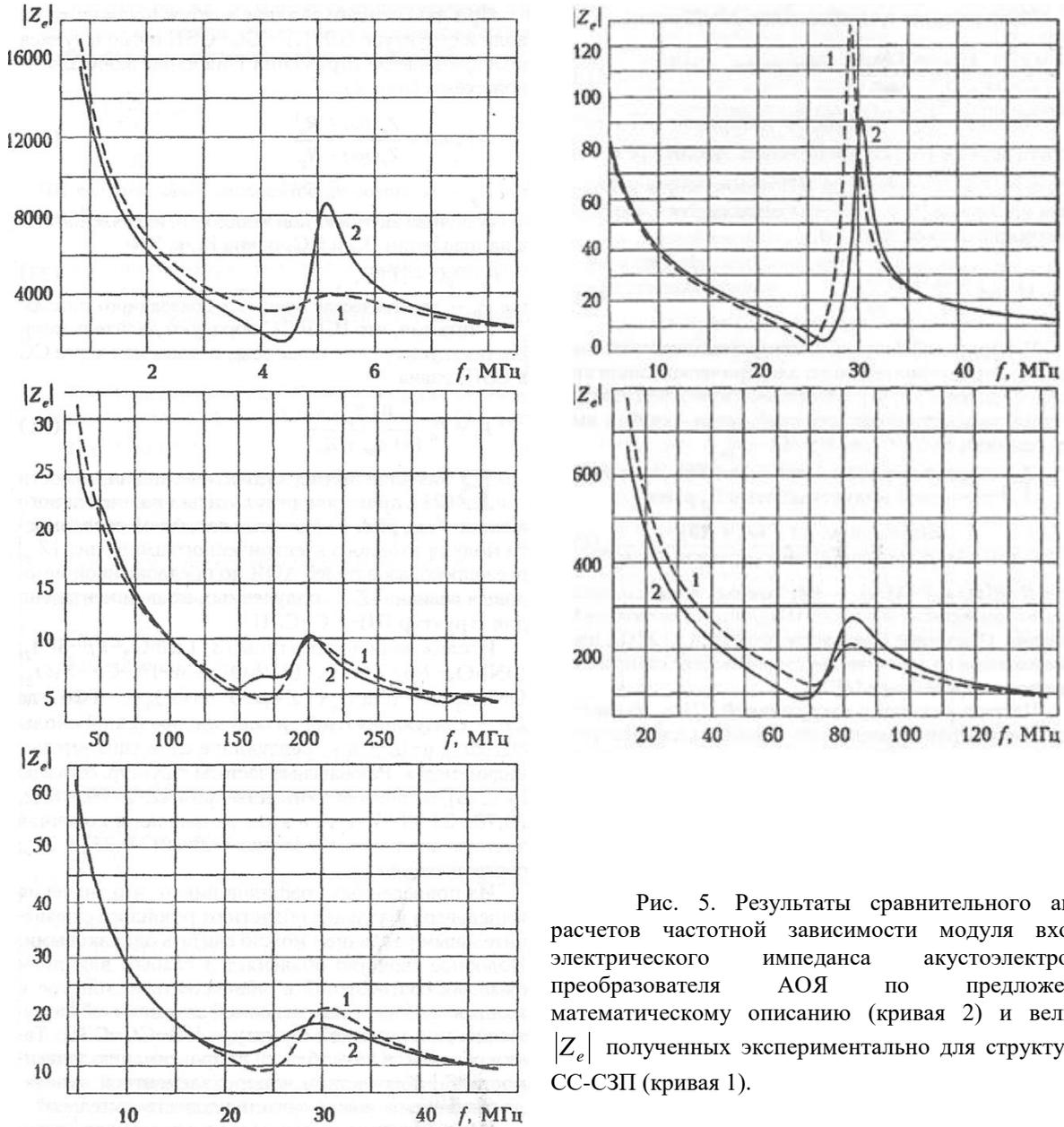


Рис. 5. Результаты сравнительного анализа расчетов частотной зависимости модуля входного электрического импеданса акустоэлектронного преобразователя АОЯ по предложенному математическому описанию (кривая 2) и величины $|Z_e|$ полученных экспериментально для структур ПП-СС-СЗП (кривая 1).

$$|Z_e|$$

Выводы.

Предложенное математическое описание позволяют для электромеханической системы вида «внешний электрод – пьезопластина – связующие слои – светозвукопровод» получить необходимую информацию о ее частотных свойствах путем измерения входного импеданса структуры. Методика, позволяет отказаться от

известного приема путем измерения добротности методом резонанса-антирезонанса, вносящего погрешность до 350 %.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухамадиев А.А. Акустооптические приборы информационно-измерительных систем экологического мониторинга: научное издание / А.А.Мухамадиев, М.А.Ураксеев, Р.Г.Фаррахов. – Уфа: Уфимская государственная академия экономики и сервиса, 2009. – 119 с.
2. Гусев О.Б. Оптическая обработка радиосигналов в реальном времени / О.Б.Гусев, С.В.Кулаков, Б.П.Разживин, Д.В.Тигин. – М.: Радио и связь, 1989.
3. Гусев О.Б. Акустооптические измерения / О.Б.Гусев, В.В.Клудзин. – Л.: Изд-во Ленингр. ун-та, 1987.
4. Данилов В.В. Методика расчета акустического импеданса связующих слоев в акустооптическом устройстве / В.В.Данилов, С.В.Иванов // Материалы 9-й между нар. конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 1999. – С. 268-269.
5. Белик Т.В. Устройство диффузионной сварки в вакууме / Т.В.Белик, Д.В.Данилов, В.В.Роганов и др. // Приборы и техника эксперимента. – 1993. – № 2. – С. 245-246.
6. Дьелесан Э. Упругие волны в твердых телах. Применение для обработки сигналов / Э.Дьелесан, Д.Руайе. – М.: Наука, 1982.
7. Физическая акустика. Принципы и методы. Т.1 / Под ред. У. Мэзона и Р. Терстона. – М.: Мир, 1973.

Поступила в редакцию 06.04.2018 г.

ELECTROACOUSTIC TRANSDUCER

V.V. Danilov, V.I. Timchenko, S.V. Ivanov

A mathematical description of the process of determining the transfer coefficient of the electroacoustic transducer by the results of measuring its input impedance is proposed.

Key words: electro-acoustic transducer electrical impedance, the plate of piezoelectric, acoustooptic cell.

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор;
проректор по научной и инновационной деятельности ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк;
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor,
Vice-Rector of Research and Innovation Activity of
Donetsk National University, Donetsk

Тимченко Владимир Иванович, кандидат ф.-м. наук, доцент; ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», г. Донецк, доцент кафедры «Радиофизики и инфокоммуникационных технологий» e-mail: vlitim@mail.ru.

Vladimir Ivanovich Timchenko, Candidate of physics. Sciences, Assistant Professor; State Higher Education Establishment «Donetsk National University», Donetsk National University, 24 University st., Donetsk, 83001

**ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ
ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ**

УДК 004.934.2

**РАСПОЗНАВАНИЕ ГОЛОСОВЫХ КОМАНД УПРАВЛЕНИЯ РОБОТОМ НА
ОСНОВЕ СПЕКТРА МОДУЛЯЦИИ РЕЧЕВОГО СИГНАЛА**

© 2018 *Т.В. Шарий, Е.И. Черкашин*

В статье предлагается робастный метод распознавания голосовых команд управления мобильным роботом, опирающийся на спектр модуляции речевого сигнала. Описан алгоритм вычисления спектра модуляции, расчета и применения банка фильтров слуховой системы в частотной области. Исследовано влияние шума и эффекта реверберации помещений на спектр модуляции сигнала. Приведены результаты экспериментов по распознаванию голосовых команд на основе классификатора ближайших соседей и машин опорных векторов в дикторозависимой тестовой среде.

Ключевые слова: речевой сигнал; спектр модуляции; банк фильтров; классификатор.

Введение. В настоящее время автоматическое распознавание речи (Automatic Speech Recognition, ASR) [1] является одной из главных задач, решаемых в рамках передового направления информационных технологий – машинного обучения (Machine Learning) [2, 3]. Интерес к этой проблеме подтверждается постоянным ростом числа научных статей и речевых корпусов для проверки различных моделей анализа и распознавания речи, а также встраиванием модулей распознавания речи во многие современные операционные системы. В последние годы наблюдался значительный прогресс в решении всех задач, связанных с ASR. Ключевую роль при этом сыграли статистические аспекты моделей глубокого обучения, рост вычислительных мощностей и развитая инфраструктура сбора и обработки речевых данных. Вместе с тем, вопросы инженерии признаков (feature engineering) по-прежнему представляют как научный, так и практический интерес. В частности, актуален вопрос выбора робастных признаков речевого сигнала, менее чувствительных к шуму и эффектам реверберации в помещениях. Кроме того, распознавание речи востребовано в робототехнике, в которой важна вычислительная простота применяемых методов, а размер словаря часто является относительно небольшим.

В данной статье для распознавания голосовых команд управления мобильным роботом исследуется метод, основанный на вычислении и анализе спектра амплитудной модуляции речевого сигнала, представляющего голосовую команду. Спектры модуляции хорошо зарекомендовали себя в разных задачах, связанных с обработкой речи: оценивание уровня шума и разборчивости речи [4], шумоподавление [5, 6], получение цифровых отпечатков [7] и распознавание фонем [8]. В то время как традиционный оконный анализ сигнала (например, метод мел-частотных кепстральных коэффициентов (MFCC) на основе кратковременного преобразования Фурье) позволяет получить последовательность векторов признаков во времени, спектр модуляции может интегрально и относительно компактно описать всю голосовую команду.

Постановка задачи. Целью данной работы является программная реализация и исследование метода параметризации речевых сигналов на основе спектра модуляции голосовых команд и анализ показателей его эффективности с помощью классификатора

ближайших соседей и машин опорных векторов. Словарь для проверки адекватности модели состоит из 11 команд управления роботом. Информационная технология включает процессы записи и сохранения речевых статистических данных, их обработки стационарным шумом и применения эффекта реверберации, обучения классификаторов на основе вычисленных спектров модуляции, визуализации результатов.

Амплитудная модуляция речевых сигналов. Важным свойством человеческой речи является то, что большая часть лингвистической информации, на основе которой человек распознает слова в речевом потоке, содержится в относительно медленных изменениях речевого сигнала. Согласно одной из психоакустических гипотез, в слуховой системе человека существуют каналы, настроенные на восприятие модуляционных частот по аналогии со спектральными частотами в критических полосах слуха, т.к. люди способны распознавать речь в сложных условиях, в частности, в присутствии стационарного и импульсного шума, реверберации и иных искажений. Рассмотрение особенностей слуховой системы человека всегда представляло интерес для определения параметров речи, которые содержат максимальный объем лингвистической информации. Такие параметры отражают инвариантные характерные свойства акустических сигналов, устойчивые к различным преобразованиям, фильтрации и цифровому сжатию.

Модуляция речи вызывается изменениями общего уровня энергии сигнала, происходящими при чередовании фоном, а также изменениями в спектральных распределениях формант, специфических для каждого частотного диапазона. Изменения спектральных характеристик речи во времени могут быть представлены в виде спектра амплитудной модуляции. Спектр модуляции вычисляется на основе спектрального анализа огибающей сигнала:

$$M[n, k, q] = \sum_{p=0}^{P-1} E_k[n + p] e^{-j2\pi pq/P},$$

где $E_k[n]$ представляет собой сигнал траектории изменения амплитуды речевого сигнала в k -ом частотном диапазоне, q – модуляционная частота, P – размер преобразования Фурье.

Классическая схема вычисления спектра модуляции [8] представлена на рис.1.

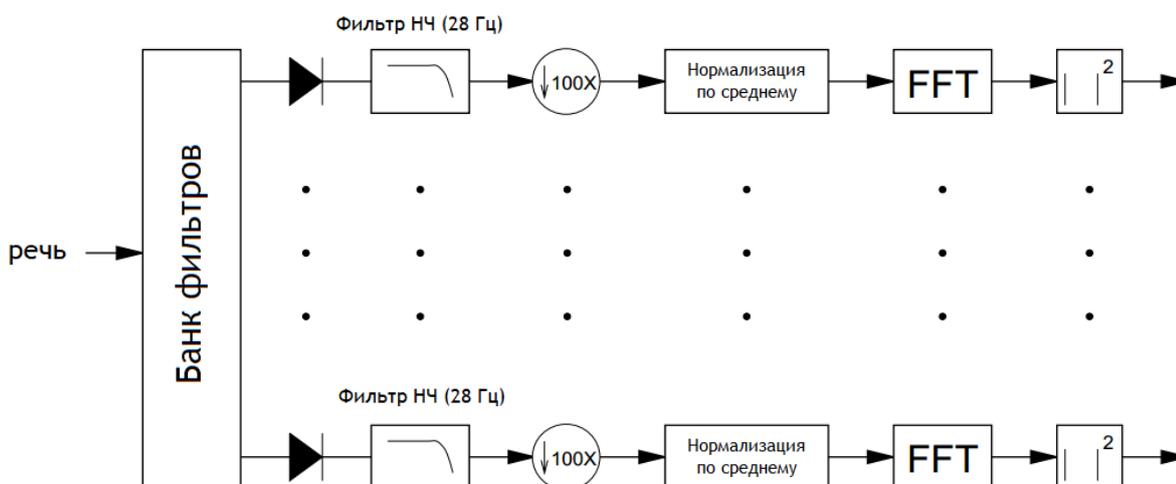


Рис. 1. Схема вычисления спектра амплитудной модуляции

Согласно приведенной схеме, речевой сигнал обрабатывается банком фильтров в определенном частотном диапазоне (обычно до 4000 Гц) с полосами пропускания, соответствующими критическим полосам слуха, с минимальным перекрытием. В каждой полосе выделяется огибающая сигнала путем низкочастотной фильтрации выпрямленной траектории (однополупериодное выпрямление, half-wave rectification) с помощью КИХ-фильтров с частотой среза 28 Гц. После стократной децимации и нормализации по среднему уровню к полученным сигналам применяется повторно преобразование Фурье в окне длительностью 250 мс со взвешиванием оконной функцией Хемминга. Процедура повторяется каждые 12,5 мс с целью фиксирования временных изменений и динамических свойств сигнала.

В данной работе оценка спектра амплитудной модуляции производится похожим, но более простым в вычислительном отношении способом, подходящим для задачи распознавания голосовых команд. На первом шаге вычисляется спектрограмма сигнала как результат кратковременного преобразования Фурье с размером окна 31,25 мс без перекрытия (все числовые параметры задаются исходя из частоты дискретизации тестового сигнала 16 кГц, но могут настраиваться пользователем). К каждому спектру в спектрограмме применяется банк фильтров, описываемый ниже. Полученные значения энергии сигнала в каждой частотной полосе трактуются как отдельные сигналы с частотой дискретизации 32 Гц. Эти сигналы нормализуются по среднему уровню, после чего к ним применяется преобразование Фурье в окне длительностью 2 с, достаточной для представления речевой команды, произнесенной с обычной интонацией. Выходом приведенного алгоритма является модель спектра модуляции, представляющая собой вектор коэффициентов, образованный путем конкатенации всех спектров в каждом частотном канале.

Многочисленные исследования показывают, что медленные изменения сигнала с частотой модуляции 4 Гц особенно важны с точки зрения восприятия речи человеком и в значительно меньшей степени подвержены, например, искажениям в процессе GSM сжатия, чем традиционно используемые спектральные дескрипторы сигнала: MFCC, частота переходов уровня сигнала через ноль, спектральный центроид, спектральная равномерность и т.д. В связи с этим, предложено также исследовать «укороченную» модель спектра модуляции в виде вектора, в который входят только те коэффициенты, которые соответствуют частоте модуляции 4 Гц.

Банк фильтров. Выше было отмечено, что обработка сигнала производится в отдельных частотных диапазонах после полосовой фильтрации. С целью отражения особенностей восприятия речи человеком, а также для снижения размерности результирующего вектора признаков целесообразно использовать в качестве полосовых фильтров психоакустические банки фильтров: мел-фильтры, барк-фильтры или гамматон-фильтры. Влияние формы и числа фильтров на спектр модуляции речевого сигнала является темой отдельных исследований. В данной работе для вычисления спектра модуляции применяются 12 перекрывающихся мел-фильтров в частотном диапазоне от 100 Гц до 4200 Гц.

Фильтрация производится в частотной области путем перемножения амплитудного спектра Фурье $\{X_k\}_{k=0}^{N-1}$ сигнала в текущем окне анализа и амплитудно-частотной характеристики каждого из полосовых фильтров с последующим суммированием всех отсчетов:

$$E_i = \sum_{k=0}^{N-1} |X_k| \cdot H_i(f_k), \quad i = 1..M,$$

где N – размер преобразования Фурье, $M=12$ – количество мел-фильтров.

