СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 1 (89) **2023**

УДК 681.51(06)
С 409

Учредитель

ФГБОУ ВО «Новосибирский государственный технический университет»

Редакционная коллегия

Главный редактор

Лемешко Борис Юрьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Заместители главного редактора

Вострецов Алексей Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Шокин Юрий Иванович, академик, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт вычислительных технологий СО РАН, г. Новосибирск

Ответственный секретарь

Воевода Александр Александрович, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск

Члены редколлегии

Володин Андрей Игоревич, канд. физ.-мат. наук, доктор философии по статистике Университета Регины, проф., Канада
Воронин Владимир Викторович, д-р техн. наук, доцент, ТОГУ, г. Хабаровск
Воскобойников Юрий Евгеньевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Сибстрин, г. Новосибирск
Гайдук Анатолий Романович, д-р техн. наук, проф., ЮФУ, г. Таганрог
Генералов Владимир Михайлович, д-р техн. наук, ФБУН ГНЦ ВБ «Вектор» Роспотребнадзора, г. Новосибирск
Григорьев Юрий Дмитриевич, д-р техн. наук, проф., СПбГЭТУ «ЛЭТИ», г. Санкт-Петербург
Гриф Михаил Геннадьевич, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Дмитриев Александр Капитонович, д-р физ.-мат. наук, НГТУ, г. Новосибирск
Комаров Андрей Константинович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт автоматики и электрометрии СО РАН, г. Новосибирск
Крюков Андрей Васильевич, д-р техн. наук, проф., ИрГУПС, г. Иркутск
Лисицына Лилия Ивановна, д-р техн. наук, проф., НГТУ, г. Новосибирск
Наумова Елена Николаевна, д-р техн. наук, проф., Университет Тафтса, США
Носек Ярослав, д-р техн. наук, проф., Технический университет Либерец, Чехия
Ронжин Андрей Леонидович, д-р техн. наук, проф., СПб ФИЦ РАН, г. Санкт-Петербург
Рубан Анатолий Иванович, д-р техн. наук, проф., СФУ, г. Красноярск
Сидоров Денис Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт систем энергетики им. Мелентьева СО РАН, г. Иркутск
Уранчимэг Тудевдагва, д-р техн. наук, проф., Хемницкий технический университет, Германия
Фомин Василий Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., Институт теоретической и прикладной механики СО РАН, г. Новосибирск
Хабаров Валерий Иванович, д-р техн. наук, проф., СГУПС, г. Новосибирск
Ханова Анна Алексеевна, д-р техн. наук, проф., АГТУ, г. Астрахань
Хлебников Михаил Владимирович, д-р физ.-мат. наук, ИПУ им. В.А. Трапезникова РАН, г. Москва
Шандаров Станислав Михайлович, д-р физ.-мат. наук, проф., ТУСУР, г. Томск

Адрес редакции и издателя: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, НГТУ
Тел. (383) 346-56-88, тел., факс (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

16+

Индекс: 82962 («РОСПЕЧАТЬ») **УДК 681.51(06)**

© Коллектив авторов, 2023
© Новосибирский государственный технический университет, 2023

СИСТЕМЫ АНАЛИЗА И ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

ISSN 2782-2001

№ 1 (89) **2023**

СОДЕРЖАНИЕ

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

Воевода А.А., Филюшов В.Ю. Полиномиальный матричный метод синтеза регуляторов для объектов с запаздыванием управляющего сигнала 7

Voskoboinikov Yu.E. A locally adaptive wavelet filtering algorithm for images 25

Клишин Д.В., Чечулин А.А. Анализ стандартов обеспечения информационной безопасности 37

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

Белавская С.В., Лисицына Л.И., Кузьмин А.Н., Винская Е.К., Навроцкий Л.Г., Разинкин В.П., Блохин А.А. Высокочастотная электромагнитная система для деструкции биологических тканей 55

Гужов В.И., Хайдуков Д.С., Захаров К.В., Майер О.Ю. Повышение пространственного разрешения цифровых голограмм с помощью одномерного субпиксельного сканирования 81

Солдаткин В.С., Туев В.И., Хомяков А.Ю. Оценка изменения фотосинтетической активной радиации светодиодного источника света в зависимости от времени эксплуатации 91

Стрельцов А.С., Французова Г.А., Басыня Е.А. Разработка системы сбора, обработки, анализа, идентификации корреляции событий информационной инфраструктуры предприятия 101

Правила для авторов 114

Корректор *Л.Н. Киншт*
Компьютерная верстка *С.И. Ткачева*

Новосибирский государственный технический университет
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

Налоговая льгота – Общероссийский классификатор продукции
Издание соответствует коду 95 2000 ОК 005-93 (ОКП)

Журнал зарегистрирован Комитетом РФ по печати. Свидетельство о регистрации
средства массовой информации ПИ № ФС77-76010 от 03 июля 2019 г.
Периодичность издания – 4 номера в год.
Подписано в печать 22.03.2023. Выход в свет 29.03.2023.
Формат 70 × 108 1/16. Бумага офсетная. Тираж 300 экземпляров.
Уч.-изд. л. 10,15. Печатных листов 7,25. Издательский № 58. Заказ № 105
Цена свободная

Отпечатано в типографии
Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 1 (89) **2023**

УДК 681.51(06)
С 409

Journal was established by

Novosibirsk State Technical University

Editorial board

Chief editor

Lemeshko B. Yu., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

Deputy chief editor

Vostretsov A. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Shokin Yu. I., D.Sc. (Phys.& Math.), Institute of Computational Technologies, Novosibirsk, RF

Executive Secretary

Voevoda A. A., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF

The members of the editorial Board

Volodin A. I., D.Sc. (Phys. & Math.), Doctor of Philosophy in Statistics from the University of Regina, Professor of Statistics University of Regina, Canada
Voronin V. V., D.Sc. (Eng.), Pacific national University, Khabarovsk, RF
Voskoboinikov Yu. E., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering, Novosibirsk, RF
Gaiduk A. R., D.Sc. (Eng.), Southern Federal University, Taganrog, RF
Generalov V. M., D.Sc. (Eng.), FBUN GNTS VB «Vektor» Rospotrebnadzora, Novosibirsk, RF
Grigor'ev Yu. D., D.Sc. (Eng.), Saint-Petersburg Electrotechnical University "LETI", Saint-Petersburg, RF
Grif M. G., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Dmitriev A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Komarov A. K., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Automation and Electrometry SB RAS, Novosibirsk, RF
Kryukov A. V., D.Sc. (Eng.), Irkutsk State Transport University, Irkutsk, RF
Lisitcina L. I., D.Sc. (Eng.), Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, RF
Naumova E. N., PhD. (Math.), Tufts University, USA
Nosek J., D.Sc. (Eng.), Technical University of Liberec, Czech Republic
Ronzhin A. L., D.Sc. (Eng.), Federal Research Center Russian Academy of sciences, Saint-Petersburg, RF
Ruban A. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Federal University, Krasnoyarsk, RF
Sidorov D. N., D.Sc. (Phys. & Math.), Melentiev Energy Systems Institute, Irkutsk, RF
Uranchimeg T., D.Sc. (Eng.), Technische Universität Chemnitz, Germany
Fomin V. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Khristianovich Institut of theoretical and applied mechanics SB RAS, Novosibirsk, RF
Khabarov V. I., D.Sc. (Eng.), Siberian Transport University, Novosibirsk, RF
Khanova A. A., D.Sc. (Eng.), Astrakhan State Technical University, Astrakhan, RF
Khlebnikov M. V., D.Sc. (Phys. & Math.), Institute of Control Sciences, Moscow, RF
Shandarov S. M., D.Sc. (Phys. & Math.), Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, Tomsk, RF

Editorial Adress: 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation
Tel. (383) 346-56-88, Fax (383) 344-49-98
E-mail: nauchvest@corp.nstu.ru
Web Site: http://journals.nstu.ru/vestnik/

УДК 681.51(06)

© Authors, 2023
© Novosibirsk State Technical University, 2023

ANALYSIS AND DATA PROCESSING SYSTEMS

ISSN 2782-2001

№ 1 (89) **2023**

CONTENTS

INFORMATION TECHNOLOGIES AND TELECOMMUNICATIONS

Voevoda A.A., Filiushov V.Yu. Polynomial matrix method for synthesizing regulators for objects with a control signal delay 7

Воскобойников Ю.Е. Локально-адаптивный алгоритм вейвлет-фильтрации изображений 25

Klishin D.V., Chechulin A.A. Analysis of information security standards 37

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K., Navrotsky L.G., Razinkin V.P., Blokhin A.A. A high-frequency electromagnetic system for biological tissues destruction 55

Guzhov V.I., Khaidukov D.S., Zakharov K.V., Mayer O.Yu. Improving the spatial resolution of digital holograms using one-dimensional subpixel scanning 81

Soldatkin V.S., Tuev V.I., Khomyakov A.Yu. Evaluation of the change in photosynthetic active radiation of an LED light source depending on the operating time 91

Streltsov A.S., Frantsuzova G.A., Basinya E.A. Development of a system for collecting, processing, analyzing, identifying and correlating events in the information infrastructure of the enterprise 101

Rules for authors 114

Editor *L.N. Kinsht*
Computer imposition *S.I. Tkacheva*

Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

Publication frequency – 4 numbers a year.
Signed in print March 22, 2023.
Date of publication March 29, 2023. Format 70 × 108 1/16
Offset Paper. Circulation is 300 copies. Educational-ed. liter. 10,15. Printed pages 7,25.
Publishing number 58. Order number 105

It is printed in printing house of Novosibirsk State Technical University
20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 89, № 1, 2023, с. 7–24

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 89, No. 1, 2023, pp. 7–24

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 621.865.8+62-503.53 DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-7-24

Полиномиальный матричный метод синтеза регуляторов для объектов с запаздыванием управляющего сигнала*

А.А. ВОЕВОДА[a], В.Ю. ФИЛЮШОВ[b]

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, профессор.

[a] *ucit@ucit.ru* [b] *filiushov.vladislav@gmail.com*

В настоящей работе рассмотрен синтез систем управления для объектов с запаздыванием управляющего сигнала полиномиальным матричным методом, который используется для расположения полюсов и, если это возможно, нулей в требуемом положении. Регулятор рассчитывается по выходу, то есть только по измеренным величинам в объекте, что является преимуществом по сравнению с другими методами синтеза модального направления, где необходимо использовать вектор состояния. Предлагается звено запаздывания аппроксимировать рядом Паде с ограниченным количеством членом, таким образом получив передаточные функции первого и второго порядка. Желаемый характеристический полином замкнутой системы выбирается таким образом, чтобы он содержал знаменатели передаточных функций аппроксимации, что позволит сохранить их полюса в замкнутой системе.