Амплитудно-частотные характеристики фильтров H_i имеют треугольный вид и изображены на рис.2. Они могут быть заданы аналитически в виде формул:

$$H_i(f_k) = \begin{cases} 0 & f_k \leq f_{c_{i-1}} \\ \frac{f_k - f_{c_{i-1}}}{f_{c_i} - f_{c_{i-1}}} & f_{c_{i-1}} < f_k \leq f_{c_i} \\ \frac{f_{c_{i+1}} - f_k}{f_{c_{i+1}} - f_{c_i}} & f_{c_i} < f_k \leq f_{c_{i+1}} \\ 0 & f_k > f_{c_{i+1}} \end{cases} \quad (1)$$

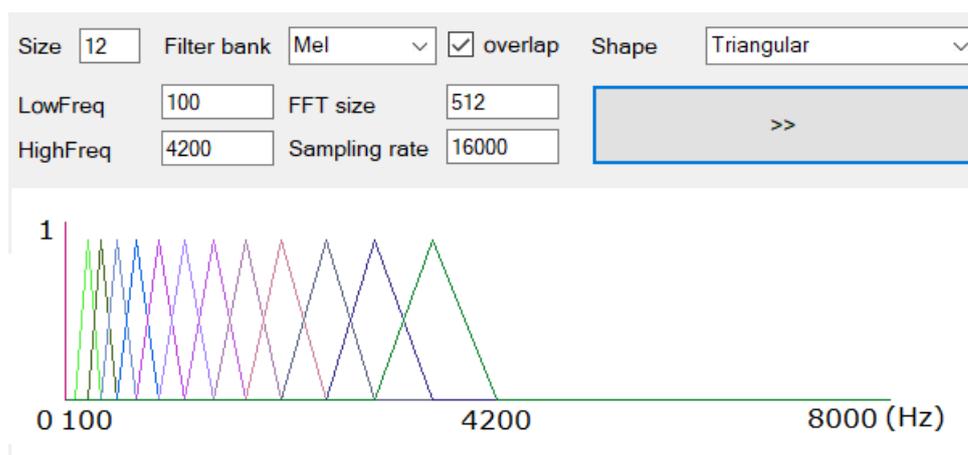


Рис. 2. Банк перекрывающихся треугольных мел-фильтров

В формуле (1) значения центральных (пиковых) мел-частот f_{c_i} рассчитываются путем преобразования частот из шкалы герц в шкалу мел по формуле:

$$f_{c_i} = 700 \cdot (e^{h_{c_i}/1127} - 1),$$

где h_{c_i} – i -ая частота в шкале герц. Центральные частоты распределены на шкале мел равномерно, на шкале герц – логарифмически.

Классификатор голосовых команд. Последним шагом алгоритма распознавания голосовых команд является принятие решения об отнесении спектра модуляции обработанного речевого сигнала к какой-либо команде из словаря (классификация команды). В области машинного обучения и анализа данных существует множество эффективных статистических классификаторов. Т.к. на данном этапе исследований акцент делается на цифровой обработке сигнала и анализе спектра модуляции, то были выбраны базовые (baseline) алгоритмы классификации: классификатор на основе k ближайших соседей (k-nearest neighbors, kNN) и машины опорных векторов (Support Vector Machine, SVM) [9, 10]. С увеличением объема статистических данных разница в эффективности различных классификаторов, как правило, будет уменьшаться.

Алгоритм kNN не предполагает стадии обучения, а работает сразу в режиме распознавания. После вычисления спектра модуляции сигнала находятся k уже размеченных в обучающей выборке спектров, наиболее близких к данному. В качестве метрики используется евклидово расстояние. Затем среди отобранных спектров модуляции путем взвешенного голосования окончательно определяется распознанная

команда. В данной работе $k=7$, но значение данного параметра может быть также установлено в результате перебора по методологии «поиска по сетке» (Grid Search).

Алгоритм обучения SVM находит коэффициенты гиперплоскости, максимально разделяющей входные образы команд в пространстве признаков (спектров модуляции). Решающая функция классификатора SVM задана формулой:

$$h(x) = \text{sgn}\left(\sum_{i=1}^m \lambda_i y_i K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) - \omega_0\right),$$

где λ_i и ω_0 – коэффициенты; \mathbf{x}_i и y_i – входной вектор спектра модуляции и соответствующее ему значение из обучающей выборки (0 или 1), соответственно; $K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) = \phi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})^T \phi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x})$ – ядро. В качестве ядра выбраны радиально-базисные функции:

$$\phi(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}) = \exp(-\gamma \|\mathbf{x} - \mathbf{x}_i\|^2), \quad \gamma > 0 \quad (2)$$

Обучение SVM заключается в нахождении коэффициентов λ_i и ω_0 . Для этого решается задача квадратичной оптимизации с ограничениями:

$$\sum_{i=1}^m \lambda_i - \frac{1}{2} \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \lambda_i \lambda_j y_i y_j K(\mathbf{x}_i, \mathbf{x}_j) \rightarrow \max_{\lambda}$$

$$\begin{cases} \sum_{i=1}^m \lambda_i y_i = 0 \\ 0 \leq \lambda_i \leq C; \quad C > 0, \quad i = 1, 2, \dots, m \end{cases} \quad (3)$$

Константы γ и C в формулах (2) и (3) являются свободными параметрами модели и могут быть заданы пользователем. Отдельная SVM решает задачу бинарной классификации. В случае распознавания голосовых команд количество выходных образов соответствует числу команд в словаре предметной области, поэтому модель SVM расширяется на случай мультиклассовой классификации путем композиций автономных SVM, принимающих для каждой команды решение по типу «один против остальных».

Описание эксперимента и анализ результатов. Информационная технология распознавания голосовых команд управления мобильным роботом основывается на методе, описанном выше, и поддерживается специально разработанным на языке C# программном обеспечении: приложении ModulationSpectrograph и библиотеке NWaves. Для обучения классификаторов, распознавания голосовых команд и визуализации результатов был написан скрипт recognize.py на языке Python с использованием пакетов numpy, pandas, scikit-learn, matplotlib.

Методология проведения эксперимента предполагает следующий набор действий: 1) запись голосовой команды с микрофона в приложении ModulationSpectrograph; 2) явное указание прозвучавшей команды из списка и сохранение звукового файла: программа сохранит wav-файл в специальную директорию wav с названием, которое соответствует команде, например, «БЫСТРЕЕ_001.wav»; 3) повторение первых двух шагов для формирования набора данных достаточного размера; 4) генерация в программе ModulationSpectrograph csv-файла с векторами признаков для обучения и проверки классификаторов (при этом программа обрабатывает все звуковые файлы из директории wav, вычисляет спектр модуляции в каждом случае и формирует вектор признаков для записи в csv-файл); 5) распознавание команд и визуализация результатов с помощью скрипта recognize.py.

В эксперименте принимал участие один диктор, произнесший каждое слово из словаря по 30 раз. Обучающая и тестовая выборка были дополнены также сигналами, автоматически искаженными шумом и эффектом реверберации. Вектор признаков для SVM представляет собой в первом эксперименте модель спектра модуляции, имеющего размерность 384 (12 частотных диапазонов, в каждом из которых рассчитаны 32 спектральных коэффициента), и во втором эксперименте – модель 12-мерного спектра модуляции, в котором оставлены только коэффициенты модуляции на частоте 4 Гц.

На рис.3 приведены для сравнения примеры спектра модуляции трех различных голосовых команд.



Рис. 3 – Примеры спектра амплитудной модуляции:
а) команда «Назад»; б) команда «Опасность»; в) команда «Ищи»

На рис.4 приведены спектрограммы и спектры модуляции одной и той же команды: без обработки, с наложением белого шума уровня +6 dB и с примененным эффектом реверберации помещения.

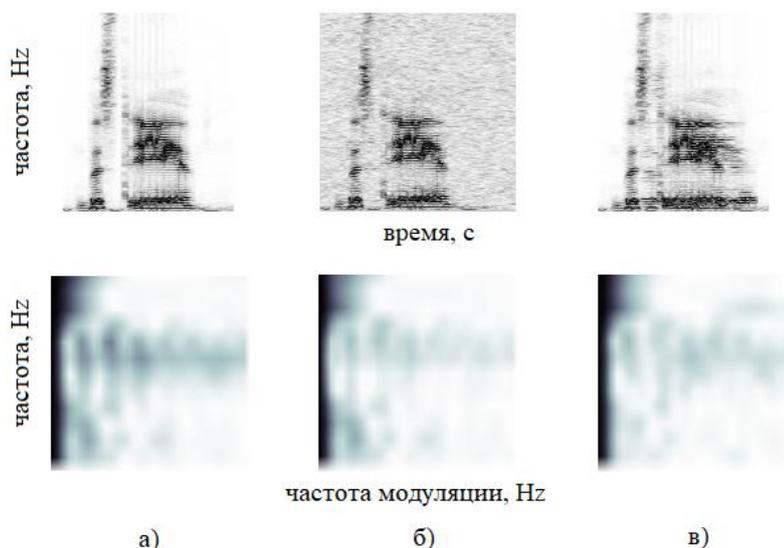


Рис. 4. Спектрограмма (вверху) и спектр модуляции (внизу) команды «Быстрее»:
а) без обработки; б) с наложенным шумом; в) с эффектом реверберации

Как видно из рис.4, спектр модуляции более устойчив к указанным искажениям сигнала по сравнению с кратковременным преобразованием Фурье.

Классификаторы обучались для распознавания 11 голосовых команд управления роботом: «Быстрее», «Вперед», «Ищи», «Медленнее», «Назад», «Налево», «Направо», «Опасность», «Прямо», «Разворот», «Стоп». Результаты распознавания классификатора SVM приведены в виде матрицы ошибок на рис.5.

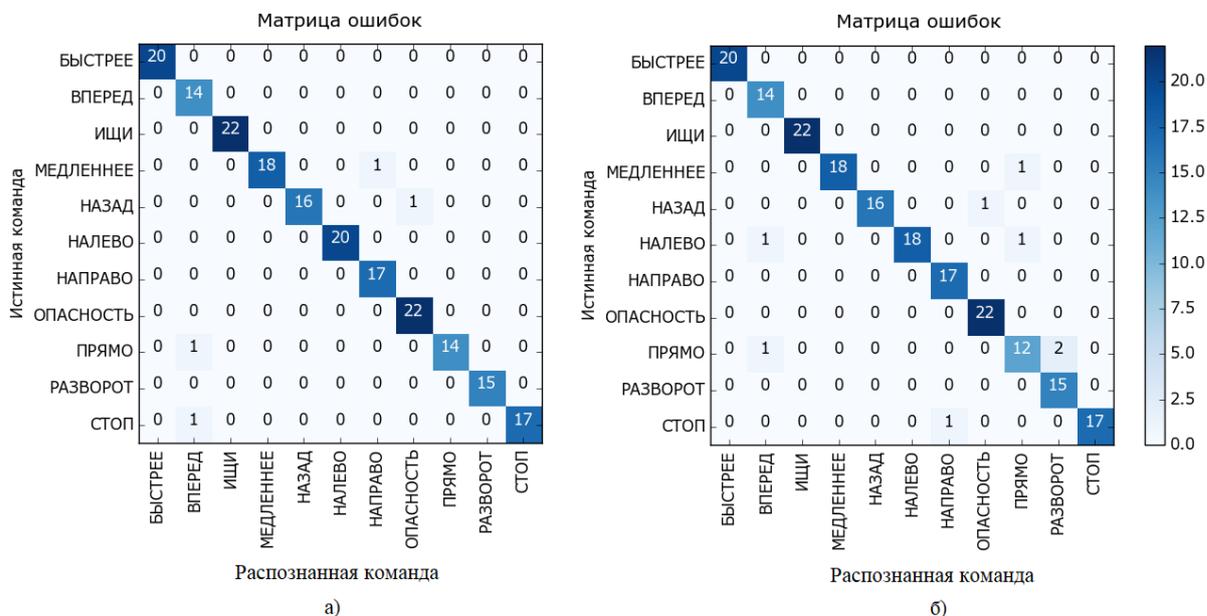


Рис. 5. Матрицы ошибок распознавания команд классификатором SVM: а) в экспериментах с моделью 1; б) в экспериментах с моделью 2 (4 Гц)

Средняя точность распознавания команд рассчитывалась путем кросс-валидации с размером тестовой выборки 20% от всей выборки и составила 99,2% для первой модели и 97,6% для второй модели спектра модуляции. Классификатор kNN показал похожие результаты; его средняя точность распознавания составила 97,1%.

Эксперименты производились на компьютере со следующими характеристиками: процессор Intel Core i3 с тактовой частотой 3,5 ГГц; объем оперативной памяти 16 Гб. Скорость расчета спектра модуляции оказалась равна, в среднем, 120х (120 секунд сигнала обрабатываются за 1 секунду), что дает возможность использовать алгоритм в реальном времени.

Выводы. Проведенные исследования показали перспективность подхода к распознаванию голосовых команд из небольших словарей, основанного на спектре модуляции речевого сигнала. На примере словаря робота уже на малой обучающей выборке и с использованием простейших моделей машинного обучения получена точность распознавания отдельных слов, произнесенным одним диктором, на отметке 98-99%. Визуальный анализ спектров модуляции позволяет сделать вывод о большей устойчивости данного метода параметризации речевого сигнала к стационарному шуму и эффектам реверберации помещений по сравнению с другими популярными методами, применяемыми в современных ASR-системах. Кроме того, вычислительная сложность метода относительно невелика и позволяет использовать его в реальном времени.

Дальнейшая работа связана с адаптацией алгоритма под разных дикторов за счет предварительного сдвига частоты основного тона к той, на которой система обучалась

(например, методом фазового вокодера). Также заслуживают внимания исследования, связанные с варьированием формы и количества банков фильтров при вычислении спектра модуляции, а также заменой кратковременного преобразования Фурье на первом шаге алгоритма на другие спектрально-временные преобразования (кепстр, линейное предсказание и т.д.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Huang X. Spoken Language Processing: A guide to theory, algorithm, and system development / X.Huang, A.Acero, H.Hon. – Prentice Hall, 2001. – 980 p.
2. Zhang Y. Very deep convolutional networks for end-to-end speech recognition / Y. Zhang, W. Chan, N. Jaitly // Proceedings of ICASSP 2017. – 2017. – P. 4845-4850.
3. Dahl G. Context-Dependent Pre-trained Deep Neural Networks for Large-Vocabulary Speech Recognition / G.E. Dahl, D. Yu, L. Deng, A. Acero // IEEE Transactions on Audio, Speech, and Language Processing. – Vol.20 (1). – 2012. – P. 30-42.
4. Tchorz J. SNR estimation based on amplitude modulation analysis with applications to noise suppression / J. Tchorz, B. Kollmeier // IEEE Transactions on Speech Audio Processing. – Vol.11. – 2003. – P. 184-192.
5. Азаров И.С. Алгоритм очистки речевого сигнала от сложных помех путем фильтрации в модуляционной области / И.С. Азаров, М.И. Вашкевич, Д.С. Лихачев, А.А. Петровский // Цифровая обработка сигналов. – №4. – 2013. – С.25-31.
6. Paliwal K. Single-channel speech enhancement using spectral subtraction in the short-time modulation domain / K. Paliwal, K. Wojcicki, B. Schwerin // Speech Communication. – Vol. 52. – 2010. – P. 450-475.
7. Sukittanon S. Modulation frequency features for audio fingerprinting / S. Sukittanon, L. Atlas // Proc. of the ICASSP. – Vol.2 – 2002. – P. 1173-1176.
8. Greenberg S. The modulation spectrogram: In pursuit of an invariant representation of speech / S. Greenberg, B.E.D. Kingsbury // Proceedings of the IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing. – 1997. – P. 1647-1650.
9. Рашка С. Python и машинное обучение / С. Рашка. – М.: ДМК Пресс, 2017. – 418 с.
10. Хайкин С. Нейронные сети: полный курс / С. Хайкин. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2016. – 1104 с.

Поступила в редакцию 10.04.2018 г.

RECOGNITION OF ROBOT VOICE CONTROL COMMANDS BASED ON THE MODULATION SPECTRUM OF SPEECH SIGNAL

E.I. Cherkashin, T.V. Sharii

The article presents a robust method for recognizing robot voice control commands based on the modulation spectrum of speech signal. The algorithms are described for computing modulation spectra, calculating and applying auditory filter banks in frequency domain. The impact of noise and reverberation effects on modulation spectrum is studied. The results of experiments on the recognition of voice commands are given based on nearest neighbors and support vector machine classifiers in speaker-dependent testing environment.

Keywords: speech signal; modulation spectrum; filter bank; classifier.

Шарий Тимофей Вячеславович, кандидат технических наук, доцент, tsphere@mail.ru.

Timofei Viacheslavovich Sharii, PhD. in technical science, associate professor, tsphere@mail.ru.

Черкашин Евгений Игоревич, студент, shed133@gmail.com.

Yevgenii Igorevich Cherkashin, student, shed133@gmail.com.

УДК 50.41.29

РАСПОЗНАВАНИЕ ЛИЦ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ СВЕРТОЧНОЙ НЕЙРОННОЙ СЕТЬЮ

© 2018 *М.В. Бабичева, А.С. Шевченко*

Разработана нейронная сеть для 2D распознавания лиц с IP –камеры в режиме реального времени, система для биометрической аутентификации на ее основе, проведено тестирование на лицах студентов и преподавателей кафедры, измерены FAR, FRR, TAR и TRR, проанализированы возможности улучшения характеристик системы.

Ключевые слова: распознавание лиц, сверточная нейронная сеть, биометрическая система аутентификации, метод Виолы-Джонса, FAR, FRR.

Введение. Для решения задачи по распознаванию лиц обеспечение высокой скорости работы алгоритма должно сочетаться с малым количеством ложных распознаваний (FAR, FRR). Поэтому построение метода распознавания лиц, обеспечивающего достоверность и быстроту, при отсутствии ограничений на качество исходных изображений является весьма актуальной задачей. Кроме того, большое значение имеет замена длительных и дорогостоящих процедур внесения лица в базу данных, простыми и быстрыми, с применением вебкамер. Однако такие системы предъявляют повышенные требования к алгоритмам обработки изображений, которые могут работать с изображениями далеко не лучшего качества. Такими решениями являются алгоритмы с применением нейронных сетей. Такие компании как Microsoft, Google, Amazon, Facebook и т.д. предоставляют сервисы для машинного обучения, в которых уже есть шаблоны классификации, настраиваемые под распознавания лиц. Минусами таких решений является требование постоянного стабильного подключения к Internet, отсутствие конфиденциальности, при обработке изображений реальных людей на иностранных облачных сервисах, высокая стоимость качественных программных средств [1].

Целью данной работы является разработка приложения для распознавания лиц на основе сверточной нейронной сети, для обычного персонального компьютера, оснащенного стандартной IP- камерой и тестирование его на реальных лицах, с целью выявления недостатков и путей улучшения системы.

Получение изображения и поиск лица. Для получения изображения использовались вебкамеры, установленные на двух компьютерах: ПК Acer Aspire TC-780 (DT.B8DME.007) с веб-камерой Logitech HD WebCam C270 и ноутбук Asus VivoBook Max X541NA (X541NA-GO123) со встроенной веб-камерой. При этом базы лиц для распознавания создавались и на ноутбуке, и на ПК. В качестве библиотеки работы с веб камерой была взята библиотека компьютерного зрения OpenCV, которая распространяется свободно в условиях лицензии BSD. В качестве способа поиска расположения лица на фотографии был выбран метод Виолы - Джонса, использующий «признаки Хаара» [2,3]. В данной работе используется расширенный метод Виолы – Джонса, который незначительно увеличивает время обнаружения лица человека на изображении, но значительно повышает качество поиска. выбрано окно сканирования, выбраны используемые признаки. Выбирается размер ячейки, например, 8x8 пикселей, окно сканирования 24x24 ячейки, которое начинает последовательно двигаться по изображению, с шагом в 1 ячейку. В каждом окне вычисляется приблизительно 200 000

вариантов расположения признаков Хоара, за счет изменения масштаба признаков и их положения в окне сканирования, сканирование производится последовательно для различных масштабов окна (изменяется размер ячейки), все найденные признаки попадают на классификатор, который определяет, относится ли данная область к лицу. После того как человеческое лицо найдено на изображении и получены его координаты, область с лицом вырезается, приводится к формату 100x100 пикселей и подается на нейронную сеть.

Архитектура нейронной сети. При проектировании топологии нейронной сети желательно точно знать количество людей, которые будут проходить авторизацию, поскольку в выходном слое количество нейронов должно быть равно количеству лиц, которые сеть способна распознать, плюс один, если сеть никого не распознала. Но тогда возникают сложности с добавлением новых лиц для аутентификации, так как это требует полного переучивания сети каждый раз, что замедляет работу приложения [4,5]. Чтобы этого избежать был применен следующий способ аутентификации: вместо того, чтобы нейронная сеть распознавала лицо человека, она сравнивает лица с двух изображений – одно из базы данных, другое только что поступившее с камеры. Все изображения в базе данных заранее подписаны. Считается, что если лица на изображениях из базы и с камеры совпадают на 75% и более, то это лица одного и того же человека. Для более надежного распознавания, в базе данных хранится несколько фотографий одного человека. Все изображения обрабатываются в оттенках серого, что позволяет уменьшить количество в три раза.

Архитектура разработанной нейронной сети представлена на рисунке 1.

В нее входят следующие слои:

- В INPUT (входные данные) [100×100×1] содержится исходная информация об изображении (в данном случае 100 — ширина, 100 — высота, 1 — цветовые каналы, градации серого).

- Слой CONV (слой свертки) умножает значения фильтра на исходные значения пикселей изображения, после чего все эти результаты суммируются. Каждый сверточный слой уменьшает объем анализируемой информации. Например, если используется фильтр 12x12, объем данных для следующего слоя будет равен [32×32×12].

- Слой RELU применяет поэлементную функцию активации вроде $f(x) = \max(0, x)$, устанавливая нулевой порог. Иными словами, RELU выполняет следующие действия: если $x > 0$, то объем остается прежним ([32×32×12]), а если $x < 0$, то отсекаются ненужные детали, путем замены на 0.

- Слой POOL выполняет операцию по понижающей дискретизации пространственных размеров (ширина и высота), в результате чего объем может сократиться до [16×16×12]. То есть на этом этапе выполняется нелинейное уплотнение карты признаков. Логика работы такова: если на предыдущей операции свертки уже были выявлены некоторые признаки, то для дальнейшей обработки настолько подробное изображение уже не нужно, и оно уплотняется до менее подробной картинке.

- Полносвязный скрытый нейронный слой – слой из классических нейронов.

- Слой FC выводит N-мерный вектор (N — число классов) для определения нужного класса. Работа организуется путем обращения к выходу предыдущего слоя (карте признаков) и определения свойств, которые наиболее характерны для определенного класса. В нашем случае классов условно два: совпадает и не совпадает. Оба класса выдают число от 0 до 1, как вероятность. В сумме, вероятности обоих

классов будут равны 1, поэтому классом «не совпадает» можно пренебречь, подразумевая, что его значение будет равно 1 – вероятность первого класса. Сверточная нейронная сеть, слой за слоем, трансформирует исходное изображение, начиная с исходных значений пикселей и заканчивая определением класса. Необходимо обратить внимание, что слои не обязательно должны содержать параметры. В частности, слой свёртки и полносвязный скрытый слой выполняют преобразования, которые являются не только функцией от входного активационного объема, но и параметров (веса и смещения нейронов). С другой стороны, блок линейной ректификации и слой пулинга реализуют фиксированную функцию. Параметры в слоях CONV и FC будут обучаться с помощью градиентного спуска, поэтому определение класса свёрточной нейросетью зависит от меток в обучающем наборе для каждого изображения. В самой свёрточной нейронной сети оба изображения пропускаются через слои свёртки параллельно друг другу и независимо, и только в конце подаются вместе на нейроны.

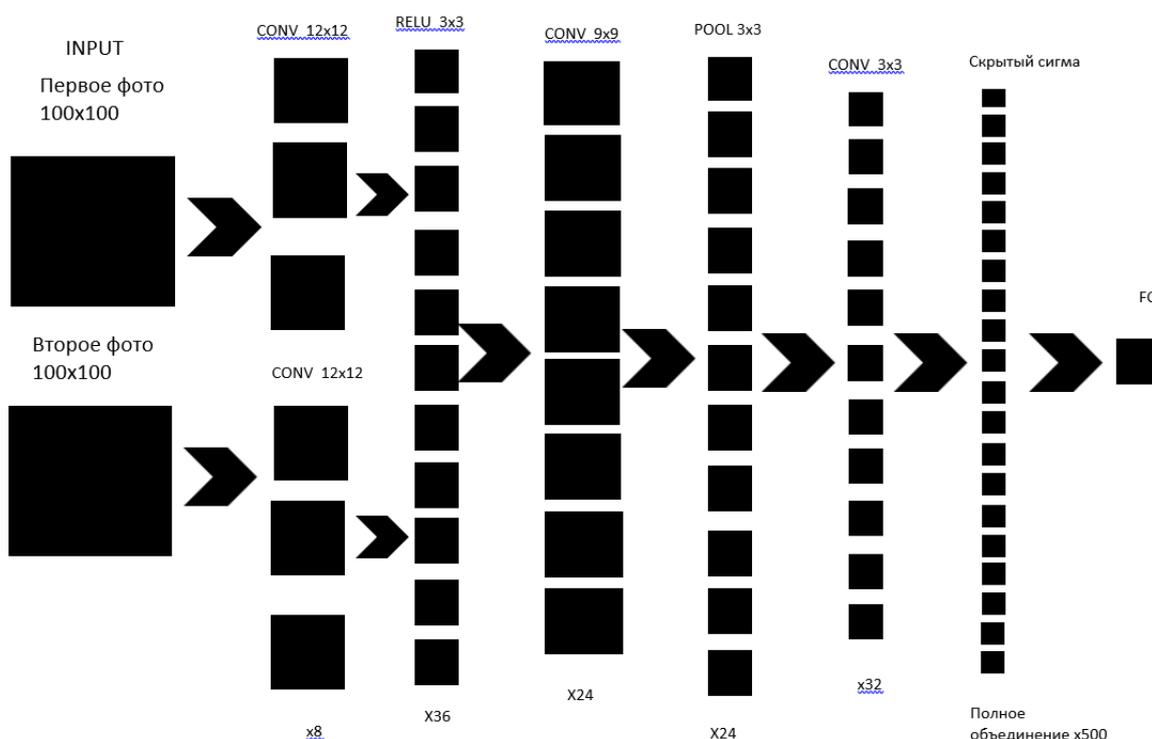


Рис. 1. Архитектура свёрточной нейронной сети для сравнения двух фотографий

Алгоритм обучения. В данной работе в качестве алгоритма обучения используется классический алгоритм обратного распространения ошибки с градиентным спуском [6]. Берётся тренировочное изображение и пропускается через всю сеть. На выходе получается случайный ответ, т.к. изначально веса инициализированы случайным образом. Вычисляется функция потерь. Для оценки потерь использовалась функция кросс-энтропии, которая значительно ускорила обучение, поскольку выходные нейроны являются сигмоидами. Затем идет перенастройка нейронных связей, минимизирующая функцию потерь градиентным спуском. В качестве набора для обучения использовалась база изображений лиц, созданная в университете Карнеги-Меллон. В базе 41368 изображений 68 человек.

Изображения в серии для каждого человека отличаются небольшими деталями, ракурсом и выражением лица.

Разработка приложения. Чтобы проверить работоспособность алгоритма была написана программа на алгоритмическом языке С#, которая способна распознавать человеческие лица на видеоряде от веб камеры и сравнивать их с фотографиями, уже имеющиеся в базе [7]. Схематическое описание интерфейса приложения представлено на рисунке 2.



Рис. 2. Схема интерфейса приложения

Для занесения в базу данных человек садится напротив видеокamеры, алгоритм Виолы-Джонса захватывает лицо в кадре, выделяя его красной рамкой, в графе «Имя» печатается имя на английском языке и нажимается кнопка «Добавить лицо». Изображение лица, захваченное в этот момент заносится в файл базы данных в виде полутоновой фотографии 100x100 пикселей. В связанный текстовый файл заносится имя, под которым зарегистрировано лицо. Под этим именем можно зарегистрировать несколько изображений с разных ракурсов. Таким образом формируется база лиц. Изображения лиц можно просмотреть в папке TrainedFaces в виде файлов в формате bmp. Там же находится и текстовый файл с именами, зарегистрированных людей, который можно редактировать.

При предъявлении приложению нового лица, и нажатии кнопки «Начать обнаружение и распознавание», в оперативной памяти описаным выше образом формируется фотография распознаваемого лица, и затем подается на вход нейронной сети по очереди вместе со всеми лицами из базы. Для каждого лица вычисляется результат распознавания нейронной сетью и записывается в массив сравнений. Выбирается наименьшее значение из массива сравнений и имя соответствующее этому значению выводится над изображением с веб камеры. Процесс работы приложения представлен на рисунке 3.

Тестирование. Для тестирования приложения было создано 4 базы данных из лиц студентов и преподавателей кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий из 2, 10, 25 и 50 изображений. База из 2-х лиц авторов применялась на ранних этапах, для понимания правильности работы алгоритма. Основные измерения проводились на базе из 50 изображений лиц, еще две базы (10 и 25 изображений) были задействованы, когда выяснилось, что скорость работы алгоритма сильно зависит от количества изображений в базе. После формирования баз изображений лиц, были проведены тесты на распознавание. В них принимали участие 30 человек из тех, кто

был зарегистрирован в базе и 20 человек из тех, кто не был зарегистрирован.



Рис. 3. Процесс распознавания лица приложением

Лицо считалось обнаруженным, когда программа выдавала сообщение «Число обнаруженных лиц 1» и лицо считалось распознанным, если над ним появлялась надпись с правильным именем человека. Одно и то же лицо предъявлялось алгоритму по несколько раз, при разном освещении, с разными прическами и другими меняющими внешность факторами. Эксперименты проводились в дневное время в 9:00 до 13:00 с разным уровнем освещенности, с включенным и выключенным освещением. Результаты распознавания записывались и обрабатывались.

Для обработки использовались стандартные метрики, которые применяются в системах аутентификации и имеют следующие названия:

- TAR (True Accept Rate) – лицо имеется в базе данных и распознано правильно
- TRR (True Reject Rate) – лицо не имеется в базе данных и не распознано
- FAR (False Accept Rate) – лицо не имеется в базе данных, но распознано, как имеющееся

- FRR (False Reject Rate) – лицо имеется в базе данных, но не распознано

Количество лиц, отнесенных к одной из четырех категорий делилось на количество лиц, предъявленных алгоритму в эксперименте и умножалось на 100%.

При предъявлении, лица, имеющиеся в базе данных, составляли 50% от общего количества предъявляемых лиц, поскольку для систем аутентификации важен, как допуск зарегистрированного, так и незарегистрированного пользователя. Причем большой процент FAR представляет более значительную угрозу, чем большой процент FRR, поскольку в случае отказа в допуске зарегистрированного пользователя, можно обратиться к администратору системы и получить допуск в ручном режиме.

Результаты тестирования. Результаты тестирования для базы данных из 50 лиц приведены в таблице 1. Результат распознавания сильно зависит от освещенности. Увеличение расстояния от объекта до веб-камеры с 0,5 до 3 метров существенно не повлияло на результат распознавания, пока алгоритм мог различать лицо на сцене он распознавал его так же, как и на близком расстоянии. Предъявлялись и несколько лиц одновременно, алгоритм распознавал столько лиц, сколько помещалось на сцене.

Очки в тонкой оправе практически не влияли на результаты распознавания, в то время как очки в массивной оправе резко снижали TAR и увеличивали FRR.

За время, прошедшее с момента регистрации, два студента отрастили бороды. Алгоритм не распознал их, как присутствующих в базе, хотя в базе присутствовали лица, зарегистрированные с бородами. Однако и 2 незарегистрированных лица алгоритм не распознал, как зарегистрированных. Таким образом борода увеличивает

FAR и не влияет на FRR. А вот легкая небритость, на результаты распознавания не повлияла совсем.