Полиномиальный метод синтеза позволяет рассчитать многоканальные регуляторы как для объектов с несколькими входами и несколькими выходами (multi input – multi output, MIMO), так и для объектов с одним входом и несколькими выходами (single input – multi output, SIMO). К последним относится двигатель постоянного тока с независимым возбуждением, где ток якоря и скорость вращения ротора являются выходами, а управляющий сигнал, подаваемый на полупроводниковый преобразователь, – входом. В настоящей работе управляющий сигнал формируется с запаздыванием, превышающим время переходного процесса двигателя, что вносит значительное влияние в его динамику. Применив предлагаемый подход, удалось синтезировать систему управления скоростью вращения ротора, при этом устойчивую к изменению времени запаздывания в довольно широком диапазоне.

Ключевые слова: полиномиальный метод синтеза, полиномиальное матричное разложение, синтез, многоканальный регулятор, электромеханическая система, звено запаздывания, аппроксимация Паде

* *Статья получена 23 октября 2022 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Большинство производственных процессов имеют временное запаздывание между моментом измерения регулируемой величины и выработкой управляющего воздействия, что значительно влияет на динамику проходящих в системе процессов. Игнорирование запаздывания в математической модели рассматриваемого объекта зачастую приводит к неустойчивости полученной системы управления, поэтому его необходимо учитывать в математическом описании и в законе управления. Природа возникновения запаздывания различна. Например, по конструктивному соображению невозможно установить датчик измеряемой величины в непосредственной близости от места ее изменения, как в системах управления транспортированием какого-либо вещества [1]. Запаздывание управляющего сигнала можно наблюдать в процессах сушки [2], где время от изменения влажности до изменения температуры может достигать нескольких минут, или в процессе горения реактивного топлива временем запаздывания является время, необходимое для впрыскивания топлива в камеру и достижения необходимого давления. Особо часто объекты с запаздыванием встречаются в химической промышленности (например, дистилляционные колонны [3, 4] и ректификационные колонны). Еще одним примером запаздывания управляющего сигнала можно назвать наличие постоянного возмущающего момента на двигателе при условии, что движение его ротора ограничено стопором. В этом случае для начала движения двигателю необходимо развить момент трогания, который можно заменить эквивалентным временем запаздывания, как показано в [5]. Запаздывание управляющего сигнала встречается не только в инженерной области, но и в экономической [6].

Параметры объекта могут меняться в процессе его функционирования, поэтому сохранение устойчивости и основных показателей качества системы управления без перерасчета регулятора является важной проблемой. В настоящей работе рассмотрено несовпадение величины времени запаздывания объекта и его модели, что может произойти из-за физического износа объекта или других причин. В работах [7, 8] определены условия достижения параметрической грубости, которые заключаются в определенном выборе расположения полюсов замкнутой системы относительно нулей объекта.

В настоящей работе задача синтеза решается при помощи полиномиального матричного метода синтеза [9–11], применяемого для одноканальных (*single input – single output*) и для многоканальных (*multi input – multi output*) объектов. Это модальный метод синтеза регуляторов, где самым известным является синтез в пространстве состояний. В настоящей работе с помощью полиномиального метода синтеза рассчитываются регуляторы по выходу объекта, что не требует известности всего вектора состояния. Порядок многоканального регулятора для многоканального объекта зависит не только от порядка объекта, но и от количества доступных измерению величин: чем больше выходов, тем меньше порядок регулятора.

В работах [12–15] с помощью полиномиального метода синтеза рассчитан многоканальный регулятор для объектов с одним входом и несколькими выходами: перевернутый маятник на тележке, два перевернутых маятника на тележке, двигатель постоянного тока с независимым возбуждением. Для двигателя постоянного тока было показано, что от многоканального регулятора

можно перейти к системе подчиненного регулирования. В работе [16] рассчитана система управления для электромеханической системы регулирования натяжения в зоне транспортирования материала поточной линии по задающему и возмущающим воздействиям с помощью полиномиального метода синтеза.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Рассмотрим полностью управляемый и наблюдаемый объект управления с запаздыванием управляющего сигнала:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t-\tau), \qquad y(t) = Cx(t),$$

где $x(t) \in R^n$ – вектор состояния объекта; $u(t) \in R^m$ – вектор управляющих воздействий; $y(t) \in R^p$ – вектор измеряемых переменных объекта; τ – время запаздывания. Матрицы объекта A, B, C заданы.

От описания объекта в пространстве состояний к описанию в виде матричной передаточной функции (матричной ПФ или МПФ) можно перейти по следующей формуле:

$$W_{\text{о}}(s) = W(s)e^{-\tau s}, \qquad W(s) = C(sI - A)^{-1}B,$$

где $W(s) \in R(s)^{p\times m}$ – МПФ объекта без учета запаздывания; I – единичная матрица; $W_{\text{о}}(s) \in R(s)^{p\times m}$ – МПФ объекта; $R(s)^{p\times m}$ – множество матриц размером $p\times m$, элементы которых – рациональные функции от s с вещественными коэффициентами. Данная МПФ может быть неквадратной, так как количество входов и выходов объекта в общем случае не равно; s – оператор Лапласа.

Разрабатываемый подход для синтеза заключается в аппроксимации звена запаздывания $e^{-\tau s}$ каким-либо способом, например, аппроксимацией рядом Паде некоторого порядка, для получения передаточной функции с некоторым количеством полюсов и сохранения этих полюсов в замкнутой системе. Сохранение полюсов в замкнутой системе происходит путем выбора этих полюсов в качестве части корней характеристического полинома, то есть эти полюса являются согласованными [17]. Полученные в результате аппроксимации звена запаздывания полюса́ зависят от величины запаздывания, поэтому удается значительно понизить требования к точности заданной величины запаздывания в модели, что значительно упрощает дальнейшую настройку системы управления реального объекта.

Существует множество разновидностей аппроксимаций звена запаздывания. В настоящей работе используем аппроксимацию с помощью ряда Паде:

$$e^{-\tau s} = \frac{1 - \tau s/2 + (\tau s)^2/12 - \cdots}{1 + \tau s/2 + (\tau s)^2/12 + \cdots}.$$

Для возможности использования такой аппроксимации на практике необходимо оставить некоторое количество членов ряда. Ограничимся одним членом:

$$e^{-\tau s} \approx w_{p_1}(s) = \frac{2-\tau s}{2+\tau s} = \frac{g_1(s)}{z_1(s)},$$

или двумя членами:

$$e^{-\tau s} \approx w_{p_2}(s) = \frac{12-6\tau s+(\tau s)^2}{12+6\tau s+(\tau s)^2} = \frac{g_2(s)}{z_2(s)}.$$

Таким образом, приближенная модель объекта $\overline{W}_{\text{о}}(s)$ управления представляется произведением двух передаточных функций: ПФ без учета запаздывания и ПФ аппроксимации Паде:

$$\overline{W}_{\text{о}}(s) = W(s) w_{p_i}(s), \tag{1}$$

где i – количество ограничиваемых членов.

В реальном объекте величина запаздывания может измениться со временем или просто быть известна недостаточно точно, поэтому важным критерием оценки качества работы системы управления является оценка влияния изменения времени запаздывания на способность системы управления сохранять устойчивость и качественные характеристики переходного процесса. Для этого будем различать величину запаздывания объекта $\tau_{\text{о}}$ и величину запаздывания аппроксимации τ, которые в общем случае не равны.

Управление осуществим по отклонению, то есть регулятор стоит в прямом канале с объектом, как показано на рис. 1.

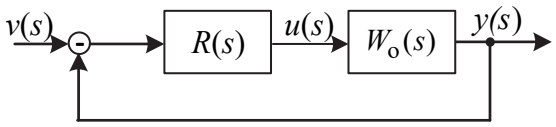


Рис. 1. Структурная схема «объект – регулятор»

Fig. 1. Object-regulator structural diagram

Полиномиальный матричный метод синтеза относится к направлению модального синтеза регуляторов, целью которого является получение желаемого расположения полюсов замкнутой системы. Полюсами замкнутой системы являются корни характеристического полинома или корни определителя характеристической матрицы вида

$$C(s) = \tilde{Y}(s)D(s) + \tilde{X}(s)N(s),$$

где $N(s) \in R[s]^{p\times m}$ и $D(s) \in R[s]^{m\times m}$ – полиномиальные матрицы правого полиномиального матричного разложения МПФ объекта $W_{\text{о}}(s)$, $\tilde{X}(s) \in R[s]^{m\times p}$

и $\tilde{Y}(s) \in R[s]^{m\times m}$ – полиномиальные матрицы левого полиномиального матричного разложения МПФ регулятора $W_r(s)$, p – количество выходов объекта, m – количество входов объекта, $R[s]^{p\times m}$ – множество матриц размером $p\times m$, элементы которых – полиномы от s с вещественными коэффициентами.

«Знаменателями» объекта и регулятора называем полиномиальные матрицы $D(s)$ и $\tilde{Y}(s)$ соответственно, а «числителями» – $N(s)$ и $\tilde{X}(s)$ из-за их схожего смысла с числителем и знаменателем передаточной функции. Например, степень полинома числителя должна быть меньше либо равна степени полинома знаменателя. Полиномиальная матрица является полиномом с матричными коэффициентами. Например, дана некоторая полиномиальная матрица $M(s) \in R[s]^{q\times d}$, тогда ее можно записать в виде $M(s) = \sum_{i=1}^{l} M_i s^i$, где l – старшая степень при s у элементов $M_i \in R^{q\times d}$ полиномиальной матрицы $M(s)$ или степень полиномиальной матрицы $M(s)$.

В данном исследовании ставится задача синтеза матричного регулятора полиномиальным матричным методом для объекта с одним входом $m=1$ и двумя выходами $p=2$, имеющего запаздывание входного сигнала. В случае одного входа или одного выхода у объекта «знаменатели» полиномиального матричного описания объекта и регулятора являются полиномами

$$W(s) = N(s)d^{-1}(s), \quad W_r(s) = \tilde{y}^{-1}(s)\tilde{X}(s),$$

а характеристическая матрица $C(s)$ упрощается до характеристического полинома вида

$$c(s) = \tilde{y}(s)d(s) + \tilde{X}(s)N(s). \tag{2}$$

Для объекта с запаздыванием управляющего сигнала предлагается сохранить полюса в замкнутой системе, полученные в результате аппроксимации звена запаздывания рядом Паде определенного порядка. Для модели объекта вида (1), где

$$w_{p_i}(s) = \frac{g_i(s)}{z_i(s)},$$

желаемый характеристический полином выбираем таким образом, чтобы он содержал полюса ПФ аппроксимации Паде:

$$c(s) = \overline{c}(s)z_i(s). \tag{3}$$

Выбрав полюса таким образом, реализуем описываемый в настоящей работе подход не устранения запаздывания, а учитывания его в замкнутой системе.

2. РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ СИНТЕЗА

Уравнение (2) является разновидностью диофантова уравнения, в котором известными являются полиномиальные матрицы объекта $N(s)$, $D(s)$ и желаемая характеристическая матрица $C(s)$, а неизвестными – полиномиальные матрицы регулятора $\tilde{X}(s)$ и $\tilde{Y}(s)$. Для решения этого уравнения необходимо найти такие полиномиальные матрицы регулятора, при которых правая часть уравнения (2) является желаемой характеристической матрицей $C(s)$.

Необходимым условием [18–21] решения уравнения (2) является взаимная простота «знаменателя» и «числителя» $D(s)$ и $N(s)$ объекта, а степень «знаменателя» регулятора k должна быть следующей: $k \geq n-1$, где n – степень «знаменателя» объекта. Иными словами, если $D(s)$ и $N(s)$ взаимнопростые и $k \geq n-1$, то можно задать желаемую характеристическую матрицу $C(s)$ степени $k+n$ любого вида.

Взаимная простота этих полиномиальных матриц означает отсутствие сокращения нулей с полюсами объекта, что говорит о полной управляемости и наблюдаемости объекта.

Одним из способов решения уравнения (2) является переход к системе линейных алгебраических уравнений

$$\mathfrak{R}\mathfrak{I} = \aleph, \tag{4}$$

где $\mathfrak{I} = \mathrm{diag}(G, G, ..., G)$, $G = \begin{pmatrix} D_n & D_{n-1} & \dots & D_1 & D_0 \\ N_n & N_{n-1} & \dots & N_1 & N_0 \end{pmatrix}$, $\aleph = \left(C_{k+n}\ C_{k+n-1} \dots C_0\right)$, $\mathfrak{R} = \left(Y_k\ X_k\ Y_{k-1}\ X_{k-1} \dots Y_0\ X_0\right)$, n – старшая степень полиномиальной матрицы $D(s)$, k – старшая степень полиномиальной матрицы $\tilde{Y}(s)$, количество матриц G в матрице $\mathfrak{I}$ равно $k-1$.

Если в уравнении (4) матрица Сильвестра является неквадратной, то необходимо перейти к следующему описанию:

$$\mathfrak{R}_1 \mathfrak{I}_1 = \aleph_1, \tag{5}$$

где $\mathfrak{I}_1$ – один из базисных миноров матрицы Сильвестра $\mathfrak{I}$; $\mathfrak{R}_1$ – матрица основных параметров регулятора; $\aleph_1 = \aleph - \bar{\mathfrak{R}}\bar{\mathfrak{I}}$, $\bar{\mathfrak{R}}$ – матрица свободных параметров регулятора, $\bar{\mathfrak{I}}$ – столбцы матрицы Сильвестра, не вошедшие в базисный минор.

Таким образом, полиномиальный матричный метод позволяет задать произвольное расположение полюсов замкнутой системы посредством решения уравнения (2). При этом не говорится о том, какое именно расположение полюсов следует выбрать, так как не существует общего решения этой задачи, а только частные.

3. РЕШЕНИЕ ЧИСЛЕННОГО ПРИМЕРА

В качестве объекта управления возьмем упрощенную (без учета трения и обратной ЭДС) модель двигателя постоянного тока с независимым возбуждением, в которой управляющий сигнал поступает с запаздыванием (рис. 2).

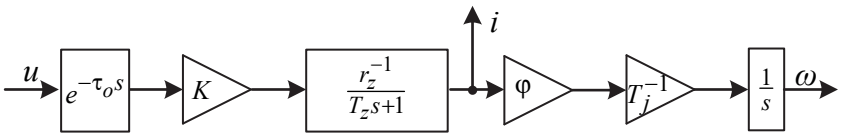


Рис. 2. Структурная схема модели объекта

Fig. 2. Structural diagram of the object model

Объект управления на рис. 2 имеет один вход – управляющий сигнал u на входе полупроводникового преобразовательного агрегата и два выхода – ток якоря i и скорость двигателя ω; K – коэффициент усиления полупроводникового преобразовательного агрегата, r_z – активное сопротивление цепи якоря электродвигателя, T_z – электромагнитная постоянная времени цепи якоря, φ – магнитный поток возбуждения двигателя, T_j – инерционная постоянная времени электропривода, τ_o – время запаздывания в объекте.

Полиномиальное матричное описание объекта на рис. 1 следующее:

$$\begin{pmatrix} i \\ \omega \end{pmatrix} = N(s)d^{-1}(s)e^{-\tau_o s}u = \begin{pmatrix} a\,s \\ b \end{pmatrix}\left((T_z s+1)s\right)^{-1} e^{-\tau_o s}u\,,$$

где $a = \dfrac{K}{r_z}$, $b = \dfrac{K\varphi}{r_z T_j}$.

Данное полиномиальное матричное описание является частным случаем многоканальной системы, когда вход у системы один, а выходов несколько. При этом матричная передаточная функция замкнутой системы квадратная:

$$\begin{pmatrix} i \\ \omega \end{pmatrix} = W_{cl}(s)\begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_\omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} w_i^{\nu_i}(s) & w_i^{\nu_\omega}(s) \\ w_\omega^{\nu_i}(s) & w_\omega^{\nu_\omega}(s) \end{pmatrix}\begin{pmatrix} \nu_i \\ \nu_\omega \end{pmatrix}, \qquad (6)$$

где ν_i – задание на ток якоря, ν_ω – задание на скорость двигателя. Оба задания выполнить одновременно не удастся, поэтому задание на ток якоря сделаем равным нулю $(\nu_i = 0)$, а результат функционирования системы управления будем оценивать по реакции скорости двигателя ω на его задание ν_ω, т. е. по ПФ $w_\omega^{\nu_\omega}(s)$.

Всего рассчитаем три варианта регулятора полиномиальным матричным методом для объекта с аппроксимацией звена запаздывания рядом Паде, ограниченным одним или двумя членами. Первый вариант регулятора рассчитаем для объекта с аппроксимацией $w_{p1}(s)$ таким образом, чтобы в замкнутой системе все полюса были кратными. Второй вариант отличается от первого тем,

что один корень характеристического полинома равен корню полинома $z_1(s)$, то есть происходит сохранение полюса объекта в замкнутой системе. Третий вариант отличается от второго тем, что звено запаздывания аппроксимировано ПФ второго порядка $w_{p_2}(s)$, что повышает порядок объекта и, как следствие, регулятора. Полюса замкнутой системы в третьем варианте кратные, за исключением двух полюсов объекта, полученных из полинома $z_2(s)$.

Регулятор многоканальный, состоит из двух элементов: $R(s)=\left(R_1(s) \quad R_2(s)\right)$, где $R_i(s)=\dfrac{\tilde{x}_l^{1,i}s^l+\tilde{x}_{l-1}^{1,i}s^{l-1}+\ldots+\tilde{x}_1^{1,i}s+\tilde{x}_0^{1,i}}{\tilde{y}_l s^l+\tilde{y}_{l-1}s^{l-1}+\ldots+\tilde{y}_1 s+\tilde{y}_0}$, $i=1,\ 2$ – номер столбца регулятора, l – порядок регулятора. Для первого и второго варианта расчета $l=1$, для третьего варианта $l=2$. При скалярном характеристическом полиноме многоканальный регулятор имеет одинаковый знаменатель.

Первый вариант регулятора рассчитаем так, чтобы все полюса характеристического полинома были кратными, то есть чтобы не выполнялось сохранение полюсов объекта в замкнутой системе. Выполним аппроксимацию звена запаздывания рядом Паде, ограниченным одним членом $e^{-\tau s}\approx w_{p_1}(s)$, тогда

$$N(s)=\begin{pmatrix} a(-\tau s^2+2s) \\ b(-\tau s+2) \end{pmatrix}, \qquad d(s)=T_z\tau s^3+s^2(2T_z+\tau)+2s\ .$$

Запишем полиномиальные матрицы описания объекта через матричные коэффициенты, тогда

$$d_3=T_z\tau,\quad d_2=2T_z+\tau,\quad d_1=2,\quad d_0=0,$$

$$N_3=\begin{pmatrix}0\\0\end{pmatrix},\quad N_2=\begin{pmatrix}-a\tau\\0\end{pmatrix},\quad N_1=\begin{pmatrix}2a\\-b\tau\end{pmatrix},\quad N_0=\begin{pmatrix}0\\2b\end{pmatrix}.$$

Строчный индекс полиномиального матричного описания объекта равен двум, следовательно минимальный порядок регулятора равен единице. Строчный индекс определяется по левому полиномиальному матричному разложению ПФ объекта и равен наибольшей степени полинома в «знаменателе». В данном случае скалярный полином знаменателя $d(s)$ распадется на полиномиальную матрицу $\tilde{D}(s)$ со степенями строк, равными одному и двум, строка со степенью два определяет строчный индекс. Возьмем регулятор минимального порядка $\left(\text{первого: } \tilde{y}(s)=\tilde{y}_1 s+\tilde{y}_0,\ \tilde{X}(s)=\tilde{X}_1 s+\tilde{X}_0\right)$ и запишем его коэффициенты в следующую матрицу: $\Re=\left(\tilde{y}_1\ \tilde{X}_1\ \tilde{y}_0\ \tilde{X}_0\right)$, где $\tilde{X}_1=\left(\tilde{x}_1^{1,1}\quad \tilde{x}_1^{1,2}\right)$, $\tilde{X}_0=\left(\tilde{x}_0^{1,1}\quad \tilde{x}_0^{1,2}\right)$, тогда порядок желаемого характеристического полинома равен четырем. Составим желаемый характеристический полином с кратными полюсами $c(s)=(q+s)^4$, тогда получим следующую матрицу коэффициентов желаемого характеристического полинома:

$$\aleph=\left(1\ \ 4q\ \ 6q^2\ \ 4q^3\ \ q^4\right).$$

Составим матрицу Сильвестра из уравнения (4) для регулятора первого порядка $\Im = \mathrm{diag}(G, G)$. Матрица Сильвестра размерностью 6×5, ранг равен $\mathrm{rank}(\Im) = 5$, следовательно, одна строка является линейно зависимой. Этой строкой может быть или третья, или пятая. Уберем строку 3 из $\Im$, тогда в соответствии с (5) получим следующие матрицы коэффициентов:

$$\Re_1 = \begin{pmatrix} \tilde{y}_1 & \tilde{x}_1^{1,1} & \tilde{y}_0 & \tilde{x}_0^{1,1} & \tilde{x}_0^{1,2} \end{pmatrix}, \quad \Im_1 = \begin{array}{c} 1 \\ 2 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{array} \left| \begin{pmatrix} T_z\tau & 2T_z+\tau & 2 & 0 & 0 \\ 0 & -a\tau & 2a & 0 & 0 \\ 0 & T_z\tau & 2T_z+\tau & 2 & 0 \\ 0 & 0 & -a\tau & 2a & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -b\tau & 2b \end{pmatrix} \right.,$$

$$\aleph_1 = \begin{pmatrix} 1 & 4q & 6q^2 + b\tau\tilde{x}_1^{1,2} & 4q^3 - 2b\tilde{x}_1^{1,2} & q^4 \end{pmatrix}.$$

В записи матрицы $\Im_1$ слева от штриховой линии указаны номера используемых строк матрицы $\Im$. Решив уравнение (5), получим

$$\tilde{y}_1 = T_z^{-1}, \quad \tilde{y}_0 = \frac{T_z q\tau(q^3\tau^3/8 + q^2\tau^2 + 3q\tau + 4) - 2(\tau + T_z)}{T_z\tau^2(2T_z + \tau)}, \quad \tilde{x}_0^{1,2} = \frac{q^4}{2b},$$

$$\tilde{x}_1^{1,1} = \frac{T_z^2 q\tau(q^3\tau^3/8 + q^2\tau^2 + 3q\tau - 4) + 2T_z(T_z - 2q\tau^2 + 2\tau) + \tau^2}{aT_z\tau^2(2T_z + \tau)},$$

$$\tilde{x}_0^{1,1} = \frac{T_z^2 q^3\tau^2(q\tau/2 + 4) + T_z q\tau(q^3\tau^3/8 + q^2\tau^2 - 3q\tau - 4) + 2(T_z + \tau)\left(1 - \tilde{x}_1^{1,2} T_z\tau^2 b\right)}{T_z\tau^2 a(2T_z + \tau)}.$$

Свободный параметр $\tilde{x}_1^{1,2}$ можно выбрать произвольно, он не изменит характеристический полином замкнутой системы, но может изменить форму регулятора и числитель ПФ замкнутой системы.

Искомая ПФ $w_\omega^{\nu\omega}(s)$ в уравнении (6) с найденным регулятором следующая:

$$w1_\omega^{\nu\omega}(s) = \frac{(2 - s\tau)\left(q^4 + 2s\tilde{x}_1^{1,2} b\right)}{2(q+s)^4}.$$

К обозначению ПФ $w_\omega^{\nu\omega}(s)$ добавлен индекс 1, который показывает номер варианта используемого регулятора. Одним из возможных вариантов выбора значений свободных параметров является выбор их такими, чтобы понижалась степень числителя передаточной функции объекта. Для этого в ПФ (7)

достаточно приравнять $\tilde{x}_1^{1,2} = 0$ к нулю, тогда упростится регулятор, а искомая ПФ замкнутой системы будет следующая:

$$w1_{\omega}^{\nu_{\omega}}(s) = \frac{q^4(2 - s\tau)}{2(q+s)^4}.$$

Как видим, в замкнутой системе нет полюсов от аппроксимации рядом Паде первого порядка.

Второй вариант регулятора рассчитаем аналогично первому варианту, но выберем желаемый характеристический полином, как в уравнении (3), где $z_1(s) = \tau s + 2$, а остальные корни характеристического полинома будем варьировать с целью исследовать их влияние на характер переходных процессов. Для простоты возьмем их кратными $\overline{c}(s) = (s+q)^3$, тогда получим $c(s) = (\tau s + 2)(s+q)^3$ со следующей матрицей коэффициентов желаемого характеристического полинома:

$$\aleph = \begin{pmatrix} \tau & 3q\tau + 2 & 3q(\tau q + 2) & q^2(\tau q + 6) & 2q^3 \end{pmatrix}.$$

Матрица Сильвестра $\Im$ для первого и второго варианта расчета регуляторов одинаковая, поэтому матрицы $\Im_1$ и $\Re_1$ также одинаковые. Изменится матрица коэффициентов желаемого характеристического полинома со свободными параметрами:

$$\aleph_1 = \begin{pmatrix} \tau & 3q\tau + 2 & 3q(\tau q + 2) + b\tau\tilde{x}_1^{1,2} & q^2(\tau q + 6) - 2b\tilde{x}_1^{1,2} & 2q^3 \end{pmatrix}.$$

В матрице Сильвестра, как и в первом варианте, исключили третью строку. Получили следующие коэффициенты регулятора:

$$\tilde{y}_1 = T_z^{-1}, \quad \tilde{y}_0 = \frac{T_z q(q^2\tau^2 + 6q\tau + 12) - 4}{2T_z(2T_z + \tau)}, \quad \tilde{x}_1^{1,1} = \tau\frac{T_z q\left(q^2 T_z\tau + 6qT_z - 6\right) + 2}{2T_z a(2T_z + \tau)},$$

$$\tilde{x}_0^{1,1} = \frac{T_z q\left(4q^2 T_z\tau + 12qT_z - 12 + q^2\tau^2\right) - 2\tilde{x}_1^{1,2} T_z b(T_z + \tau) + 4}{2T_z a(2T_z + \tau)}, \quad \tilde{x}_0^{1,2} = \frac{q^3}{b}.$$

Искомая ПФ $w_{\omega}^{\nu_{\omega}}(s)$ в уравнении (6) с найденным регулятором следующая:

$$w2_{\omega}^{\nu_{\omega}}(s) = \frac{(2 - s\tau)\left(q^3 + \tilde{x}_1^{1,2} sb\right)}{(2 + s\tau)(q+s)^3}. \tag{7}$$

Приравняем $\tilde{x}_1^{1,2}$ к нулю, тогда упростится регулятор, а искомая ПФ замкнутой системы будет следующая:

$$w2_{\omega}^{\nu_{\omega}}(s) = \frac{2 - s\tau}{2 + s\tau}\frac{q^3}{(q+s)^3}.$$

Как видим, в передаточной функции замкнутой системы содержится ПФ звена запаздывания, то есть не происходит борьбы с запаздыванием.

Третий вариант регулятора рассчитаем, выполнив аппроксимацию звена запаздывания рядом Паде, ограниченным двумя членами: $e^{-\tau s} \approx w_{p_2}(s)$, тогда

$$e^{-\tau s} \approx w_{p_2}(s) = \frac{12 - 6\tau s + (\tau s)^2}{12 + 6\tau s + (\tau s)^2} = \frac{g_2(s)}{z_2(s)}.$$

Вычисления аналогичны второму варианту расчета регулятора, поэтому не приведены. Из-за повышения порядка объекта на единицу повысился порядок регулятора так же на единицу, что привело к повышению порядка характеристического полинома на два порядка, который задаем по тому же принципу, как и во втором варианте $c(s) = (12 + 6\tau s + (\tau s)^2)(q + s)^4$. Ниже приведена ПФ, связывающая задание на скорость двигателя и саму скорость:

$$w3_{\omega}^{\nu_\omega}(s) = \frac{12 - 6\tau s + (\tau s)^2}{12 + 6\tau s + (\tau s)^2} \frac{q^4}{(q + s)^4}.$$

Как видим, $w2_{\omega}^{\nu_\omega}(s)$ и $w3_{\omega}^{\nu_\omega}(s)$ содержат в своем составе ПФ аппроксимаций рядом Паде $w_{p_1}(s)$ и $w_{p_2}(s)$.

Численное моделирование результатов. На рис. 3 приведена структурная схема замкнутой системы, в которой задание на ток якоря равно нулю $(v_i = 0)$. При расчетах использовалась аппроксимация звена запаздывания, но при моделировании системы управления на входе стоит звено реального запаздывания $e^{-\tau_o s}$. Во второй части моделирования величина запаздывания в объекте отличается от величины запаздывания в модели.

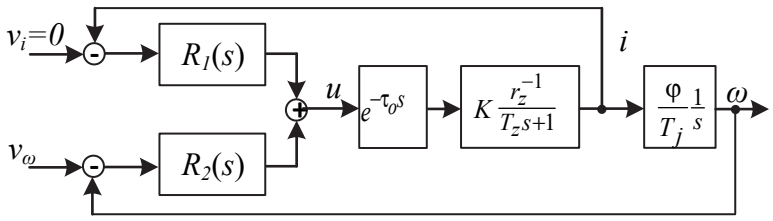


Рис. 3. Структурная схема замкнутой системы

Fig. 3. Structural diagram of a closed-loop system

Выполним моделирование системы управления со следующими параметрами объекта: $T_z = 0.01$, $K = 1$, $r_z = 1$, $\varphi = 0.2$, $T_j = 0.1$, откуда получим $a = 1$, $b = 2$. Запаздывание управляющего сигнала выбираем сопоставимое со временем переходного процесса объекта без запаздывания, при $T_z = 0.01$ время переходного процесса составляет приблизительно $t_п \approx 0.03$ с. Запаздывание объекта выберем больше, чем время переходного процесса $\tau_o = 0.1$ с.