Таблица 1. Результаты тестирования приложения

Название эксперимента	FAR (%) не имеется в базе данных, но распознано как имеющееся	FRR (%) имеется в базе данных, но не рас познано	TAR (%) имеется в базе данных и распознано правильно	TRR (%) не имеется в базе данных и не рас познано	Всего предъяв лено лиц из базы/ не из базы
Предъявление лиц при одинаковых условиях с условиями регистрации	7	8	42	43	40/20
Предъявление лиц в условиях разной освещенности	0	64	3	33	40/20
Увеличение расстояния от объекта до видеокамеры до 3м	5	8	42	45	40/20
Предъявление лиц с различными маскирующими факторами:					
Очки, в тонкой оправе	5	10	40	45	10/10
Очки, в массивной оправе	0	40	10	50	10/10
Борода	0	50	0	50	2/2
Изменение прически	0	10	40	50	10/10
Светлый головной убор	5	45	5	45	10/10
Темный головной убор	10	10	40	40	10/10
Лицо с фотографии, не имеющейся в базе данных	0	0	0	100	10
Лицо с фотографии, имеющейся в базе данных	0	40	10	50	10
Лицо с экрана мобильного телефона	5	45	5	45	10/10
При изменении ракурса (менее 10%)	0	35	15	50	10/10
При изменении ракурса (более 10%)	0	50	0	50	10/10
Изменение мимики	5	10	40	45	10/10

Результаты для головных уборов светлых и темных оказались разными, поэтому попали в разные строчки таблицы. Для темных головных уборов TAR -40%, в то время как для светлых – 5%. Очевидно алгоритм отождествляет темный головной убор с прической, а светлый – с частью лица.

Были подготовлены фотографии лиц, которые имеются в базе данных, для того, чтобы проверить можно ли «обмануть» систему при помощи фотографии. Причем это были как фотографии, сделанные фотоаппаратом, так и распечатанные на бумаге изображения лиц, скопированные из файла, имеющихся в базе лиц. Только 2 фотографии, из скопированных из базы, были распознаны правильно. Но ни одно лицо с фотографии, сделанной фотоаппаратом не было правильно распознано. А когда предъявлялось изображение лица с экрана мобильного телефона, то имели место

случаи ложного допуска, хотя большинство лиц, имеющихся в базе данных не были распознаны. Скорее всего это результат разной яркости изображений на экране мобильного телефона и захваченного веб-камерой.

Небольшое (до 10%) изменение ракурса лица при распознавании не сильно влияло на результаты, что вообще характерно для нейросетевых алгоритмов. А вот когда поворот головы составлял более 10%, то алгоритм не распознавал лиц вообще. Но при сохранении фронтального расположения лица, и наклоне его вправо-влево результаты распознавания были такими же, как и при прямом расположении. Изменение мимики не влияло на результаты распознавания совсем. Студенты корчили рожи, выражали разные эмоции – грусть, радость, удивление, страх. Алгоритм прекрасно распознавал лица и результаты не отличались от результатов с нейтральным выражением.

В процессе того, как объем базы изображений лиц увеличивался стало заметно, что скорость работы алгоритма зависит от количества изображений в базе. Поэтому были проведены эксперименты с базами лиц разных объемов. Лицо предъявлялось в камеру и время, прошедшее с этого момента, до того, как появлялась надпись о том, что лицо обнаружено и распознано считалось временем распознавания. Время засекалось секундомером для 20 предъявленных лиц, а затем результат усреднялся. Из таблицы 2 видно, что зависимость эта нелинейная и объясняется тем, что алгоритм сравнивает предъявляемое для распознавания лицо со всеми изображениями, имеющимися в базе.

Таблица 2. Скорость работы алгоритма с изменением объема базы изображений

Объем базы изображений лиц (шт.)	10	25	50
Скорость распознавания лица (с)	1	3	4

Выводы. Алгоритм распознавания лиц, предложенный в работе, функционирует удовлетворительно, для записи изображений лиц в базу данных и для предъявления лиц на распознавание. Основные характеристики системы: FRR– лицо имеется в базе данных, но не распознано – 6%, TAR– лицо имеется в базе данных и распознано правильно - 42%, TRR– лицо не имеется в базе данных и не распознано – 43%, FAR (False Accept Rate) – лицо не имеется в базе данных, но распознано, как имеющееся – 7%.

Результаты распознавания зависят от освещения в помещении, изменения ракурса более, чем на 10%, таких маскирующих признаков, как борода, очки в массивной оправе, прическа, закрывающая лицо, светлый головной убор.

Не зависят от изменения ракурса менее, чем на 10%, изменения мимики, наличия темного головного убора.

Алгоритм невозможно «обмануть», предъявляя фотографию или изображение с экрана мобильного телефона вместо лица человека.

Скорость распознавания лица зависит от объема базы записанных изображений, причем нелинейно убывает с возрастанием объема базы.

К несомненным достоинствам алгоритма можно отнести тот факт, что не требуется переобучение системы, при добавлении нового лица в базу.

Возможные шаги по улучшению системы:

1) выравнивание яркости захваченных камерой и хранящихся в базе изображений одним из известных методов цифровой обработки;

- 2) фильтрация обнаруженных маскирующих признаков, которые влияют на работу алгоритма;
- 3) организация поиска в базе более быстрым способом, чем поочередное сравнение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кудряшов П.П. Алгоритмы обнаружения лица человека для решения прикладных задач анализа и обработки изображений / П.П.Кудряшов // Издательство физико-математической литературы. – М., 2007. – Т.2.
2. Viola P. Rapid object detection using a boosted cascade of simple features / P.Viola, M.Jones // Proc. IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. December 2001, vol. 1, pp. 1063–6919.
3. Bradski G. Learning OpenCV. Computer Vision with the OpenCV Library. / G.Bradski, A.Kaebler. – O'REILLY, 2008. – 556 с.
4. Хайкин Саймон. Нейронные сети: полный курс, 2-е издание.: Пер. с англ. – М.: Издательский дом «Вильямс», 2006. – 1104 с.: ил. – Парал. тит. англ.
5. Backpropagation In Convolutional Neural Networks -- DeepGrid [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://jefkine.com/general/2016/09/05/backpropagation-in-convolutional-neural-networks/> -- Backpropagation In Convolutional Neural Networks
6. Николенко С. Глубокое обучение / С.Николенко, А.Кадурин, Е.Архангельская. – СПб.: Питер, 2018. – 480.: ил. – (Серия «Библиотека программиста»).
7. Уотсон Карли. Visual C# 2010: полный курс / Уотсон Карли, Нейгел Кристиан, Педерсен Якоб Хаммер, Рид Джон Д., Скиннер Морган // Пер. с англ. – М.: ООО «И.Д. Вильямс», 2011. – 960 с.

Поступила в редакцию 13.04.2018 г.

REAL TIME PERSONS RECOGNITION WITH A CONVOLUTION NEURAL NETWORK

M.V.Babicheva, A.S.Shevchenko

In this paper a neural network was developed for 2D face recognition from IP cameras in real time, and a system for biometric authentication based on it, testing on faces of students and faculty members was carried out, FAR, FRR, TAR and TRR were measured, and possibilities for improving system performance were analyzed.

Key words: face recognition, convolutional neural network, biometric authentication system, Viola-Jones method, FAR, FRR.

Бабичева Маргарита Вадимовна

преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий.
E-mail: mv.babicheva60@gmail.com, Тел.: (071)-352-85-33

Babicheva Margarita

Donetsk National University

Шевченко Антон Сергеевич

студент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий.
E-mail: AzarayAOS@gmail.com, Тел.: (050)-574-72-06.

Anton Shevchenko

Donetsk National University

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

УДК 669.187.2:621.365.2:536.24

ПРИНЦИПЫ ПОВЫШЕНИЯ ИНТЕНСИВНОСТИ ТЕПЛОМАССООБМЕНА В ЖИДКИХ СРЕДАХ ДУГОВЫХ МНОГОЭЛЕКТРОДНЫХ ПЕЧЕЙ

© 2018 *А.Л. Кухарев, В.В. Белоусов*

На основе анализа теплоэнергетических и конструктивных параметров современных сверхмощных дуговых печей выделены перспективные направления интенсификации электровихревых течений и тепломассообмена в расплаве за счет совершенствования схем и параметров энергоподвода. Предложена конструкция шестиэлектродной дуговой печи с тремя сводовыми и тремя подовыми электродами, энергопитание которой осуществляется от специальных преобразователей напряжения, обеспечивающих выдачу, как постоянного напряжения, так и переменного напряжения с регулируемыми параметрами амплитуды, формы, фазы и частоты. Намечены задачи и параметры оптимизации тепломассообмена при проведении дальнейших исследований.

Ключевые слова: дуговая печь; электрод; электровихревые течения; тепломассообмен.

Введение. В современных технологиях выплавки стали и различных сплавов наиболее часто используются электродуговые печи, содержащие, как правило, три и более электрода. Среди таких печей в отдельную группу можно вынести так называемые сверхмощные печи (англ. UHP – Ultra High Power), установленная мощность которых достигает 100 МВА и более при токах 80-150 кА [1, 2].

Как правило, основные технологические процессы в таких печах протекают в ванне расплава, в которую погружается твердая шихта, происходит дальнейшее ее плавление и растворение, проводится рафинирование расплава.

подавляющее большинство дуговых печей переменного тока имеют круглую ванну с тремя сводовыми электродами, расположенными по вершинам равностороннего треугольника. При этом, как показывают современные исследования, тепловое поле в расплаве носит существенно неоднородный характер [3, 4]. Вблизи электродов за счет электрических дуг расплав значительно перегревается, а вблизи стенок печи охлаждается, при этом перепад температур может достигать несколько сотен градусов. Поэтому в таких печах для выравнивания температур и гомогенизации химического состава расплава применяются различные механизмы перемешивания, основанные, как правило, на интенсификации вынужденной конвекции [5, 6].

Одним из наиболее распространенных способов перемешивания является донная или боковая продувка расплава кислородом или инертными газами, которая нашла широкое распространение при выплавке стали. Однако, при продувке кислородом возникают следующие негативные факторы [6, 7]:

- значительный угар железа (10–14%);
- большая масса образующейся пыли;
- сложность инжекционного оборудования.

В последнее время для крупных электрометаллургических комплексов разрабатываются многоэлектродные печи, питающиеся постоянным током или током пониженной частоты от современных полупроводниковых преобразователей

переменного напряжения [2, 8, 9]. В частности разработан ряд конструкций шестиэлектродных печей, с различным сочетанием сводовых и подовых электродов [2, 8-10]. В таких печах для перемешивания расплава могут использоваться различные магнитогидродинамические эффекты. Так, например, при взаимодействии протекающих в расплаве токов с собственным магнитным полем печи возникают вихревые течения, возбуждаемые объемными электромагнитными силами. Эти, так называемые электровихревые течения (ЭВТ), могут ускорять или замедлять потоки расплава и, тем самым, предоставляют многочисленные возможности бесконтактного управления процессами тепломассообмена в печах.

Исследования ЭВТ и тепломассообмена в печах различных конструкций в последнее время проводятся исследовательскими центрами компаний SMS group GmbH (Дюссельдорф) [3], Danieli Centro Met (Буттрио), Объединенным институтом высоких температур (Москва) [11], а также профильными кафедрами Национального автономного университета Мексики (Мехико) [4], Таллиннского технического университета [8], НИУ «МЭИ» (Москва) [9], Латвийского университета (Рига) [13], ДонНУ (Донецк) [14], МГТУ им. Носова (Магнитогорск) [15] и др.

Исходя из анализа данных работ, на сегодняшний день наиболее полно исследованы процессы тепломассообмена в двухэлектродных ваннах с осесимметричными сводовым и подовым электродами, в ваннах с тремя сводовыми электродами, а также в ваннах с одним сводовым электродом и двумя асимметрично расположенными подовыми электродами.

Что касается печей с большим количеством электродов, то на основе имеющихся в литературе данных можно установить, что до сих пор вопросы теоретического и экспериментального исследования процессов тепломассообмена в таких печах являются малоизученными, отсутствует классификация многоэлектродных печей, недостаточно исследованы взаимосвязи характеристик тепломассообмена с параметрами энергоподводящей системы, отсутствуют обоснованные критерии выбора схем расположения электродов в ванне печи.

Таким образом, **целью** данной статьи является анализ проблемы повышения интенсивности тепломассообмена в расплавах многоэлектродных печей за счет схем и параметров энергоподвода.

Основная часть. Как правило, ванны сверхмощных дуговых печей имеют цилиндросфероконический профиль, глубина ванны обычно составляет 1-1,6 м, а диаметр ванны на уровне зеркала расплава 5-8,5 м [7].

Поступление тепловой энергии в ванну рассматриваемых печей происходит, в основном, двумя способами: в результате теплопередачи через зеркало расплава, а также в результате тепловыделения внутри ванны, при этом поверхность контакта ванны с кладкой является поверхностью охлаждения ванны вследствие тепловых потерь. Для оценки энергии, идущей на нагрев расплава в дуговых печах, можно использовать следующее приближенное уравнение:

$$Q_p = Q_d \eta_d + Q_{Дж} + Q_{\Sigma техн} - Q_{\Sigma т.пот}, \quad (1)$$

где Q_d – тепловая мощность, выделяемая в электрических дугах, Вт; η_d – к.п.д. электрических дуг, учитывающий потери энергии, передаваемые радиационными потоками на футеровку и охлаждающие панели; $Q_{Дж}$ – тепловая мощность, выделяющаяся при прохождении электрического тока через слой расплава (эффект Джоуля-Ленца), Вт; $Q_{\Sigma техн} = Q_{экз} - Q_{энд} + Q_{дон}$ – сумма тепловых эффектов

технологического процесса (экзотермические и эндотермические химические реакции, дополнительная энергия, получаемая за счет теплогенерирующих устройств, например, топливно-кислородных горелок), Вт; $Q_{\Sigma \text{ном}}$ – сумма тепловых потерь в печи (через внешние стенки печи, тепловые потери при охлаждении конструкционных элементов, потери тепла отходящими газами), Вт.

Следует отметить, что мощность, выделяемая в электрических дугах сталеплавильных печей Q_d примерно равна электрической мощности, вводимой в печь $P_э$, а коэффициент η_d по данным [16] находится в пределах 0,54-0,96 и во многом зависит от параметров электрических дуг и высоты шлакового слоя, экранирующего дуги.

В общем случае тепловая мощность электрического тока $Q_{Джэ}$ зависит от следующих факторов:

- характера растекания электрического тока, определяемого схемой расположения электродов;
- значений удельной электрической проводимости расплава;
- частоты электрического тока.

Обычно выделяемая внутри ванны расплава сталеплавильных печей из-за достаточно большого значения проводимости расплава стали σ незначительна и составляет около 10^{-3} от электрической мощности, вводимой в печь, а при переменном токе промышленной частоты неравномерность тепловыделения в расплаве усиливается за счет явления скин-эффекта [5]:

$$dQ_{Джэ} = \frac{J^2}{\sigma} dV, \quad (2)$$

где J – плотность тока в расплаве, А/м²; V – объем расплава, м³.

Тепломассообмен непосредственно в ванне расплава осуществляется преимущественно за счет теплопроводности, естественной и вынужденной конвекции. Как правило, в печи существуют две различные зоны движения расплава: слой шлака и слой металла.

Одним из основных параметров теплообмена в расплаве является количество теплоты, переносимое расплавом на поверхность стенки печи или передаваемое твердой шихте, погруженной в расплав. Данную величину, с одной стороны, можно выразить через произведение градиента температуры на стенке и коэффициента теплопроводности, а с другой стороны – посредством коэффициента теплоотдачи при известной разности температур в потоке и на стенке и площади поверхности теплообмена [17]:

$$Q = -\lambda \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{S_0} \cdot t = \alpha \cdot \Delta T \cdot S_0 \cdot t, \quad (3)$$

где α – коэффициент теплоотдачи (теплопереноса), Вт/(м²·К); ΔT – перепад температур в расплаве, К; S_0 – площадь поверхности, м²; t – время, с; λ – коэффициент теплопроводности Вт/(м·К); n – нормаль к поверхности.

Следует отметить, что коэффициент α , характеризующий интенсивность процесса теплообмена, определяется гидродинамическим и тепловым состоянием ванны и для сталеплавильных печей обычно составляет 10^3 - 10^4 Вт/(м²·К) [6, 12]. Коэффициент теплоотдачи в ванне печи также определяют как функцию средней мощности перемешивания [18]:

$$\alpha = 5000 \cdot P_n^{0,2}, \quad (4)$$

где P_n – мощность перемешивания, Вт.

В безразмерном виде соотношение (3) можно представить в виде локального числа Нуссельта [12, 14, 17]:

$$Nu_m = \frac{\alpha L_0}{\lambda} = - \left. \frac{\partial T}{\partial n} \right|_{S_0}, \quad (5)$$

где L_0 – характерный размер, м.

Рассмотрим основные закономерности движения расплава в дуговых печах вследствие ЭВТ. Следует отметить, что движение расплава возможно, если электромагнитная сила (сила Лоренца) будет вихревой [17], т.е.:

$$\text{rot} \vec{F}_d = \text{rot}(\vec{J} \times \vec{B}) \neq 0, \quad (6)$$

где B – индукция магнитного поля, Тл.