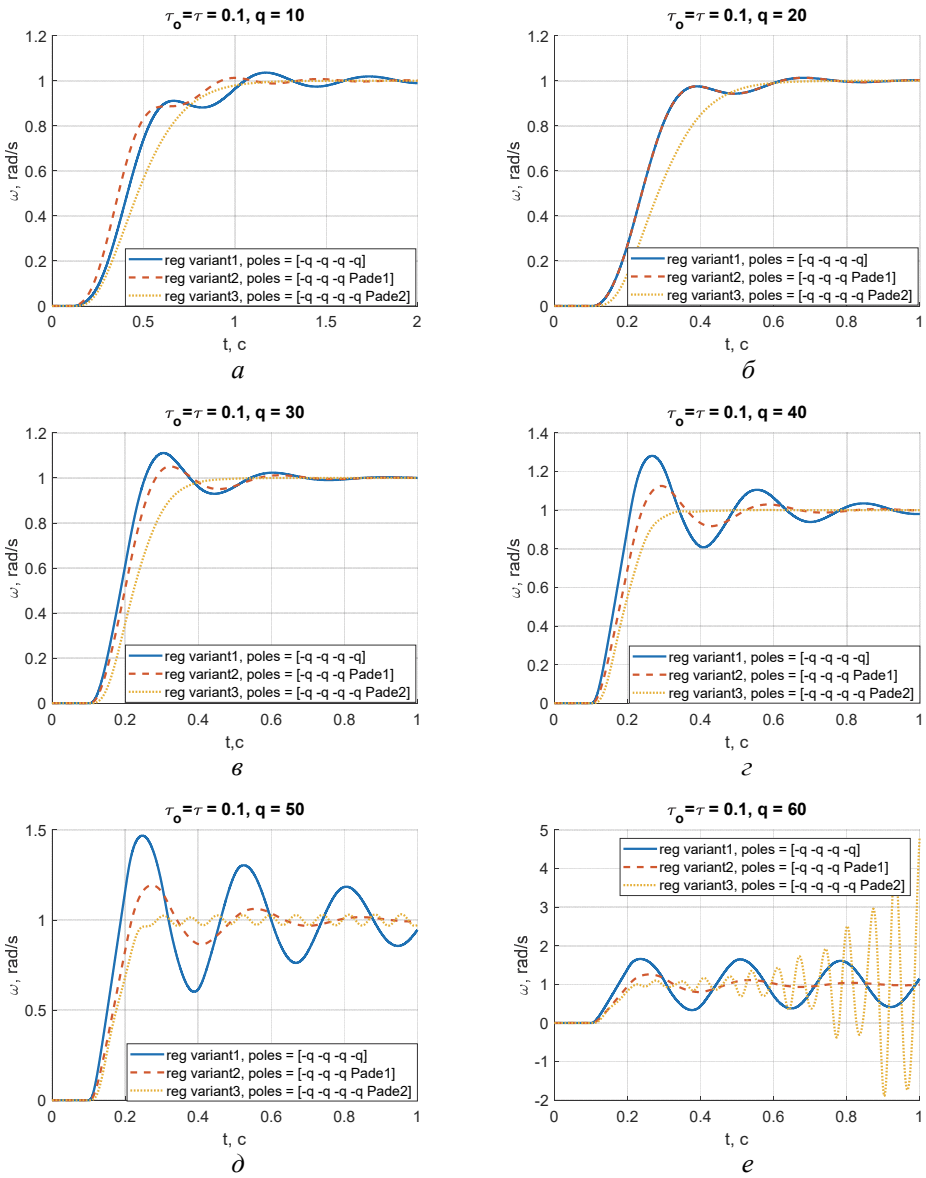


Рис. 4. Графики переходных процессов при $\nu_i = 0$, $\nu_\omega = 1$ и различных q замкнутой системы для трех вариантов расчета регулятора:

а – расстояние от мнимой оси до кратных полюсов $q = 10$; *б* – при $q = 20$; *в* – при $q = 30$; *г* – при $q = 40$; *д* – при $q = 50$; *е* – при $q = 60$

Fig. 4. Transients at $\nu_i = 0$, $\nu_\omega = 1$ and different poles q of the closed-loop system for three variants of regulator calculations:

a is the distance to an imaginary axis at $q = 10$; *б* is at $q = 20$; *в* is at $q = 30$; *г* is at $q = 40$; *д* is at $q = 50$; *e* –is at $q = 60$

На рис. 4 представлены графики переходных процессов трех систем управления, полученных после расчета трех вариантов регуляторов. В первом варианте (reg variant 1) выбран характеристический полином $c(s) = (q + s)^4$,

во втором варианте (reg variant 2) $c(s) = (\tau s + 2)(s + q)^3$ и в третьем варианте (reg variant 3) $c(s) = (12 + 6\tau s + (\tau s)^2)(q + s)^4$. При $\tau = \tau_o = 0.1$ во втором варианте расчета всегда был полюс $\mathrm{Pade1} = -20$, в третьем варианте расчета всегда были два полюса: $\mathrm{Pade2} = -30 \pm 17.3i$.

Показатели качества переходных процессов в полученных системах управления для трех вариантов регуляторов

Quality indicators of transients in the obtained control systems for three variants of regulators

Вариант регулятора	q = 10	q = 20	q = 30	q = 40	q = 50
Время переходного процесса, с					
reg variant 1	0.98	0.53	0.48	0.7	1.5
reg variant 2	0.83	0.53	0.32	0.485	0.59
reg variant 3	0.89	0.48	0.355	0.286	Не уст.
Перерегулирование, %					
reg variant 1	3.6	1.3	11	28	46
reg variant 2	1.2	1.3	4.7	12	20
reg variant 3	0	0	0	0	Не уст.
Время от начала переходного процесса до первого пересечения графиком линии установившегося значения, с					
reg variant 1	1	0.6	0.25	0.2	0.19
reg variant 2	0.91	0.6	0.27	0.24	0.21
reg variant 3	1.4	0.8	0.5	0.5	Не уст.

Аппроксимация звена запаздывания звеном первого или второго порядка позволяет применить полиномиальный метод синтеза для задания расположения полюсов в замкнутой системе. На рис. 3 видно, что аппроксимация звена запаздывания звеном второго порядка значительно повышает качество переходных процессов, которое заключается в отсутствии перерегулирования и высоком быстродействии при выборе варьируемых полюсов $q \le 40$. В то же время это влечет за собой повышение порядка регулятора, что не всегда реализуемо. Дальнейшее увеличение расстояния от ближайшего полюса замкнутой системы до мнимой оси приводит к неустойчивости системы управления.

Сохранение полюса аппроксимации звена запаздывания $\mathrm{Pade1} = -20$ в замкнутой системе не дало весомого прироста качества переходных процессов. Например, графики переходных процессов reg variant 1 при q = 30 и reg variant 2 при q = 40 практически идентичны, reg variant 1 при q = 40 и reg variant 2 при q = 50 тоже практически идентичны.

Несовпадение времени запаздывания объекта и модели может происходить из-за износа изделия, недостаточной априорной информации о нем или других причин. Увеличим время запаздывания объекта по сравнению с временем запаздывания модели на 50 %. При $\tau_o = 0.15$ полюса аппроксимации звена объекта запаздывания первого и второго порядка равны $roots(\tau_o s + 2) = -13.3$ и $roots\left(12 + 6\tau_o s + (\tau_o s)^2\right) = -20 \pm 11.5i$ соответственно.

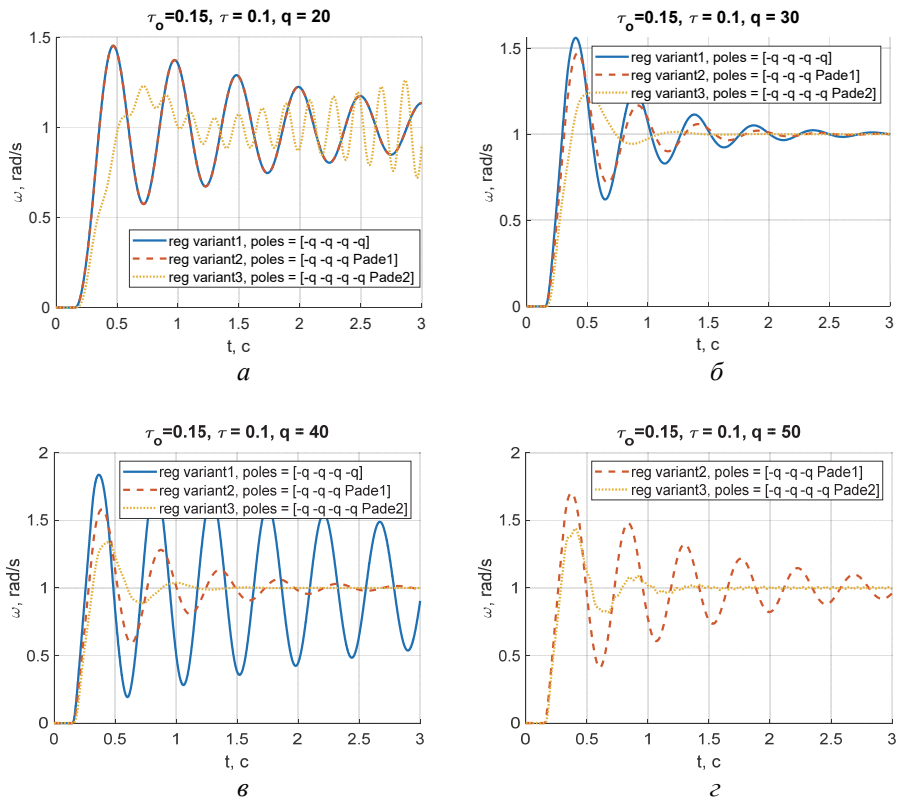


Рис. 5. Графики переходных процессов при $\nu_i = 0$, $\nu_\omega = 1$ и расстояние до мнимой оси q замкнутой системы для трех вариантов расчета регулятора при $\tau_o \neq \tau$:

а) $q = 20$; *б*) $q = 30$; *в*) $q = 40$; *г*) $q = 50$

Fig. 4. Transients at $\nu_i = 0$, $\nu_\omega = 1$ and the distance to imaginary axis q of the closed-loop system for three variants of regulator calculations under $\tau_o \neq \tau$:

a is at $q = 20$; *б* is at $q = 30$; *в* is at $q = 40$; *г* is at $q = 50$

На рис. 5, *а* видно, что при $q = 20$ переходные процессы системы управления с первым и вторым вариантом регуляторов одинаковы, так как $\text{Padel} = -q = -20$, система управления с ними устойчива, но колебательная. Система управления с третьим вариантом регулятора неустойчива. На рис. 4, *б* переходные процессы при $q = 30$ всех трех вариантов регуляторов устойчивые. С третьим вариантом регулятора, как и в случае $\tau_o = \tau$, переходной процесс имеет значительно меньшее перерегулирование и время переходного процесса по сравнению с первым и вторым вариантом регуляторов. На рис. 4, *в* переходной процесс системы с первым вариантом регулятора близок к границе устойчивости, а на рис. 4, *г* он не отражен, так как система управления стала неустойчивой. Как и в случае $\tau_o = \tau$, переходные процессы в системе управления со вторым вариантом регулятора при $q = 40$ практически эквивалентны системе управления при $q = 30$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Синтезирована система управления скоростью вращения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением и запаздыванием управляющего сигнала. Время запаздывания выбрано в три раза большее, чем время переходного процесса в объекте, что существенно затрудняет управление объектом. Показано, что управление такими объектами успешно выполняется с помощью регуляторов, рассчитанных полиномиальным матричным методом синтеза, при аппроксимации звена запаздывания рядом Паде с одним или двумя членами. Регулятор получен многоканальный, работающий по отклонению от тока якоря и от скорости вращения двигателя.