Основным критерием ЭВТ является параметр $S_{ЭВТ}$, который характеризует отношение электромагнитной силы, возникающей при взаимодействии электрического тока с собственным магнитным полем, к силе вязкости (или силе инерции) и определяет интенсивность порождаемого электромагнитной силой движения жидкости [17]:

$$S_{ЭВТ} = \frac{\mu_0 I^2}{\rho \nu^2}, \quad (7)$$

где μ_0 – магнитная проницаемость немагнитной среды, Гн/м; I – ток в расплаве, А; ρ – плотность расплава, кг/м³; ν – кинематическая вязкость расплава, м²/с.

Рассмотрим численные значения критериев подобия с учетом физических параметров расплава стали [14]. Для сверхмощных дуговых печей $S_{ЭВТ} \approx 10^{12}$, что, показывает возможность использования ЭВТ для перемешивания расплава. Магнитное число Рейнольдса $Re_m \approx 1$ [14], в связи с этим, можно считать, что движение среды существенно не влияет на магнитное поле. Число Рейнольдса, соизмеряемое силы инерции и силы вязкого трения в расплаве стали, при скоростях движения 0,01- 0,45 м/с [9, 14] составляет $Re = 10^4 - 10^5$, таким образом, для крупных сталеплавильных печей характерен турбулентный режим движения, причем предварительные расчеты показывают, что турбулизация расплава возможна уже при скоростях около 0,003 м/с, соответствующих $Re_{кр} \approx 2300$.

Отметим, что ЭВТ в печах обладают рядом общих свойств [11, 14, 15], а именно:

- структура ЭВТ определяется характером растекания электрического тока в расплаве, при этом скорость течения пропорциональна силе тока; по данным [9, 14] максимальные расчетные скорости составили 0,45 и 0,5 м/с соответственно при токах 20 и 80 кА и при диаметрах электродов 0,12 и 0,5 м.

- уменьшение диаметра электродов приводит к интенсификации ЭВТ, а увеличение глубины ванны – к переходу структуры потока с одиночным вихрем к двухвихревой системе; такая же гидродинамическая структура, состоящая из двух вихрей, образуется также в двухслойной модели печи (металл – шлак);

– наиболее интенсивные течения расплава наблюдаются вблизи электродов и носят развитый турбулентный характер, а в периферийных зонах ванны циркуляция расплава незначительна;

– течение весьма чувствительно к различного рода возмущениям и несимметриям, а также к внешним магнитным полям, созданным, например, токами в токоподводах и др., что может приводить к искажению осесимметричной картины течения и генерации вторичных течений;

– в результате воздействия ЭВТ интенсивность теплообмена увеличивается, и температура в ванне усредняется; по данным работы [12] при различных способах электромагнитного перемешивания достигается увеличение коэффициента теплоотдачи α в 2-3 раза, по сравнению с перемешиванием только за счет естественной конвекции.

Следует также отметить, что естественная конвекция может также оказывать влияние на движение расплава. За счет появления градиентов температур в горизонтальной плоскости ванны, естественная конвекция реализуется только в вертикальных (меридиональных) плоскостях в виде вихревых течений [17]. При этом направление электровихревого течения и течения, вызванного естественной конвекцией, может быть противоположным, тогда общая структура течения в печи будет формироваться в результате противоборства данных механизмов.

Влияние естественной конвекции на движение расплава можно оценить с помощью числа Ричардсона, которое является комбинацией чисел Грасгофа и Рейнольдса: $Ri = Gr / Re^2$ [19]. Ввиду неоднозначности определения разности температур ΔT , фигурирующей в числе Грасгофа, целесообразно проанализировать зависимость числа Ричардсона при различных значениях ν и ΔT (рисунок 1).

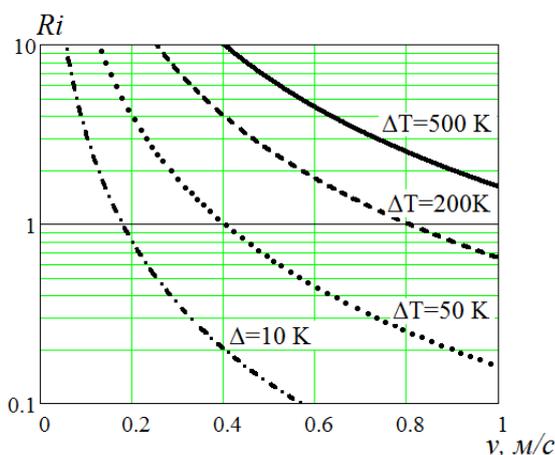


Рис. 1. График зависимости числа Ri от скорости при различных ΔT

Как видно из рисунка, при $\nu \leq 0,18$ м/с и $\Delta T \geq 10$ К существенное влияние на гидродинамику и теплообмен будет оказывать естественная конвекция, что также подтверждается выводами, полученными в [20], где показано, что естественная конвекция заметно изменяет структуру потока на участках ванны, где электромагнитное поле мало. Однако, окончательное суждение о характере движения расплава в многоэлектродных печах можно дать лишь на основе данных полного компьютерного или физического моделирования.

Рассмотрим структуру построения многоэлектродных печей (рисунок 2) и влияние схем расположения электродов на тепломассообменные процессы.

В печах без подовых электродов задача симметрирования теплового поля, как правило, решалась методом распределения источников нагрева по поверхности ванны с помощью параллельного подключения двух и более электродов к источникам постоянного или переменного напряжения. Для анализа формы теплового поля в таких печах обычно используется понятие «горячей зоны» т.е. зоны, образующейся вокруг электродов, в которой выделяется до 90% всей энергии электрических дуг, а характерные температуры составляют 2000-3000 К [4].

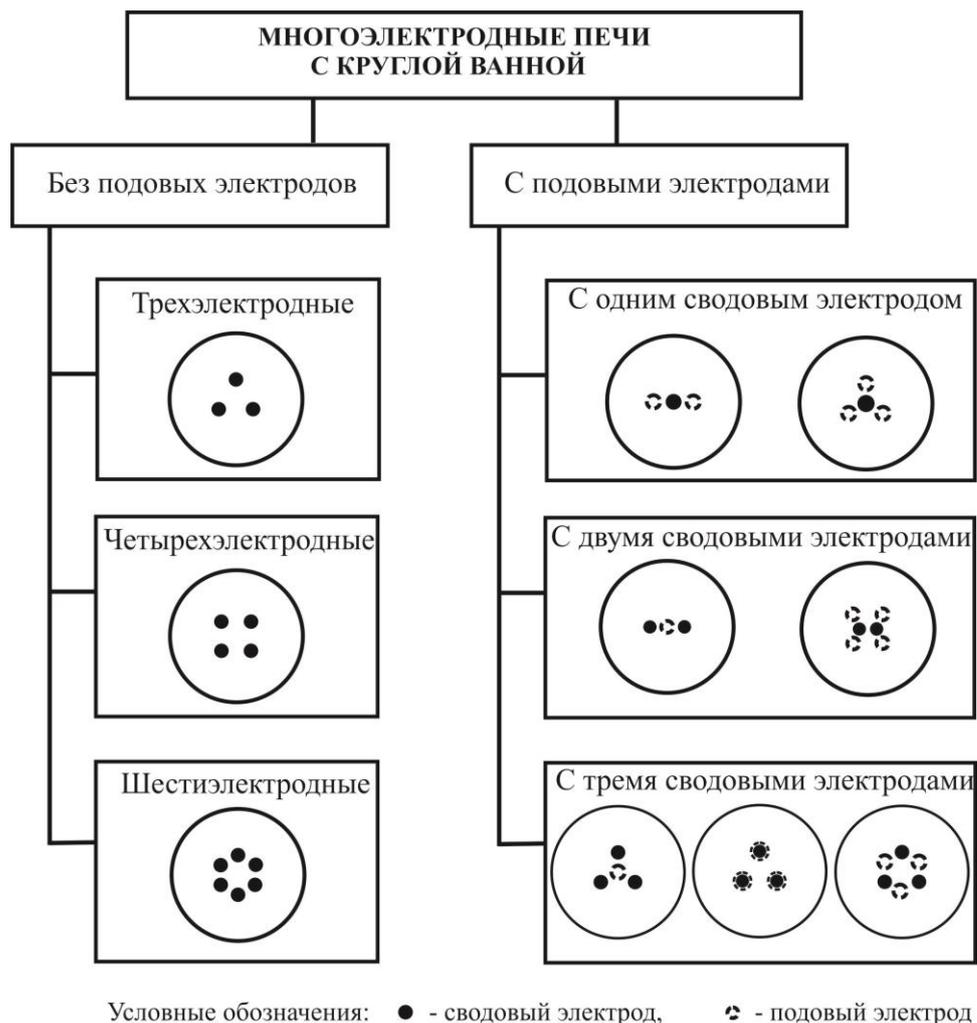


Рис. 2. Классификация многоэлектродных печей

Также для анализа таких печей можно использовать коэффициент заполнения, равный отношению площади «горячей зоны» к площади свободной поверхности расплава:

$$K_{зан} = \frac{S_{г.з.}}{S_{с.п.}}, \quad (8)$$

где $S_{г.з.}$ – площадь, занимаемая горячей зоной, м²; $S_{с.п.}$ – площадь, свободной поверхности расплава, м².

Обычно электроды печей располагаются в ванне по вершинам правильных многоугольников. Учитывая простые геометрические соображения, можно отметить, что при прочих равных условиях из приведенных схем печей без подовых электродов наибольшим коэффициентом заполнения обладают печи, в которых электроды расположены по вершинам правильного шестиугольника. Отметим, что такие печи могут иметь изолированную или токопроводящую подину. В ваннах печей без подовых электродов электрический ток распределяется по схемам «электрод-электрод» и/или «электрод-под-электрод» пропорционально электрическим проводимостям слоев шлака и расплава. Как правило, максимальные плотности тока и, соответственно, электромагнитные силы локализуются вблизи поверхности расплава. Тем самым, интенсивность ЭВТ может быть недостаточна для обеспечения циркуляции расплава по глубине ванны, и на подине печи могут образовываться застойные зоны, что также усиливает неравномерность распределения мощности джоулева нагрева.

Применение печей с подовыми электродами обеспечивает более равномерное выделение джоулева тепла по глубине ванны и в некоторых случаях за счет электромагнитных сил позволяет активизировать циркуляцию расплава. Имеются схемы печей с одним, двумя и тремя сводовыми электродами, которые также имеют один, два, три или четыре подовых электрода, располагаемых соответственно в центре печи, в одну линию, по вершинам равностороннего треугольника и квадрата (рисунок 2), причем оси подовых электродов могут, как совпадать, так и не совпадать с соответствующими осями сводовых электродов [8, 15].

Как показали исследования [8, 15] в печах, в которых оси сводовых и подовых электродов не совпадают, в некоторых случаях удается значительно изменить характер растекания тока, а, следовательно, и увеличить интенсивность ЭВТ.

Также существенное значение на характеристики теплообмена оказывают род, частота и форма электрического тока, протекающего в электродах и ванне печи [15, 21].

Наряду с традиционными схемами подачи только постоянного или только переменного напряжения на все электроды, в [22] предлагаются комбинированные схемы питания. В таких печах есть электроды, которые получают питание от сети переменного напряжения, и дополнительные электроды, которые питаются от источника постоянного напряжения. Подобные схемы позволяют формировать переменный ток с регулируемой постоянной составляющей, что также положительно влияет на устойчивость горения электрических дуг.

Следует также отметить, что при питании печей переменным током электромагнитное поле носит гармонический характер, поэтому силу Лоренца F_L можно разделить на стационарную и гармоническую составляющие, причем гармоническая составляющая изменяется во времени с удвоенной частотой [13]:

$$\vec{F}_L(t) = \langle \vec{F}_L \rangle + \vec{F}_L \cdot \cos(2\omega t + \varphi), \quad (9)$$

где ω – угловая частота, рад/с; φ – фаза, рад.

Однако в [13] показано, при частоте тока более 4 Гц изменение силы Лоренца настолько быстро, что расплав не в состоянии реагировать на это изменение ввиду инерции расплава. Поэтому для увеличения силы Лоренца за счет ее гармонической составляющей необходимо переходить на режимы питания током низкой частоты. Этот вывод также обосновывается в работах [8, 9, 15]. Тем самым распределение тока, Джоулева тепла, а следовательно и распределение скоростей течения расплава по

глубине ванны становится более равномерным по сравнению с питанием переменным током промышленной частоты. Предлагаемый диапазон частот 0,01-10 Гц [8, 9, 15] может определяться из условия равенства толщины скин-слоя и размера области расплава, а также по условию обеспечения МГД-резонанса.

Разновидностью переменного тока является пульсирующий (импульсный) ток, который может оказывать наиболее интенсивное воздействие на тепловое и гидродинамическое состояние ванны расплава [15, 21]. Показано [15], что при наложении пульсаций на ток дуги возникают периодически меняющихся ЭВТ, что существенно увеличивает турбулизацию расплава, его эффективную вязкость и теплопроводность.

Главным достоинством использования ЭВТ в качестве основного механизма перемешивания расплава является отсутствие необходимости применения дополнительного оборудования для его перемешивания, в отличие от индукционного способа, требующего дополнительных источников внешнего магнитного поля.

С учетом проведенного анализа нами предлагается усовершенствованная конструкция многоэлектродной печи, содержащая три подовых и три сводовых электрода, оси которых смещены друг относительно друга. Для обеспечения симметрии угол между смежными осями сводовых и подовых электродов может составлять 60° . Для энергопитания такой печи предлагается использовать преобразователи, которые обеспечивают питание, как постоянным напряжением, так и переменным напряжением с регулируемыми параметрами амплитуды, формы, фазы и частоты. Предложенные технические решения защищены патентом [23]. Один из предложенных вариантов подвода энергии к многоэлектродной печи приведен на рисунке 3.

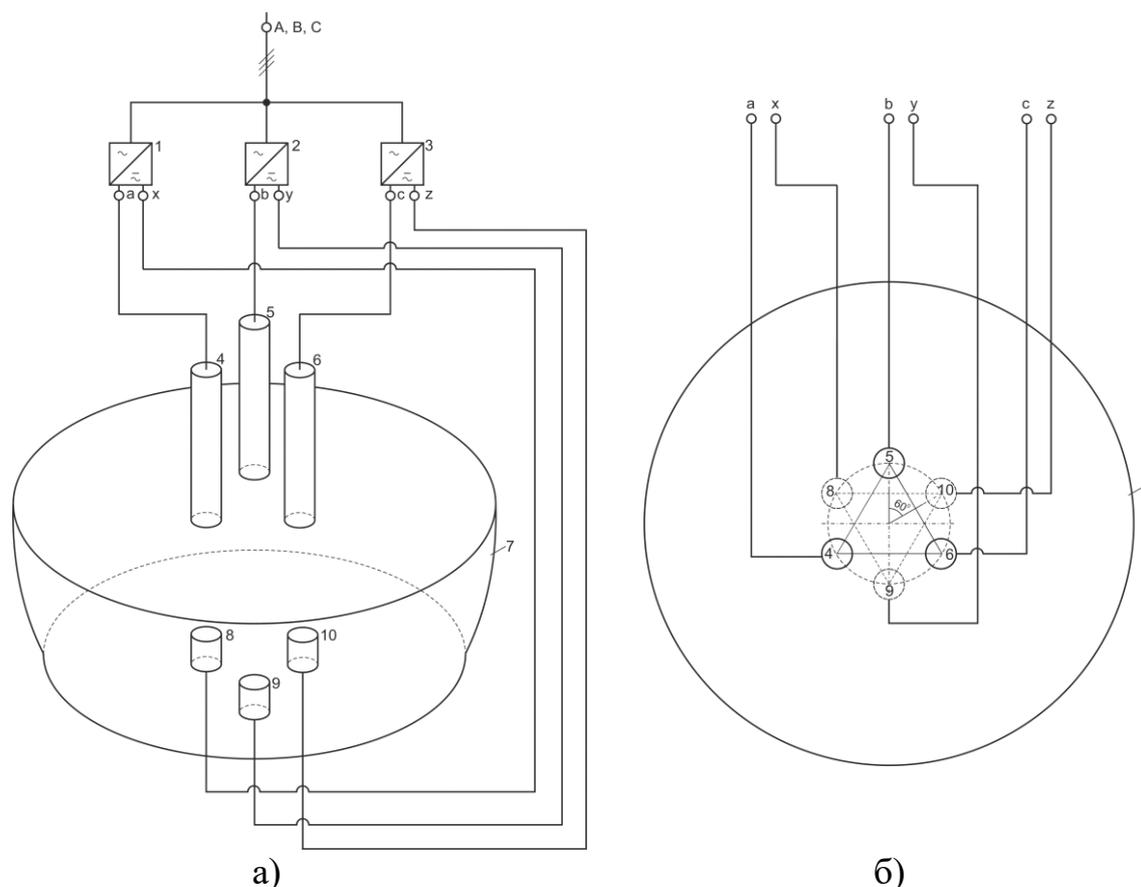


Рис.3. Шестиэлектродная печь с пофазным подключением электродов:
а) – общий вид; б) – вид сверху

Следует отметить, что в предложенной конструкции печи по сравнению с печами с соосно расположенными электродами, например, предложенными в [24], за счет смещения сводовых и подовых электродов увеличивается путь электрического тока, вследствие чего предполагается некоторое увеличение мощности джоулевого нагрева и расширение зоны циркуляции расплава за счет ЭВТ.