Показано, что повышение порядка аппроксимации звена запаздывания повышает качественные показатели переходного процесса, что можно увидеть по таблице. Сохранение полюсов $z_i(s)$ ПФ (3) в замкнутой системе для $z_1(s)$ (второй вариант регулятора) существенно не улучшило качество переходных процессов по сравнению с первым вариантом регулятора, при котором не происходило сохранения полюсов. Для третьего варианта расчета регуляторов при сохранении $z_2(s)$ удалось значительно улучшить качество переходных процессов по сравнению с первым и вторым вариантом расчета.

Показано, что при полиномиальном матричном методе синтеза регуляторов система управления устойчива к изменению времени запаздывания даже при увеличении времени запаздывания на 50 % по сравнению с временем запаздывания модели, но в этом случае выбор расположения полюсов становится сложнее, так как область устойчивости становится у́же.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Митрошин В.Н., Лойко А.Ю., Сазонов Д.О., Филиппова Е.В.* Система автоматического регулирования температурного распределения расплава полимера в зоне дозирования одночервячного экструдера // Вестник Самарского государственного технического университета. Серия: Технические науки. – 2007. – № 1(19). – С. 35–40.

2. *Рудобашта С.П., Зуева Г.А.* Математическое моделирование процесса сушки материала в аппарате с псевдоожиженным слоем // Математические методы в технике и технологиях – ММТТ. – 2019. – Т. 8. – С. 77–80.

3. *Sarma K.L.N.*, *Chidambaram M.* Centralized PI/PID controllers for non-square systems with RHP zeros // Journal of the Indian Institute of Science. – 2005. – Vol. 85 (4). – P. 201–214.

4. Decoupling internal model control for non-square process with time delays / J. Qibing, G. Yan, L. Ziyi, S. Anan // International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. – IEEE, 2010. – P. 898–901. – DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.133.

5. *Гурецкий Х.* Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. – М.: Машиностроение, 1974. – 327 с.

6. *Прасолов А.В.* Динамические модели с запаздыванием и их приложения в экономике и инженерии. – СПб.: Лань, 2010. – 192 с.

7. *Тютиков В.В., Тарарыкин С.В.* Робастное модальное управление технологическими объектами. Ивановский гос. энергетический ун-т имени В.И. Ленина, 2006. – 255 с.

8. *Тарарыкин С. В., Тютиков В. В.* Робастное модальное управление динамическими системами // Автоматика и телемеханика. – 2002. – № 5. – С. 41–55.

9. *Воевода А.А., Чехонадских А.В., Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза с использованием полиномиального разложения: разделение движений при стабилизации трехмассовой системы // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 2 (43). – С. 39–46.

10. *Шоба Е.В.* Модальный метод синтеза многоканальных динамических систем с использованием полиномиального разложения: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 192 с.

11. *Вороной В.В.* Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов пониженного порядка: дис. … канд. техн. наук: 05.13.01. – Новосибирск, 2013. – 173 с.

12. *Воевода А.А., Филюшов В.Ю., Шипагин В.И.* Полиномиальный метод синтеза регуляторов для частного случая многоканальных объектов с одной входной переменной и несколькими выходными // Безопасность цифровых технологий. – 2021. – № 3 (102). – С. 21–42.

13. *Воевода А.А., Филюшов В.Ю.* Многоконтурная система подчиненного регулирования в многоканальном неквадратном представлении // Вестник Рязанского государственного радиотехнического университета. – 2021. – № 2 (76). – С. 90–101.

14. *Voevoda A.A., Filiushov V.Yu., Bobobekov K.M.* Polynomial matrix and multiloop control methods synthesis comparation for a DC Drive // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon). – Sochi, Russian Federation, 2021. – P. 917–923.

15. *Воевода А.А., Филюшов В.Ю.* Полиномиальное матричное разложение при синтезе неквадратных САУ // Системы анализа и обработки данных. – 2021. – № 1 (81). – С. 21–38.

16. *Филюшов В.Ю.* Полиномиальный метод синтеза регуляторов по задающему и возмущающим воздействиям // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 1 (85). – С. 93–108.

17. *Гайдук А.Р.* Теория и методы аналитического синтеза систем автоматического управления (полиномиальный подход). – М.: Физматлит, 2012. – 360 с.

18. *Chen C.T.* Linear system theory and design. – 2nd ed. – New York: Oxford University Press, 1999. – 334 p.

19. *Vidyasagar M.* Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 1. – San Rafael, CA: Morgan and Claypool Publ., 2011. – 184 p.

20. *Vidyasagar M.* Control system synthesis: a factorization approach. Pt. 2. – San Rafael, CA: Morgan and Claypool Publ., 2011. – 227 p.

21. *Antsaklis P.J., Michael A.N.* Linear systems. – New York: McGraw-Hill, 1997. – 670 p.

Воевода Александр Александрович, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез многоканальных систем. E-mail: ucit@ucit.ru

Филюшов Владислав Юрьевич, кандидат технических наук, старший преподаватель Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – синтез многоканальных систем. E-mail: filiushov.vladislav@gmail.com

Voevoda Alexander Alexandrovich, D.Sc, professor, professor at the automation department, Novosibirsk State Technical University. His research interests include multi channels systems synthesis. E-mail: ucit@ucit.ru

Filiushov Vladislav Yu., PhD, senior lecturer in the Novosibirsk State Technical University. His research interests include multi channels systems synthesis. E-mail: filiushov.vladislav@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-7-24

Polynomial matrix method for synthesizing regulators for objects with a control signal delay[*]

A.A. VOEVODA[a], *V.Yu. FILIUSHOV*[b]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *ucit@ucit.ru* [b] *filiushov.vladislav@gmail.com*

Abstract

In this paper, we consider the synthesis of control systems for objects with a control signal delay by a polynomial matrix method, which is used to locate the poles and, if possible, zeros in the required position. The controller is calculated from the output, i.e. only from the measured values in the plant, which is an advantage over other modal direction synthesis methods where a state vector must be used. It is proposed to approximate the delay link with a Padé series with a limited number of terms, thus obtaining transfer functions of the first and second orders. The desired characteristic polynomial of the closed system is chosen so that it contains the denominators of the approximation transfer functions, which will keep their poles in the closed system.

The polynomial synthesis method makes it possible to calculate multichannel controllers both for objects with multiple inputs and multiple outputs (multi input - multi output, MIMO) and for objects with one input and several outputs (single input - multi output, SIMO). The latter include a DC motor with independent excitation, where the armature current and rotor speed are outputs, and the control signal applied to the semiconductor converter is the input. In this work, the control signal is formed with a delay exceeding the time of the transient process of the engine, which significantly affects its dynamics. By applying the proposed approach, it was possible to synthesize a rotor speed control system that is resistant to changes in the delay time in a fairly wide range.

Keywords: polynomial synthesis method, polynomial matrix decomposition, synthesis, multichannel controller, electromechanical system, transport delay, Pade approximation

REFERENCES

1. Mitroshin .V.N., Lojko A.YU., Sazonov D.O., Filippova E.V. Sistema avtomaticheskogo regulirovaniya temperaturnogo raspredeleniya rasplava polimera v zone dozirovaniya odnochervyachnogo ekstrudera [Automatic control system for the temperature distribution of the polymer melt in the dosing zone of a single-screw extruder] // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta. Seriya: Tekhnicheskie nauki – Bulletin of the Samara State Technical University.Series: Engineering sciences*. – 2007. – № 1(19). – С. 35–40 pp.

2. Rudobashta S.P., Zueva G.A. Matematicheskoe modelirovanie protsessa sushki materiala v apparate s psevdoozhizhennym sloem [Mathematical modeling of the material drying in the apparatus with fluidized bed]. *Matematicheskie metody v tekhnike i tekhnologiyakh – MMTT = Mathematical Methods in Technique and Technologies – MMTT*, 2019, vol. 8, pp. 77–80.

3. Sarma K.L.N., Chidambaram M. Centralized PI/PID controllers for non-square systems with RHP zeros. *Journal of the Indian Institute of Science*, 2005, vol. 85 (4), pp. 201–214.

4. Qibing J., Yan G., Ziyi L., Anan S. Decoupling internal model control for non-square process with time delays // International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation. IEEE, 2010, pp. 898–901. DOI: 10.1109/ICMTMA.2010.133.

5. Guretskii Kh. *Analiz i sintez sistem upravleniya s zapazdyvaniem* [Analysis and synthesis of control systems with transport delay]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 327 p.

6. Prasolov A.V. *Dinamicheskie modeli s zapazdyvaniem i ikh prilozheniya v ekonomike i inzhenerii* [Dynamic Models with Delay and Their Applications in Economics and Engineering]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2010. 192 p.

7. Tyutikov V.V., Tararikin S.V. Robastnoe modalnoe upravlenie tehnologicheskimi objektami [Robust modal control of plant objects]. *Ivanovskiy gosudarstvenniy energeticheskiy universitet – Ivanovo state energetical university,* 2006. – 255 p.

[*] *Received 23 October 2022.*

8. Tararikin S.V., Tyutikov V.V. Robastnoe modalnoe upravlenie dinamicheskimi sistemamy [Robust model control for dynamic systems]. *Automation and Remote Control*, 2002, vol. 63 (5), pp. 730–742. Translated from *Avtomatika i telemekhanika*, 2002, no. 5, pp. 41–55.

9. Voevoda A.A., Chekhonadskikh A.V., Shoba E.V. Modal'nyi metod sinteza s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya: razdelenie dvizhenii pri stabilizatsii trekhmassovoi sistemy [Modal synthesis method using a polynomial decomposition: the separation of motions in the stabilization of the three-mass plant]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 2 (43), pp. 39–46.

10. Shoba E.V. *Modal'nyi metod sinteza mnogokanal'nykh dinamicheskikh sistem s ispol'zovaniem polinomial'nogo razlozheniya*. Diss. kand. tekhn. nauk [The modal method for the synthesis of multi-channel dynamic systems using a polynomial expansion. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 192 p.

11. Voronoi V.V. *Polinomial'nyi metod rascheta mnogokanal'nykh regulyatorov ponizhennogo poryadka*. Diss. kand. tekhn. nauk [Design of multi-channel reduced degree controllers. PhD eng. sci. diss.]. Novosibirsk, 2013. 173 p.

12. Voevoda A.A., Filiushov V.Yu., Shipagin V.I. Polinomial'nyi metod sinteza regulyatorov dlya chastnogo sluchaya mnogokanal'nykh ob"ektov s odnoi vkhodnoi peremennoi I neskol'kimi vykhodnymi [Polynomial method for the synthesis of regulators for the special case of multichannel objects with one input variable and several output values]. *Bezopasnost' tsifrovykh tekhnologii = Digital Technology Security*, 2021, no. 3 (102), pp. 21–42. DOI: 10.17212/2782-2230-2021-3-21-42.

13. Voevoda A.A., Filyushov V.Yu. Mnogokonturnaya sistema podchinennogo regulirovaniya v mnogokanal'nom nekvadratnom predstavlenii [Multiloop subordinate control system in the non-square multivariable representation]. *Vestnik Ryazanskogo gosudarstvennogo radiotekhnicheskogo universiteta = Vestnik of Ryazan State Radio Engineering University*, 2021, no. 2 (76), pp. 90–101.

14. Voevoda A.A., Filiushov V.Yu., Bobobekov K.M. Polynomial matrix and multiloop control methods synthesis comparation for a DC Drive // 2021 International Russian Automation Conference (RusAutoCon), Sochi, Russian Federation, 2021, pp. 917–923.

15. Voevoda A.A., Filiushov V.Yu. Polinomial'noe matrichnoe razlozhenie pri sinteze nekvadratnykh SAU [Polynomial matrix decomposition for the synthesis of non-square control systems]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2021, no. 1 (81), pp. 21–38.

16. Filiushov V.Yu. Polinomial'nyj metod sinteza regulyatorov po zadayushchemu i vozmushchayushchim vozdejstviyam [Polynomial synthesis method of regulators to reference and disturbance signals] // Sistemi analiza I orabotki dannih – Systems of Analysis and Data Processing. – 2022. – № 1 (85). – С. 93–108 pp.

17. Gaiduk A.R. *Teoriya i metody analiticheskogo sinteza sistem avtomaticheskogo upravleniya (polinomial'nyi podkhod)* [The theory and methods of analytical synthesis of automatic control systems (polynomial approach)]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2012. 360 p.

18. Chen C.T. *Linear system theory and design*. 2nd ed. New York, Oxford University Press, 1999. 334 p.

19. Vidyasagar M. *Control system synthesis: a factorization approach*. Pt. 1. San Rafael, CA, Morgan and Claypool Publ., 2011. 184 p.

20. Vidyasagar M. *Control system synthesis: a factorization approach*. Pt. 2. San Rafael, CA, Morgan and Claypool Publ., 2011. 227 p.

21. Antsaklis P.J., Michael A.N. *Linear systems*. New York, McGraw-Hill, 1997. 670 p.

Для цитирования:

Воевода А.А., Филюшов В.Ю. Полиномиальный матричный метод синтеза регуляторов для объектов с запаздыванием управляющего сигнала // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 1 (89). – С. 7–24. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-7-24.

For citation:

Voevoda A.A., Filiushov V.Yu. Polinomial'nyi matrichnyi metod sinteza regulyatorov dlya ob"ektov s zapazdyvaniem upravlyayushchego signala [Polynomial matrix method for synthesizing regulators for objects with a control signal delay]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 7–24. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-7-24.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 89, № 1, 2023, с. 25–36

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 89, No. 1, 2023, pp. 25–36

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 519.2 DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-25-36

A locally adaptive wavelet filtering algorithm for images*

YU.E. VOSKOBOINIKOV

Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), 113, Leningradskaya Street, Novosibirsk, 630008, Russian Federation, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor;
Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor;
Institute of Energy Systems named after L.A. Melentiev, 130 Lermontov Street, Irkutsk, 664033, Russian Federation, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

voscob@mail.ru

The algorithms based on the decomposition of a noisy image in an orthogonal basis of wavelet functions have been widely used to filter images (especially contrasting ones) over the past four decades. In this case, most wavelet filtering algorithms are of a threshold nature, namely: the decomposition coefficient smaller in an absolute value of a certain threshold value is reset to zero; otherwise the coefficient undergoes some (most often nonlinear) transformation. A certain (and very significant) drawback of threshold algorithms is that all coefficients of a certain decomposition level are processed with one identical threshold value (i.e., a constant value for all de-composition coefficients). This does not allow taking into account the "individual energy" of each decomposition coefficient for its more optimal processing. Therefore, we propose its own filtering factor for each coefficient, built on the basis of the optimal Wiener filtering and where a filtering parameter is introduced to compensate for incomplete a priori information on the value of the processed decomposition coefficients. In order to select a filtering parameter, a statistical approach has been proposed that makes it possible to estimate the optimal value of this parameter with acceptable accuracy. The performed computational experiment has shown the developed algorithm effectiveness for wavelet filtering of images.

Keywords: wavelet functions, two-dimensional wavelet functions, wavelet image filtering algorithms, wavelet filtering errors, filtering factors, optimal filtering factor, quasi-optimal filtering factor, selection of the optimal filtering parameter

---

* *Статья получена 30 ноября 2022 г.*

The study was carried out at the Institute of Energy Systems named after. L.A. Melentiev, SB RAS at the expense of a grant from the Russian Science Foundation (project No. 22-21-00409), https://rscf.ru/project/22-21-00409/.

1. INTRODUCTION AND RESEARCH OBJECTIVES

In the last two decades, the algorithms, based on the representation of the filtered image in the basis of wavelet functions are often used for image filtering [1, 2]. An overview of the wavelet functions used for this can be found in [3]. Algorithms include three main stages [4, 5]:

1) calculation of direct discrete wavelet transform (finding the decomposition coefficients for noisy image values);
2) processing of “noisy” decomposition coefficients;
3) calculation of the inverse discrete wavelet transform from the processed decomposition coefficients (finding the “filtered” image values).

The combination of these three stages is called *wavelet filtering*. Obviously, the quality of filtering a noisy image will depend both on the chosen decomposition basis and on the decomposition coefficient processing algorithm, used at the second stage. But it should be noted that the second factor plays a predominant role.

In *threshold algorithms* (which have become widespread in practice), the decomposition coefficient, which is less in absolute value than a certain threshold value, vanishes; otherwise, such a coefficient is preserved or undergoes some (in the general case, nonlinear) transformation. In foreign recourses, such processing is mentioned as *thresholding*. The threshold value is a kind of "control" parameter, which value significantly depends on the filtering error (for more details, see [6, 7]). An overview of the threshold functions used is given in [8]. In this case, the threshold value can be set by one value for the coefficients of all decomposition levels (*independent threshold level*) or for each decomposition level by a separate one (*dependent threshold level*). Looking ahead, we note that in practice, “hard” and “soft” threshold functions have become widespread which have very significant drawbacks. The most important thing is that all coefficients of a certain decomposition level are processed with one identical threshold value [4, 5]. This does not allow taking into account the “individual energy” of each decomposition coefficient during its thresholding and does not provide the possibility of obtaining minimal filtering errors. In addition, the optimal value estimation of the threshold value (minimizing the filtering error) is a very difficult task, in practice (for a review of various algorithms for choosing a threshold, see [4, 7]).

An essential feature of *multiplicative algorithms* is the selection of an individual multiplier for each noisy decomposition coefficient (in foreign recourses, such processing is called *shrinkaging*). An example is the *Wiener wavelet filtering algorithm*, where the multiplier (varying in the interval) for each coefficient is determined from the condition of the minimum mean square error in estimating each decomposition coefficient, which guarantees a minimum root mean square error in filtering the entire image (for more details, see [4, 9]). Unfortunately, the calculation of such optimal multipliers requires setting the decomposition coefficients of the «exact» (not noisy) image, but such information are absent, filtering real images. In [4, 9], several quasi-optimal algorithms are proposed, which are an adaptation of the Wiener filtering algorithm for filtering real images in practice, when the exact image is not known.

A class of wavelet filtering algorithms was proposed in a number of works (for example, see [10–12]), which occupy an intermediate place between the threshold and Wiener algorithms (in the foreign literature they are called *neighshrinking*) due to the decomposition coefficients processing. These algorithms, more or less, take

into account the energy of nearby coefficients, processing a noisy decomposition coefficient. However, the proposed expressions for calculating the filtering factor contain values, which definitions are of an intuitive nature; it does not allow obtaining the minimum error in image filtering [12, 13]. The parameter is introduced in [14], which choice allows approaching the minimum filtering error to a certain extent, in order to minimize the filtering error.

In our research paper, we solve the problem of constructing a wavelet filtering algorithm, where there is a filtering factor that changes in the interval [0,1] for each decomposition coefficient. Filtering parameter is introduced to compensate for incomplete a priori information about the value of the processed decomposition coefficients. In order to select this parameter, a statistical approach has been proposed, which makes it possible to estimate the optimal (in terms of the minimum mean square error) value of the filtering parameter with acceptable accuracy. The performed computational experiment has shown the effectiveness of the developed locally adaptive algorithm for wavelet filtering of images.

2. ADAPTIVE WAVELET FILTERING ALGORITHM

Any image can be interpreted as a function of two variables $f(x,y)$. Let us define the basic functions for the wavelet decomposition of such a function. Traditionally in the scientific recourses, a scalable function (paternal wavelet) is denoted as $\varphi(x)$, but $\psi(x)$ – wavelet (mother wavelet). Using the operations of scaling and shifting, orthonormal basis functions are formed from these ones $\{\varphi_{j,n}(x)\}$, $\{\psi_{j,n}(x)\}$ in the space of one variable functions $f(x)$ [15, 16]. Tensor product of functions $\{\varphi_{j,n}(x)\}$, $\{\psi_{j,n}(x)\}$ generates the following basis functions for the decomposition of two variables functions:

$$\begin{gathered}\{\varphi\varphi_{j,n,m}(x,y)=\varphi_{j,n}(x)\varphi_{j,m}(y)\};\ \{\varphi\psi_{j,n,m}(x,y)=\varphi_{j,n}(x)\psi_{j,m}(y)\};\\ \{\psi\varphi_{j,n,m}(x,y)=\psi_{j,n}(x)\cdot\varphi_{j,m}(y)\};\ \{\psi\psi_{j,m,n}(x,y)=\psi_{j,n}(x)\psi_{j,m}(y)\}.\end{gathered} \tag{1}$$

The corresponding decomposition coefficients are usually called as follows [4]:

- approximating coefficients A_j are obtained as the decomposition coefficients in the basis $\{\varphi\varphi_{j,n,m}(x,y)\}$;
- horizontal detailing factors H_j are obtained as the decomposition coefficients in the basis $\{\varphi\psi_{j,n,m}(x,y)\}$;
- vertical detailing factors V_j are obtained as the decomposition coefficients in the basis $\{\psi\varphi_{j,n,m}(x,y)\}$;
- diagonal detailing coefficients D_j are obtained as the decomposition coefficients in the basis $\{\psi\psi_{j,n,m}(x,y)\}$.