Таким образом, актуальным является проведение дальнейших исследований в предложенной печи, при этом планируется обеспечить следующие принципы интенсификации теплообмена:

1. Многоконтурную циркуляцию расплава по всему объему ванны, как в меридиональных, так и азимутальных плоскостях, отсутствие застойных зон, при этом перепад температур в ванне должен быть минимальным.

2. Максимальную скорость движения расплава вблизи пятна дуги для эффективного отвода тепла вглубь ванны.

3. Минимальную скорость вблизи стенок печи для предотвращения вымывания футеровки.

4. Увеличение мощности джоулевого нагрева в расплаве, обеспечивающее наиболее равномерное распределение температур.

5. Турбулентный режим движения расплава в большей части ванны для обеспечения эффективного теплообмена.

6. Возможность изменения структуры, параметров и направления ЭВТ в процессе плавки.

Отметим, что в таких исследованиях для достижения оптимальных показателей теплообмена варьируемыми показателями могут диаметр подовых электродов, расстояние между ними, а также амплитудно-временные параметры энергопитания.

Выводы. На основании анализа теплоэнергетических и конструктивных параметров современных сверхмощных дуговых печей выделены перспективные направления по интенсификации электровихревых течений и теплообмена в расплавах печей за счет совершенствования схем и параметров энергоподвода. Предложена усовершенствованная конструкция шестиэлектродной дуговой печи с тремя сводовыми и тремя подовыми электродами, энергопитание которой осуществляется от специальных преобразователей электроэнергии, обеспечивающих регулирование амплитудно-временных параметров тока и напряжения в процессе плавки. Намечены задачи и параметры оптимизации теплообмена при проведении дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sellan R. The 300-Ton “Jumbo-Size” FastArc EAF at MMK Iskenderun new Danieli Minimill Complex (Turkey) / R. Sellan, M. Fabbro // AISTech 2009 Proceedings of the Iron & Steel Technology Conference (St. Louis, Missouri, May 4 – 7, 2009).– 2009.– P. 657–666.
2. Адати Т. Сверхмощная 420-тонная электродуговая печь компании Tokyo Steel, Япония / Т. Адати, Р. Селлан // Металлургическое производство и технология.– 2012.–№ 2.– С. 8–17.
3. Odenthall H.J., A holistic CFD approach for standard and shaft-type electric arc furnaces / H.J. Odenthall, A. Kemminger¹, F. Krause¹, N. Vogl // Association for Iron & Steel Technology Conference (AIST), (Nashville, May 8 – 11, 2017). – 2017. – AISTech 2017 Proceedings.– P. 1101–1114.
4. Ramirez-Argaez M.A. Mathematical Modeling of the Melting Rate of Metallic Particles in the EAF under Multiphase Flow / M. A. Ramirez-Argaez, A.N. Conejo, M. S. López-Cornejo // ISIJ International. 2015. – Vol. 55, № 1.– P. 117–125.
5. Bowman B. Arc furnace physics / B Bowman, K. Kruger. – Dusseldorf: Stahleisen communications, 2009. – 245 p.
6. Сериков В.А. Угар металла и нагрев шихты в расплаве дуговых печей / В.А. Сериков, Р.А. Бикеев, М.В. Черидниченко, В.С. Черидниченко // Электрометаллургия.– 2015.– № 9.– С. 2–8.

7. Белковский А. Г. Современное состояние и тенденции развития технологии производства стали в ДСП и их конструкций / А. Г. Белковский, Я. Л. Кац, М. В. Краснянский // Черная металлургия.– 2013.–№ 3.– С. 72–88.
8. Mölder H. Multi-electrode arc furnace technology with improved metal processing capability using current driven mixing / H. Mölder, J. Järvi, K. Janson, R. Gordon, T. Vaimanna // Proc. 11th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC), (Venice, IEEE, May 18 – 25, 2012). – 2012. P. 313–316.
9. Нехамин С. М. Создание и внедрение энергоэффективных дуговых и шлаковых электропечных комплексов с использованием постоянного тока и тока пониженной частоты: дис.... доктора техн. наук: 05.09.10 / Нехамин Сергей Маркович – Москва, 2015. – 381 с.
10. Волченков Е. А. Моделирование особенностей электрошлакового переплава на шестиэлектродной бифилярной печи / Е. А. Волченков, А. П. Стовпченко, Л. Б. Медовар, В. Л. Петренко, Цонли Лиу, Чуанхао Янг // Современная электрометаллургия. – 2016. – № 4. – С. 3-9.
11. Ивочкин Ю.П. Исследование механизмов термогидродинамических и МГД процессов с жидкометаллическими рабочими телами: дис ... доктора техн. наук: 05.13.18 / Ивочкин Юрий Петрович.– Москва. 2015. –407 с.
12. Arzpeyma N. Mathematical modeling of scrap melting in an EAF using electromagnetic stirring / N. Arzpeyma, O. Widlund, M. Ersson, // ISIJ International. – 2013. – Vol. 53, № 1.– P. 48–55.
13. Spitan S. Numerical modeling of free surface dynamics of melt in an alternate electromagnetic field: Part I. Implementation and verification of model / S. Spitan, A. Jakovics, E. Baake, B. Nacke // Metallurgical and Materials Transactions B. – 2013. – Vol. 44B. – P. 593 – 605.
14. Недопекин Ф.В. Моделирование гидродинамических и теплофизических процессов в сталеплавильных печах постоянного тока / Ф.В. Недопекин, О.В. Казак, А.Н. Семко. – Донецк: ДонНУ, 2014. – 315 с.
15. Ячиков И.М. Математическое моделирование электровихревых течений и тепломассопереноса в токонесящих расплавах металлургических агрегатов: дис ... доктора техн. наук: 05.13.18 / Ячиков Игорь Михайлович.– Магнитогорск. 2009. –363 с.
16. Белковский А. Г. Влияние массы жидкого остатка на эксплуатационные показатели ДСП / А.Г. Белковский, Я.Л. Кац // Металлург.– 2014.–№ 11.– С. 34–40.
17. Компан Я.Ю. Электрошлаковые сварка и плавка с управляемыми МГД – процессами /Я.Ю. Компан, Э.В/ Щербинин. – М.: Машиностроение, 1989. – 272 с.
18. Shukla A.K. Cold model investigations of melting of ice in a gas-stirred vessel / A.K. Shukla, D. Ryabov, O. Volkova, P.R. Scheller // Metallurgical and materials transactions B.– 2011.– № 42 B. – P. 224–235.
19. Полежаев В.И. Математическое моделирование конвективного тепломассообмена на основе уравнений Навье-Стокса / В.И. Полежаев, А.В. Бунэ, Н.А. Везеуби др.– М: Наука, 1987 – 274 с.
20. Dilawari A.H. Heat Transfer and Fluid Flow Phenomena in Electroslag Refining / A.H. Dilawari, J. Szekely // Metallurgical and materials transactions B. – 1978.– Vol. 9B. – P. 77–88.
21. Протокилов И.В. Способы управления кристаллизацией металла при ЭСП / И.В. Протокилов, В.Б. Порохонько // Современная электрометаллургия. – 2014. – № 3 (116). – С. 7-15.
22. Пат. 2206845 РФ, МПК F27B3/08, C21C7/00. Печь- ковш / Бакуменко С. П. – № [2001118596/02](#); Заявлено 27.05.2003; Опубл. 20.06.2003.
23. Пат. 119279 Україна. МПК H05B 7/144, F27D 11/10. Система электрооживлення багатоелектродної дугової печі / Кухарев О. Л., Ковальчук А.О.– № u201700825; заявл. 30.01.2017; опубл. 25.09.2017, Бюл. № 18. – 4 с.
24. Mölder. H. A method for mixing molten metal and a compatible electric arc furnace / H. Mölder, J. Järvi, K. Janson, R. Gordon, T. Vaimanna // Estonian Journal of Engineering. - 2011. – Vol 17, Issue 3.– P. 220–240.

Поступила в редакцию 07.05.2018 г.

PRINCIPLES OF INCREASING INTENSITY HEAT EXCHANGE IN LIQUIDS ENVIRONMENTS OF ARC MULTI-ELECTRODE FURNACE

A.L. Kukharev, V.V. Bilousov

The analysis of heat-energy and design parameters of modern ultrahigh power arc furnaces is carried out, perspective directions on intensification of heat and mass transfer in the melt are identified due to the improvement of the schemes and parameters of the power supply. The construction of a six-electrode arc furnace with three arched and three bottom electrodes is proposed. Power supply of the furnace is carried out from

special voltage converters, providing output, both direct voltage and alternating voltage with adjustable parameters of amplitude, shape, phase and frequency. The tasks and parameters of heat and mass transfer optimization during further research are outlined.

Keywords: arc furnace; electrode; electrovortex flow; heat and mass transfer.

Белоусов Вячеслав Владимирович

доктор технических наук, профессор
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
(г. Донецк)
E-mail: v.v.bilousov@gmail.com
Тел.: (0622) 302-07-58

Bilousov Vyacheslav Vladimirovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor
Donetsk National University,
Donetsk

Кухарев Алексей Леонидович

канд. техн. наук, доцент,
Стахановский учебно-научный институт
Луганского национального университета им.
Владимира Даля,
г. Стаханов
e-mail: alex.kuharev@mail.ru
Тел.: (072) 140-00-33

Kukharev Alexey Leonidovich

candidate of science, associate professor
Stakhanov educational and scientific institute of
Lugansk National University named after Vladimir
Dal,
Stakhanov

ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ СТРОИТЕЛЬСТВА И ГОРОДСКОГО ХОЗЯЙСТВА

УДК 669.162

ПОДАВЛЕНИЕ ВЫБРОСОВ БУРОГО ДЫМА ПРИ ПЕРЕЛИВАХ ЧУГУНА АЗОТНО-ВОДНЫМ АЭРОЗОЛЕМ

© 2018 *В.В.Белоусов, В.В.Бодряга, Ф.В.Недопекин*

Рассматривается подавление выбросов бурого дыма при переливах чугуна с помощью нейтрального газа, получаемого на металлургических предприятиях блоками разделения воздуха. Установлено, что добавка в струю азота незначительного количества распыленной воды позволяет повысить степень пылеподавления в условиях недостаточного производства азота. Полученная зависимость степени пылеподавления экспериментально проверена в конвертерном цехе металлургического комбината «Азовсталь».

Ключевые слова: бурый дым, пылеподавление, азотно-водный аэрозоль, переливы чугуна

Введение. Одна из важных экологических проблем человечества – загрязнение земной атмосферы. При этом следует отметить, что 10-15% всех выбросов приходится на долю металлургии. Самый загрязненный участок сталеплавильного производства – конвертерный цех. Источниками неорганизованных выбросов в конвертерном производстве являются процессы заливки чугуна из миксера в ковш и его перелива из ковша в конвертер, загруженный металлическим ломом (рис. 1). Выполнение данной технологической операции сопровождается образованием и выделением огромного количества пыли и газов. Основные составляющие пыли – графитная спель (около 5%) и бурый дым (около 90%) [1-3]. Часть этих выбросов удаляется из цеха, а часть оседает на металлоконструкциях.

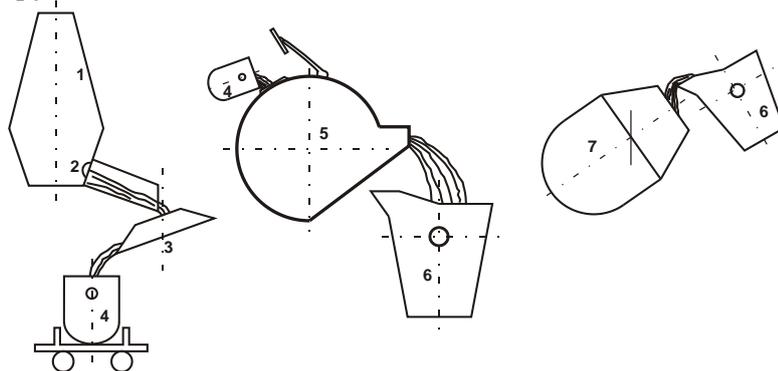


Рис. 1. Переливы чугуна в технологии металлургического производства: 1-доменная печь; 2-лётка; 3-качающийся желоб; 4-доменный ковш; 5-миксер; 6-конвертерный ковш; 7-конвертер

Непосредственной причиной образования бурого дыма является взаимодействие мелких капель чугуна с кислородом газовой фазы [4]. Эффективным решением, данной проблемы, является создание в зоне диспергирования струи чугуна атмосферы с пониженным содержанием кислорода с целью предотвратить окисление брызг металла и подавить, таким образом, образование бурого дыма [1, 2].

Постановка задачи. В связи с тем, что основная доля бурого дыма, образующегося при сталеплавильном процессе, не улавливается очистными сооружениями, возникает повсеместное загрязнение окружающей среды. Снижение выбросов бурого дыма при переливах чугуна можно достичь, уменьшая концентрацию кислорода в газовой фазе. Применение пылеподавления азотом обеспечивает снижение выбросов бурого дыма на 80-85% при расходе азота до 10000 м³/ч. Дальнейшее увеличение степени пылеподавления требует резкого возрастания расхода нейтрального газа, что технически нецелесообразно.

Кислородные цеха большинства металлургических заводов оборудованы маломощными компрессорами, обеспечивающими расход азота до 5000 м³/ч, что соответствует 20-25% азота, вырабатываемого блоками разделения воздуха.

При внедрении подавления бурого дыма на таких заводах, а также при необходимости достижения степени пылеподавления более 0,85 требуются специальные мероприятия по снижению расхода азота. Этого можно достичь, подачей в зону дымообразования азотно-водного аэрозоля. Эффективность подавления бурого дыма повысится, если в газообразный азот добавлять небольшое количество воды. Это позволит достичь более высокой степени пылеподавления при меньших расходах азота.

Пылеподавление азотно-водным аэрозолем. Связь между степенью пылеподавления и управляемыми технологическими и конструктивными параметрами: расходом нейтрального газа, числом сопел, их диаметром и расстоянием до поверхности металла [5].

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{0,25Q^2}{w_{кр}^2 n^2 (0,085S_c d_c + 0,145d_c^2)^2} - \frac{0,81Q}{w_{кр} n (0,085S_c d_c + 0,145d_c^2)} + 1 \right) \times \exp \left(\frac{1}{21,655 - \frac{0,04618 - 0,016 \frac{Q}{V}}{V}} \right) \times \frac{1}{\sqrt{1 - 0,347 \frac{Q}{V}}} \quad (1)$$

Предположим, что в струю азота введено некоторое количество мелких водяных брызг. Образовавшийся аэрозоль будет подаваться в зону пылеобразования к поверхности жидкого чугуна, где капли воды, испаряясь, резко увеличиваются в объёме. Предполагая, что в условиях миксерного отделения водяной пар не взаимодействует с чугуном и, следовательно, является нейтральной средой, можно заключить, что подача воды в виде аэрозоля равносильна увеличению количества нейтрального газа.

Жидкость при испарении увеличивается в объёме

$$V_n / V_{ж} = P_{ж} / \mu \cdot 22,4 \cdot T / 273, \quad (2)$$

где V_n и $V_{ж}$ – расход пара и жидкости, соответственно, м³/с; $\rho_{ж}$ – плотность жидкости, кг/м³; μ – молекулярная масса, кг/кмоль; T – температура нагрева паров, К; 22,4 – объём одного кмолья газа, м³/кмоль; 273 – температура жидкости, К.

Подставляя численные значения для воды: $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$; $\mu = 18$; $T = 473 \text{ К}$, получим $V_n = 2150 V_{ж}$.

Подставив полученную величину в (1) получим, для случая применения азотно-водного аэрозоля, (когда вода распыляется струёй азота и ею же транспортируется в зону пылеподавления)

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{0,25Q^2}{w_{кр}^2 n^2 (0,085S_c d_c + 0,145d_c^2)^2} - \frac{0,81Q}{w_{кр} n (0,085S_c d_c + 0,145d_c^2)} + 1 \right) \times \exp \left(\frac{21,655 - \frac{1}{0,04618 - 0,015 \frac{Q + 2150V_{эс}}{V}}}{\sqrt{1 - 0,34 \frac{Q + 2150V_{эс}}{V}}} \right) \quad (3)$$

Как следует из выражения (3) добавление в струю азота распылённой воды должно повышать степень пылеподавления.

Установка пылеподавления азотно-водным аэрозолем при сливе чугуна из миксера в ковш. Азот при сливе чугуна из миксера подаётся через стационарные сопла, укреплённые над ковшом. Нижний срез сопла расположен над верхней кромкой ковша. Сопла при помощи фланцевого соединения крепятся к коллектору диаметром 159 мм, который расположен с внешней стороны зонта аспирационной системы. Вода подается непосредственно в сопла, через которые подается азот, вода диспергируется за счет струи нейтрального газа. Водопровод смонтирован с измерительной диафрагмой, вентилями и клапанами, средства КИП и дистанционного управления. Концы сопел наклонены внутрь ковша под углом 30° к горизонту. В плане концы сопел заходят внутрь ковша. Расположение сопел показано на рис. 2.

Сопла изготавливаются из стальной трубы диаметром 108 мм, но концы сопел имеют расширение, выходное сечение сопел равно 150 мм. Расширенный участок сопла, расположенный в непосредственной близости от ковша рекомендуется изготавливать из меди (толщина стенки 3-5 мм), что предотвращает образование на концах сопел шлакометаллических настывлей. Сопла соединяются с коллектором фланцевым соединением, обеспечивающим возможность поворота сопел вокруг вертикальной оси, что облегчает их монтаж, демонтаж и наладочные работы. С этой целью со стороны коллектора устанавливается свободный фланец на приварном кольце.

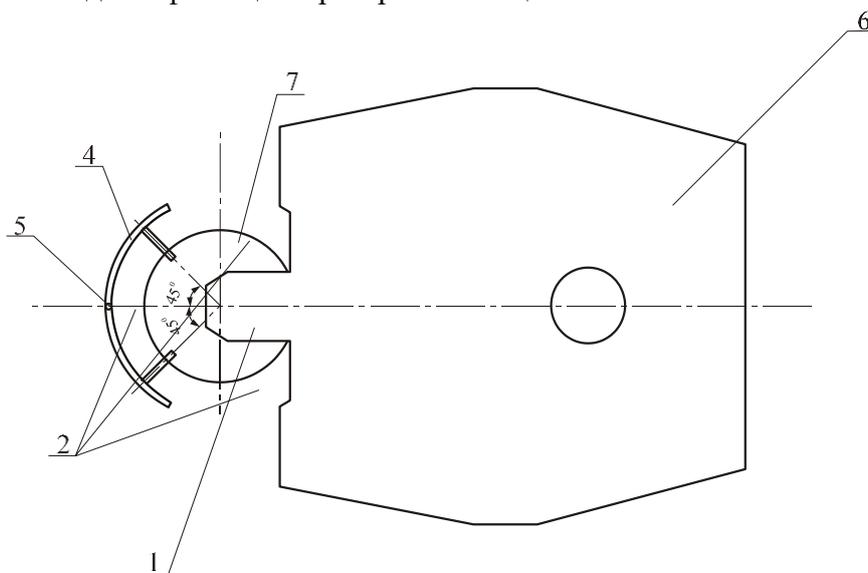


Рис. 2. Схема расположения двух сопел над ковшом вид сверху: 1-носок миксера; 2-сопла; 3-фланцевое соединение; 4-коллектор; 5-подвод азота к коллектору; 6-миксер; 7-ковш

Проверка сделанных выводов производилась совместно с УкрИНТЭК в промышленных условиях в миксерном отделении металлургического комбината «Азовсталь» при сливе чугуна из миксера в 350-тонный ковш. Для создания азотно-водного аэрозоля использовались специальные сопла, в которых разбрызгивание воды производилось за счёт энергии струи азота. Подача аэрозоля производилась через два сопла, расположенных так же, как и сопла для подачи азота (на высоте 0,5 м над кромкой ковша, под углом 30^0 к горизонту, направлены к вертикальной оси ковша), и имевших диаметр выходного сечения 150 мм. Выражение (3) для этого случая примет вид

$$\varepsilon = 1 - (0,753Q^2 - 1,41Q + 1) \frac{\exp\left(21,655 - \frac{1}{0,04618 - 0,001(Q + 2150V_{жс})}\right)}{\sqrt{1 - 0,02(Q + 2150V_{жс})}}. \quad (4)$$

В таблице приведены результаты расчёта по формуле (4) и экспериментальные данные.

Как видно из таблицы, фактическая степень пылеподавления несколько превысила расчётную величину, что говорит о том, что расчёт выполнен с некоторым запасом. Возможной причиной неожиданно высокой эффективности азотно-водного аэрозоля является то, что добавка воды, увеличивая импульс струи, способствует возникновению эффекта аэродинамической завесы, когда струя газа не просто вытесняет воздух из объёма ковша, а и, кроме того, активно препятствует его поступлению в ковш, «отсекая» потоки свежего воздуха от зоны дымообразования. Однако учесть это явление в расчёте достаточно сложно.

Таблица. Результаты испытания способа пылеподавления азотно-водным аэрозолем при сливе чугуна из 2500-тонного миксера в 350-тонный ковш

Расход азота, м ³ /ч	Расход воды, м ³ /с	Расчётная степень пылеподавления	Фактическая степень пылеподавления	Число опытов
4500	$0,55 \cdot 10^{-3}$	0,872	$0,936 \pm 0,0122$	5
5000	$0,55 \cdot 10^{-3}$	0,860	$0,925 \pm 0,011$	4

Как видно из таблицы, фактическая степень пылеподавления несколько превысила расчётную величину, что говорит о том, что расчёт выполнен с некоторым запасом. Возможной причиной неожиданно высокой эффективности азотно-водного аэрозоля является то, что добавка воды, увеличивая импульс струи, способствует возникновению эффекта аэродинамической завесы, когда струя газа не просто вытесняет воздух из объёма ковша, а и, кроме того, активно препятствует его поступлению в ковш, «отсекая» потоки свежего воздуха от зоны дымообразования.

Выводы. Установлено, что добавка в нейтральный газ незначительного количества распылённой воды повышает степень пылеподавления и снижает расход нейтрального газа.

Применение азотно-водного аэрозоля позволяет повысить степень пылеподавления при сокращении расхода азота. Это делает возможным внедрение технологии пылеподавления на большинстве заводов, поскольку незначительные количества отбросного азота, являющегося побочным продуктом производства кислорода методом разделения воздуха в кислородных цехах, имеются практически на каждом металлургическом предприятии.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Недопёкин Ф.В. Исследование экологической проблемы образования бурого дыма / Ф.В.Недопёкин, В.А.Кравец, В.В.Бодряга и др. // *Металлургическая теплотехника. Сборник научных трудов.* – Днепропетровск: Пороги, 2004. – С. 221-229.
2. Недопёкин Ф.В. Процессы теплопереноса в брызгах чугуна, приводящих к образованию бурого дыма / Ф.В. Недопёкин, В.А. Кравец, В.В. Бодряга// – *Вестник Донецкого университета, сер.А. Естественные науки, №1, 2002, Вып. 2.* – С.270-275.
3. Недопёкин Ф.В. Исследование влияния аэродинамики струи азота на процессы коагуляции и диспергирования капель / Ф.В. Недопёкин, В.А. Кравец, В.В. Бодряга// – *Прикладні проблеми аерогідромеханіки та тепломасопереносу: Матеріали міжнародної конференції – Дніпропетровськ, ДНУ 2008.* – С. 80-84.
4. Бодряга В.В. Экспериментальное исследование параметров выбросов при сливе чугуна из миксера в ковш на мк «АЗОВСТАЛЬ» /В.В. Бодряга, В.А. Кравец, Ф.В. Недопёкин// *Известия ВУЗов. Черная металлургия.* – 2012. – №11. – С. 3-5.
5. Бодряга В.В. Разработка методики улучшения экологической обстановки при переливах чугуна в миксерном отделении МК им. Ильича / В.В. Бодряга, Ф.В. Недопёкин, В.А. Кравец, В.В. Белоусов // *Проблеми екології.* – 2013. – №1 (31). – С. 73-78.

Поступила в редакцию 28.04.2018 г.

SUPPRESSION OF A RED FUME EMISSIONS AT PIG IRON OVERFLOW BY NITROGEN-WATER AEROSOL

V.Bilousov, V.Bodryaga, F.Nedopekin

The suppression of red fume emissions during pig iron overflows using neutral gas obtained at metallurgical plants by air separation units is considered. The addition of a small amount of atomized water to the jet of nitrogen makes it possible to increase the degree of dust suppression in conditions of insufficient production of nitrogen is established. Dependence of the degree of dust suppression on the consumption of nitrogen-water aerosol was experimentally tested at the Azovstal Iron and Steel Works.

Key words: red fume, dust suppression, nitrogen-water aerosol, pig iron overflows.

Белоусов Вячеслав Владимирович, проф., д-р техн. наук, зав. кафедрой физики неравновесных процессов, экологии и метрологии Донецкого национального университета
Адрес для переписки: 83001, Донецк, ул. Челюскинцев 148/59,
E-mail: v.v.bilousov@gmail.com

Bilousov Vyacheslav Vladimirovich, Prof., Head. Department of Physics nonequilibrium processes, metrology and ecology of Donetsk national university

Бодряга Виктор Викторович, старший преподаватель кафедры «Компьютерных технологий» Донецкого национального университета

Bodryaga Viktor Viktorovich, senior lecturer of the department Computer technologies of Donetsk National University

Недопёкин Федор Викторович, профессор кафедры физики неравновесных процессов, метрологии и экологии Донецкого национального университета

Nedopekin Fedor Voktorovich, Professor of the Department of Physics of nonequilibrium processes, metrology and ecology of Donetsk National University

УДК 541.13

ЭКОЛОГИЧЕСКИ ЧИСТЫЙ ЭЛЕКТРОЛИТ НА ОСНОВЕ МАЛЕИНОВОЙ КИСЛОТЫ ДЛЯ ПЕРЕРАБОТКИ ОТРАБОТАННЫХ СВИНЦОВО-КИСЛОТНЫХ АККУМУЛЯТОРОВ

© 2018 *А.И.Сердюк, М.В. Назарова*

В работе исследовано изменение допустимой плотности тока с повышением концентрации соли свинца в электролите состоящим из малеиновой кислоты, свинцовой соли малеиновой кислоты и с добавлением неионогенного (техническая желатина) ПАВ в концентрации 1 г/л. Для эксперимента использовался электролит без поверхностно-активных веществ (ПАВ) и с добавлением ПАВ. Концентрация соли свинца изменялась в диапазоне 20 – 160 г/л, концентрация малеиновой кислоты составляла 30 г/л. Таким образом, повысив концентрацию соли свинца в составе малеинового электролита удастся увеличить скорость процесса выделения свинца из раствора в 8 -9 раз. Установлено, что добавка ПАВ – желатины повышает рабочую плотность тока и скорость процесса в 2 раза.

Ключевые слова: свинцово-кислотные аккумуляторы; электролит; малеиновая кислота; соединения свинца; ПАВ, ячейка Хулла.

Мировое производство свинца превышает 8 миллионов тонн в год, причем 60 % товарного металла получают из вторичного свинецсодержащего сырья. Его основную массу составляют выработавшие свой ресурс аккумуляторы, представляющие собой опасный источник загрязнения окружающей среды [1].

Существует способ переработки черного свинца пирометаллургическим методом. Пирометаллургическая схема производства свинца многостадийна и сложна, легкоплавкий свинец по этой схеме получается процессами, протекающими при высокой температуре. Кроме того, пирометаллургическое производство приводит к большим выбросам в атмосферу соединений свинца, диоксида серы (за счет электролита) и формальдегида (за счет корпусов аккумуляторов). Также этот метод требует больших затрат энергии [2,3].

Более перспективным является электрохимический метод [4,5]. С экологической и технологической точек зрения электрохимические технологии обладают рядом преимуществ по сравнению с пирометаллургическими. Преимуществами электрохимического метода переработки является то, что процесс ведется при умеренных температурах и атмосферном давлении и на конечной стадии получается металл достаточно высокой степени чистоты, а так же оказывает меньшую нагрузку на окружающую среду.

Известно, что для переработки отработанных свинцово-кислотных аккумуляторов электрохимическим путем могут быть использованы различные электролиты, на данный момент в основном используют такие электролиты как, фторборатные и кремнийфторидные. Но эти электролиты дают токсичные выбросы в атмосферу соединений фтора и свинца.

Выбор электролита для переработки свинецсодержащих компонентов аккумуляторов ограничен растворимостью соединений свинца, входящих в их состав.

Сравнительная характеристика параметров электролитов для электрорафинирования свинца и электрохимической переработки свинцово-кислотных аккумуляторов приведена в таблице 1.

Таблица 1. Сравнительная характеристика электролитов для электрорафинирования свинца и электрохимической переработки свинцово-кислотных аккумуляторов

Наименование электролита	Параметры			
	Т °С	Катодная плотность тока, А/м ²	Выход металла по току, %	ПДК сс, мг/м ³
Кремнефтористоводородный	18-23	100-200	97	0,02
Борфтористоводородный	15-25	100-300	97	0,1
Фенолсульфоновый	40-50	400-600	90-95	0,3
Раствор гидротартрата натрия и гидроксида натрия	18-25	50-150	99,2	0,5
Сульфаматный	24-50	10-13,5	100	2
Сульфаминовый	30	120-140	96-97	2
Водный нитратный раствор	20-25	450-480	98,5-99	5
Перхлоратный	18-25	10-15	95	5
Малеиновый	15-25	50-150	98,9	5

В качестве добавок повышающих скорость выделения свинца из раствора могут применяться различные ПАВ: неионогенные (желатина, полиакриламид (ПАА), полиэтиленоксид (ПЭО), столярный клей, тритон Х-100); аниоактивные (додецилсульфат натрия, пентадецилсульфат натрия); катиоактивное (цетилпиридиний бромид)[6].

Анализируя значения ПДК загрязняющих веществ в воздухе приведенные в таблице 1[7], видно, что электролит на основе малеиновой кислоты является малотоксичным электролитом.

Установлен ряд преимуществ, а так же недостатков используемых электролитов для переработки свинцово-кислотных аккумуляторов. Достоинства и недостатки электролитов представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Достоинства и недостатки электролитов используемых для переработки свинцово-кислотных аккумуляторов

Электролит	Достоинства	Недостатки
1	2	3
Фенолсульфоновый	Не дефицитен, не требует установки дорогих вентиляционных устройств, транспортировка сырья удобнее, его стоимость значительно ниже, чем для борфтористоводородных электролитов, а так же он более экологически чистый, чем кремнийфтористоводородный и борфтористоводородный электролиты. Стабилен в эксплуатации и легко поддается корректировке.	Для получения покрытий с пониженным содержанием олова рекомендуется вводить в электролит парафенолсульфоновую кислоту
Борфтористоводородный	Отличаются высокой стабильностью, мелкокристаллическими, хорошо сцепленными с основой осадками непосредственно на стали	Выделяет токсичные пары

Продолжение таблицы 2

Кремнийфтористоводородный	Обладает достаточно хорошей электропроводностью	Частично разлагается с выделением токсичного и коррозионно активного HF.
Малеиновый	Экологически чистый электролит; Снижение затрат на приготовление электролита; Практически полная утилизация свинца из отработанных свинцовых аккумуляторов.	Низкая скорость осаждения

Для исследования использован электролит на основе нетоксичной малеиновой кислоты.

Кислота малеиновая — органическое соединение, полученное впервые в результате перегонки яблочной кислоты. В наше время вещество получают искусственно гидролизом одноименного ангидрида [8]. Малеиновая кислота является более дешевым продуктом, чем борфтористоводородная и кремнийфтористоводородная кислоты.

Однако данный электролит имеет небольшую скорость выделения свинца.

Целью данной работы является исследование влияния концентрации соли свинца в малеиновом электролите и ПАВ на предельно допустимую плотность тока и повышение скорости выделения свинца из электролита.

При проведении электролиза, в качестве электролита использовали водный раствор, состоящий из малеиновой кислоты с концентрацией 30 г/л, свинцовой соли малеиновой кислоты с концентрацией 20 – 160 г/л. В качестве поверхностно-активного вещества применяли желатину с концентрацией 1,0 г/л, а так же проводили анализ без ПАВ. Температура электролита – 25 °С. В качестве анода использовали специально обработанную ячейку отработанного аккумулятора. Катодом служила свинцовая пластинка.

Для определения предельно допустимой плотности тока электролита на основе малеиновой кислоты использовали электрохимическую угловую ячейку Хулла емкостью 267 мл и углом катода по отношению к аноду 51°. Катодом служила плоская пластина размером 100 на 70 мм толщиной 0,5 - 2 мм из свинца. Подготовка поверхности катода перед электроосаждением стандартная - обезжиривание, активация в 30%-ном растворе HCl, промывка. В качестве анода используется пластина размером 60 на 70 мм толщиной 2 - 3 мм из соответствующего процессу анодного материала.

При электроосаждении в такой ячейке при средней катодной плотности тока 20 А/м² на катодной пластине реализуются плотности тока от 1 А/м² (дальний от анода участок) до 80 - 90 А/м² (ближний к аноду участок).

После осаждения покрытия пластина тщательно промывается проточной водой, высушивается и подвергается визуальному осмотру.

Формула, для расчета допустимой плотности тока, исходя из параметров ячейки Хулла, приведена ниже.

$$i_k = I \cdot 3,3 \cdot \left[I - 0,434 \cdot \ln \left[\left(\frac{x}{10} \right) \right] \right],$$

где I – заданная сила тока; x – длина пластины с качественным покрытием

В таблице 3 показана зависимость выхода по току от плотности тока.

Таблица 3. Зависимость выхода по току от плотности тока

Плотность тока i , А/м ²	Выход по току ВТ, %
50	98,9
100	98,2
150	96,8
200	76,4
300	43,1

В работе было изучено изменение допустимой плотности тока с повышением концентрации соли свинца в электролите. Для эксперимента использовался электролит без поверхностно-активных веществ (ПАВ) и с добавлением неионогенного (техническая желатина) Концентрация соли свинца изменялась в диапазоне 20–160 г/л, концентрация малеиновой кислоты составляла 30 г/л.

Электролит для определения параметров реакций растворения аккумуляторных пластин и осаждения свинца во избежание мешающих влияний примесей, присутствующих в аккумуляторном шламе, готовился согласно методикам [9]. Анализ электролита на содержание в нем свинца проводили комплексонометрическим методом [10]. Определение концентрации малеиновой кислоты в электролите производилось методом титрования [11].

Зависимость допустимой плотности тока от концентрации свинца в электролите без ПАВ и с добавлением поверхностно-активных веществ представлена на рисунке 1 (здесь и далее C_{Pb} – концентрация малеиновокислого свинца).

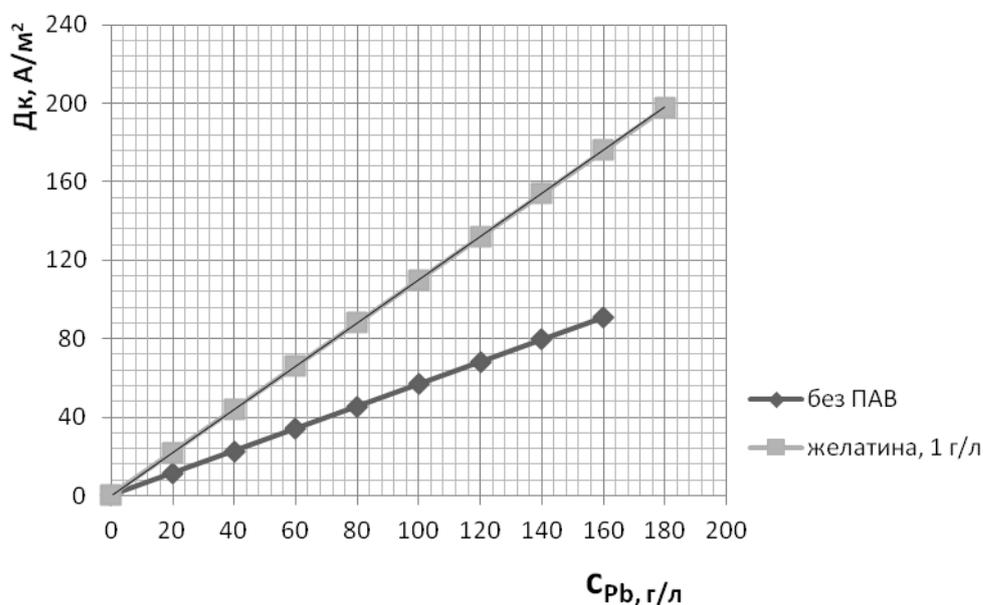


Рис. 1. Зависимость допустимой плотности тока (D_k) от концентрации соли свинца в электролите (C_{Pb})

Из рисунка 1 видно, что значительный рост допустимой катодной плотности тока (в 8 раз) наблюдается в электролите при повышении концентрации свинца в от 20 до 160 г/л.

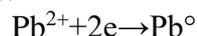
Зависимость допустимой плотности тока от концентрации соли свинца описывается уравнением:

$$D_k = 0,57 \cdot C_{Pb}$$

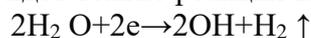
Введение ПАВ (желатины) приводит к более резкому увеличению допустимой катодной плотности тока и описывается уравнением:

$$D_k = 1,1 \cdot C_{Pb}$$

При низких плотностях тока меньших предельно допустимых идет процесс восстановления ионов свинца на катоде:



При проведении электролиза при плотности тока 50-150 А/м² выход по току свинца превышает 90%. При плотности тока больших предельно допустимых выходы по току свинца снижаются (Таблица 3). Увеличение плотности тока приводит к параллельному протеканию реакции восстановления свинца и выделения водорода, а при плотности тока более 300 А/м² идет только реакция выделения водорода:



При плотности тока меньше 50 А/м² производительность процесса низкая. Электролиз проводили в электролизере объемом 1 л. В качестве анода использовали решетки отработанного аккумулятора, в качестве катода пластинку из чистого свинца. В состав электролита входят малеиновая кислота, ионы свинца.

Схема проведения процесса переработки свинцово-кислотных аккумуляторов приведена на схеме рисунка 2.



Рис. 2. Схема проведения процесса переработки свинцово-кислотных аккумуляторов

Как выяснилось в результате экспериментов, фактическая, или рабочая плотность тока должна быть ниже допустимой, установленной по ячейке Хула, и составляет около 80 % от допустимой, что совпадает с результатами других исследователей [12].

Таким образом, повысив концентрацию соли свинца в составе малеинового электролита удастся увеличить скорость процесса выделения свинца из раствора в 8 -9 раз. Добавка ПАВ – желатины повышает рабочую плотность тока и скорость процесса

в 2 раза. То есть, применение электролита на основе малеиновой кислоты снизит нагрузку на окружающую среду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Потребление свинца на мировом рынке сокращается // Металлинформ. – 2004. – № 1-2 (32-33). – С. 11.
2. Супрун В.И. Проблемы вторичного свинца / В.И.Супрун // Вторичные металлы. – 2010. – № 4. – С.39-43.
3. Коротич В.И. Начала металлургии: Учебник для вузов / В.И.Коротич, С.С.Набойченко, А.И.Сотников и др. // Под ред. В. И. Коротича. – Екатеринбург: УГТУ, 2000. – 392 с.
4. M. Maja, N. Penazzi, M. Baundino, M. Ginatta. Recycling of the lead-acid. batteries: the Ginatta process. Journal of Power Sources .1990. V.31, pp. 287–294.
5. Дикусар А.И. Основы электрохимии и электрохимических технологий. Учеб. пособие / А.И.Дикусар, Ж.И. Бабанова, С.П. Ющенко. – Тирасполь: Изд-во ун-та, 2005. – 187 с.
6. Якимчук Д.П. Влияние ПАВ на процессы электрохимического осаждения свинца / Д.П.Якимчук, А.И.Сердюк, Н.Н.Червонцева // Проблемы экологии. – 1999. – № 2. – С. 36-41.
7. Предельно допустимые концентрации (ПДК) загрязняющих веществ в атмосферном воздухе городских и сельских поселений [Текст]:ГН 2.1.6. 3492 – 17/ Введ. 22. 12.2017. М.: Глав. государ. сан. врач РФ, 2017. 268 с.
8. Травень В.Ф. Органическая химия / В.Ф. Травень. – Том 1. – М.: Академкнига, 2004. – 708 с.
9. Ильин В.А. Цинкование, кадмирование, оловянирование и свинцевание / В.А.Ильин. – Л.: Машиностроение, 1983. – 87 с.
10. Котик Ф.И. Ускоренный контроль электролитов, растворов и расплавов / Ф.И.Котик. – М.: Машиностроение, 1978. – 190 с.
11. Сусленикова В.М. Руководство по приготовлению титрованных растворов / В.М.Сусленикова, С.Н.Киселева. – М.: Химия, 1978. – С. 149-153.
12. Schmidt Cordt. Struktur und Eigenschaften von Kupferschichten bei der Abscheidung mit hohen stromdichten // Galvanotechnik. – 1991. – 82, № 11. – P. 3800-3828.

Поступила в редакцию 04.05.2018 г.

ECOLOGICALLY CLEAN ELECTROLYTE BASED ON MALEIC ACID FOR RECYCLING OF USED LEAD-ACID BATTERIES

A.I.Serdyuk, M.V. Nazarova

The paper investigates change in the permissible current density with an increase in the concentration of lead salt in the electrolyte consisting of maleic acid, lead salt of maleic acid and with the addition of nonionic (technical gelatin) surfactant at a concentration of 1 g / l. For the experiment, an electrolyte without surfactants (surfactants) and with the addition of surfactants was used. The concentration of lead salt varied from 20-160 g / l, the concentration of maleic acid was 30 g / l. Thus, by increasing the concentration of lead salt in the maleic electrolyte, it is possible to increase the rate of separation of lead from the solution by 8-9 times. It is established that the addition of surfactants - gelatins increases the working current density and the process speed by 2 times.

Key words: lead-acid batteries; electrolyte; maleic acid; lead compounds; Surfactant, Hull's cell

Сердюк Александр Иванович, д.х.н. профессор
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»

Serdyuk Alexandr Ivanovich, Ph.D. Professor
Donbas National Academy of Civil Engineering and
Architecture

Назарова Мария Витальевна, студентка
ГОУ ВПО «Донбасская национальная академия
строительства и архитектуры»

Nazarova Maria Vitalevna, student
Donbas National Academy of Civil Engineering and
Architecture

nazarovamv123@gmail.com
ecoalserdiuk@rambler.ru

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Для публикации в журнале «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимаются ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные работы, содержащие новые результаты теоретических и экспериментальных исследований в области технических наук. Авторы научных статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за сам факт их публикации. Решение о публикации принимается редакционной коллегией журнала после рецензирования, учитывая научную значимость и актуальность представленных материалов. Если рецензия положительна, но содержит замечания и пожелания, редакция направляет статьи авторам на доработку вместе с замечаниями рецензента. Автор должен ответить рецензенту по всем пунктам рецензии. После такой доработки редколлегия принимает решение о публикации статьи. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензии или выдержки из них, либо аргументированное письмо редактора. Редколлегия не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения. В случае отказа в публикации статей редколлегия не возвращает автору рукопись статьи. Статья, задержанная на срок более трех месяцев или требующая повторной переработки, рассматривается как вновь поступившая. Гонорар авторам не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.

2. Рукопись предоставляется в одном экземпляре (на русском или английском языках), 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 редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Рукописи, не соответствующие редакционным требованиям, и статьи, не соответствующие тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Редакция оставляет за собой право проводить редакционную правку рукописей. Корректур статей авторам не высылаются.

3. Обязательные требования к оформлению статей:

- **Размер бумаги:** А4.
- **Ориентация:** книжная.
- **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
- **Междустрочный 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, таблицы, подрисуночные подписи, список литературы, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.

4. 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 *инициалы и фамилия(и) 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 либо точкой с запятой. Аннотацию и ключевые слова рекомендуется отделять 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** – полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее со следующей строки 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, *инициалы и фамилия(и) автора(ов)*, аннотация, *ключевые слова* на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языке) указываются сведения об авторах:
 - **Фамилия, имя, отчество;**
 - ученая степень и звание, должность, с указанием организации (полное название, в именительном падеже), которую представляет автор;
 - страна, город;
 - адрес электронной почты.

5. Образец оформления статьи:

УДК 537.86

ФУНКЦИИ СЛОЖНОСТИ ДЛЯ ВЫДЕЛЕНИЯ И РАСПОЗНАВАНИЯ ХАРАКТЕРНЫХ УЧАСТКОВ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ КРИВЫХ

© 2017 *И.А. Третьяков, В.В. Данилов*

В настоящей работе описан этап идентификации участков, которые содержат информацию на кривой, рассмотрена методика сегментации для обработки экспериментальных кривых, предложены несколько видов функции сложности.

Ключевые слова: функция сложности; сегментация; экспериментальные кривые; лингвистический подход.

Введение. При проведении исследований различных физических явлений...

Постановка задачи. Экспериментальные кривые – один из способов представления результатов...

Этап сегментации. Сегментация экспериментальных кривых или...

Выводы. В данной работе рассмотрена методика ...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Осадчая И.А. Методы исследования структуры многомерных экспериментальных данных / И.А. Осадчая, О.Г. Берестнева // Научное обозрение. Технические науки. – 2014. – № 2. – С. 91-92.
2. Пестунов И.А. Алгоритмы кластеризации в задачах сегментации спутниковых изображений / И.А. Пестунов, Ю.Н. Синявский // Вестник КемГУ. – 2012. – №2. – С. 110-125.

Поступила в редакцию xx.xx.20xx г.

FUNCTIONS OF COMPLEXITY FOR ALLOCATION AND RECOGNITION OF CHARACTERISTIC SITES OF EXPERIMENTAL CURVES

Tretiakov I., Danilov V.

In the paper the stage of identification of sites which contain information on a curve is described, the segmentation technique for processing of experimental curves is considered, several types of function of complexity are offered.

Keywords: complexity function; segmentation; experimental curves; linguistic approach.

Третьяков Игорь Александрович

ассистент кафедры радиопластики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: es75i@mail.ru

Tretiakov Igor

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

Данилов Владимир Васильевич

доктор технических наук, профессор, проректор по научной и инновационной деятельности, ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: ut5iv@mail.ru

Danilov Vladimir

Doctor of Engineering Sciences, Full Professor, Vice-Rector of Research and Innovation Activity Donetsk National University,
DPR, Donetsk.

6. 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. Необходимо следить за тем, чтобы после возможного уменьшения до размера 80 мм высота букв и цифр на рисунке оставалась не менее 2 мм. Каждый рисунок должен иметь подрисуючную подпись (не совмещенную с рисунком) в формате: Рис. №. Название. Каждая таблица должна иметь заглавие (выравнивание – по центру) 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 - подрисуючная подпись). Все рисунки и таблицы должны быть последовательно пронумерованы арабскими цифрами. Сканированные рисунки не принимаются. Образец оформления рисунка и таблицы:

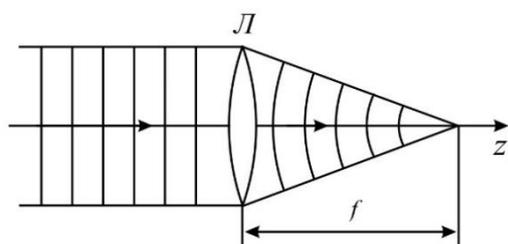


Рис. 4. Действие линзы на плоскую волну

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	39	кОм

7. Формулы выравниваются по центру и имеют, при необходимости, сквозную нумерацию по правому краю. Для выравнивания формул рекомендуется использовать таблицы с параметром «Нет границ». 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. Все числовые значения физических величин выражаются в системе СИ. В десятичных дробях целая часть должна отделяться от дробной запятой, а не точкой. Формулы, их компоненты и все переменные в тексте и отдельно в строках набираются только с помощью редактора формул Microsoft Equation 3.0 или MathType 5.0–6.0 с параметрами:

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

Образец оформления формулы:

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

8. Материалы предоставляются по адресу:

ДНР, 283001, г. Донецк, пр. Театральный, 13, Физико-технический факультет.

Главный редактор: Белоусов Вячеслав Владимирович, каб. 252.

Зам. главного редактора: Данилов Владимир Васильевич, каб 203.

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**

2018. – № 2

Технические редакторы: В.Г. Медведева, И.А. Третьяков

Адрес редакции:

ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ул. Университетская, 24,
283001, г. Донецк

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 03.09.2018 г.
Формат 60×84/8. Бумага офсетная.
Печать – цифровая. Усл. печ. л. 9,56
Тираж 100 экз. Заказ. №

Издательство ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»
283001, г. Донецк, ул. Университетская, 24.
Тел.: +38 (062) 302 92 27.

Свидетельство о внесении субъекта издательской деятельности
в Государственный реестр
серия ДК № 1854 от 24.06.2004 г.