In practice, the image is set by the matrix F the size of $N_X \times N_Y$ (decomposition level j_0). At the first level of decomposition (number j_0+1) approximating coefficients are calculated $A_1 = \{aa_{j_0+1,n,m}\}$, detailing coefficients $H_1 = \{ad_{j_0+1,n,m}\}$, $V_1 = \{da_{j_0+1,n,m}\}$, $D_1 = \{dd_{j_0+1,n,m}\}$ $D_1 = \{dd_{j_0+1,k,n}\}$. At the second level of decomposition (number j_0+2) the matrix of coefficients is subjected to the similar processing $A_1 \to (A_2, H_2, V_2, D_2)$. Summarizing the data, we come to the following decomposition scheme:

$$F \to (A_1, H_1, V_1, D_1) \to (A_2, H_2, V_2, D_2, H_1, V_1, D_1) \to \ldots$$

Let us note the regularity of changing two-dimensional arrays sizes of decomposition coefficients, namely: at each decomposition level, the sizes of new coefficients arrays are halved compared to the previous arrays. In this case, the sum of the of coefficients arrays size is equal to the size of the original matrix *F*, which indicates the "volume" preservation of information contained in *F*.

For example, let the original matrix F has sizes $N_X = 512$ (number of rows) × × $N_Y = 384$ (number of columns). Then the arrays of coefficients A_1, H_1, V_1, D_1 have sizes 256×192, arrays of coefficients A_2, H_2, V_2, D_2 – have sizes 128×96 so on.

The inverse two-dimensional wavelet transform is carried out according to the scheme:

$$\ldots \to (A_2, H_2, V_2, D_2, H_1, V_1, D_1) \to (A_1, H_1, V_1, D_1) \to F.$$

According to the level j by $j-1$ all matrices sizes of the coefficients are doubled.

We suppose the registered image values $f(x, y)$ are represented by matrix $\tilde{F}$ by the size $N_X \times N_Y$, which elements can be represented:

$$\tilde{F}_{i_X, i_Y} = F_{i_X, i_Y} + \eta_{i_X, i_Y}, \tag{2}$$

where F_{i_X, i_Y} – “exact” image values, η_{i_X, i_Y} – random measurement noise with zero mean and variance σ_η^2 and values η_{i_X, i_Y} not correlated with each other. It was shown (see, for example, [4,9]) that in the wavelet decomposition of the matrix $\tilde{F}$ errors in calculating detailing coefficients H_j, V_j, D_j by 2 order and more than the approximating coefficients A_j. Therefore, only these detailing coefficients are processed at the second stage of wavelet filtering. For the convenience of further recording, any of the detailing coefficients will be denoted as $\tilde{d}_{n,m}$, where the indices n, m determine the row and column numbers of the corresponding matrix of decomposition coefficients (the number of the decomposition level is going down).

We should suppose that matrix, used for the wavelet decomposition, $\tilde{F}$ basis functions (1) are orthonormal (see [4, 15, 16] for more details). Then it is proved [4, 9] that the expansion coefficients are random variables and:

- one can take the representation $\tilde{d}_{n,m} = d_{n,m} + \varepsilon_{n,m}$, where $d_{n,m}$ – exact image decomposition coefficients, $\varepsilon_{n,m}$ – random coefficient calculation error, conditioned by noise-induced image measurement;
- have a mathematical expectation $M\left[\tilde{d}_{n,m}\right] = d_{n,m}$ and variance $D\left[\tilde{d}_{n,m}\right] = D\left[\varepsilon_{n,m}\right] = \sigma_\eta^2$;
- errors $\varepsilon_{n,m}$ coefficient calculations are not correlated with each other.

There is a question: how the random decomposition coefficients should be processed $\tilde{d}_{n,m}$ or how to build an estimate $\hat{d}_{n,m}$ for the exact coefficient $d_{n,m}$, in order to "filter out" the error as much as possible $\varepsilon_{n,m}$ and distort the coefficient itself as little as possible $d_{n,m}$, or get the minimum systematic error? In order to answer this question let us consider the mean square error (MSE) of the estimation, which we define by the expression as a criterion characterizing the total estimation error:

$$\Delta(\hat{F}) = M\left[\sum_j \sum_n \sum_m (\hat{d}_{n,m,j} - d_{n,m,j})^2\right], \tag{3}$$

where j – decomposition level. It was proved [4, 9], that the minimum MSE is achieved if the estimate $\hat{d}_{n,m}$ is defined by the expression:

$$\hat{d}_{\mathrm{opt}_{n,m}} = w_{\mathrm{opt}_{n,m}} \tilde{d}_{n,m}, \tag{4}$$

where the optimal filtering factor $w_{\mathrm{opt}_{n,m}}$ has a form:

$$w_{\mathrm{opt}_{n,m}} = \frac{1}{\left(1 + \dfrac{\sigma_\eta^2}{d_{n,m}^2}\right)}. \tag{5}$$

In this case, MSE of the coefficient $d_{n,m}$ is defined as:

$$\Delta\left(\hat{d}_{\mathrm{opt}_{n,m}}\right) = M\left[\left(\hat{d}_{\mathrm{opt}_{n,m}} - d_{n,m}\right)^2\right] = \frac{\sigma_\eta^2}{d_{n,m}^2 + \sigma_\eta^2} d_{n,m}^2. \tag{6}$$

Unfortunately, the constructed optimal multiplier (5) includes the ratio "noise / signal" $S_{\mathrm{opt}_{n,m}} = \dfrac{\sigma_\eta^2}{d_{n,m}^2}$, which is unknown due to ignorance of the values of "exact" decomposition coefficient $d_{n,m}$, is in the denominator. Expressions (4), (5) are of

theoretical interest, since they indicate *what to strive for*, constructing estimates that are implemented in practice. One of such estimates, based on iterative refinement of the "noise / signal", was constructed in [4, 9].

We propose another approach to constructing a quasi-optimal filtering factor, which can be implemented in practice and where $d_{n,m}^2$ is estimated by the nearby noisy expansion coefficients. We define a rectangular aperture $A_{n,m}$ centered at point (n, m) of size $(2L_X+1)(2L_Y+1)$, which contains the matrix elements of the processed coefficients with indices $\{n-L_X \le i_X \le n+L_X;\ m-L_Y \le i_Y \le m+L_Y\}$. Further, for each coefficient $\tilde{d}_{n,m}^2$ we define the value:

$$\nu_{n,m}^2 = \frac{1}{(2L_X+1)(2L_Y+1)} \sum_{i_X, i_Y \in A_{n,m}} \tilde{d}_{i,j}^2 , \tag{7}$$

which can be interpreted as a sample estimate for the quantity $d_{n,m}^2$. Then the quasi-optimal estimate for the filtering factor (5) can be written in the form:

$$\hat{w}_{n,m} = \frac{1}{\left(1+\alpha\dfrac{\sigma_\eta^2}{\nu_{n,m}^2}\right)}, \tag{8}$$

and the quasi-optimal estimate itself $\hat{d}_{n,m}$ for $d_{n,m}$ we calculate as:

$$\hat{d}_{n,m} = \hat{w}_{n,m}\tilde{d}_{n,m} = \frac{1}{\left(1+\alpha\dfrac{\sigma_\eta^2}{\nu_{n,m}^2}\right)}\tilde{d}_{n,m} . \tag{9}$$

These two expressions contain (in contrast to (5)) the filtering parameter, introduced to "compensate" the errors in the estimation of the value $d_{n,m}^2$. How should we choose this option? Obviously, it is desirable to take the quantity α_{opt} as such a parameter, minimizing MSE of wavelet filtering (3). Unfortunately, due to ignorance of the expansion coefficients $d_{n,m}$ the exact image cannot be calculated with the exact value α_{opt}. Therefore, we modify the selection algorithm, used to estimate the optimal threshold values in the threshold wavelet filtering algorithms (for more details, see [4, 9]). We introduce the following statistical criterion:

$$\rho_W(\alpha) = \frac{1}{\sigma_\eta^2} \sum_{i_Y=1}^{N_Y} \sum_{i_X=1}^{N_X} \tilde{F}_{i_X,i_Y} \left(\tilde{F}_{i_X,i_Y} - \hat{F}_{i_X,i_Y}(\alpha)\right), \tag{10}$$

where $\hat{F}_{i_X,i_Y}(\alpha)$ is an matrix element of the image, obtained by the inverse wavelet transform of the expansion coefficients (9) for a given filtering parameter α. As an

estimate for the optimal filtering parameter α_{opt} the value α_w is taken, at which the random variable $\rho_W(\alpha)$ is in the interval

$$\left[\vartheta_{\frac{\beta}{2},N},\ \vartheta_{1-\frac{\beta}{2},N}\right], \tag{11}$$

where $\vartheta_{\frac{\beta}{2},N}$, $\vartheta_{1-\frac{\beta}{2},N}$ – quintiles χ^2_N – distributions with the number of freedom degrees $N = N_X N_Y$ levels $\frac{\beta}{2}$, $1-\frac{\beta}{2}$, respectively; β – the probability of the first kind error, testing the statistical hypothesis about the optimality of the parameter α_w (usually $\beta = 0.05$). In the process of filtering images, the value $N > 30$ and therefore in order to calculate the quantiles χ^2_N – distribution at $\beta = 0.05$ use expressions:

$$\vartheta_{0.025,N} = N - 1.96\sqrt{2N}, \quad \vartheta_{0.975,N} = N + 1.96\sqrt{2N}. \tag{12}$$

We should note that the calculation is reduced to solving the nonlinear equation

$$\rho_W(\alpha) = N. \tag{13}$$

However, the iterative process stops as soon as $\rho_W(\alpha^{(n)})$ is in the interval (11). The number of iterations is much less than, searching for the root of a nonlinear equation with a given accuracy $\varepsilon \in [10^{-8},\ 10^{-6}]$. This makes it possible to effectively use "slow" iterative algorithms (for example, the dichotomy method – dividing a segment in half).

Introducing local evaluation $\nu^2_{n,m}$ and choosing a filtering parameter α from the condition of the minimum filtering MSE (i.e., its adaptation to a specific processed image), allows us to call the proposed wavelet filtering algorithm with a filtering factor (8) a *locally adaptive algorithm.*

An essential feature of the computation algorithm is the use of noise variance to compute σ^2_η. In practice, this value is unknown, and in this case, it is possible to use the estimate

$$\hat{\sigma}^2_\eta = \left[\frac{median(|\tilde{d}_{n,m}|)}{0.6745}\right]^2,$$

where operator $median(|\tilde{d}_{n,m}|)$ calculates the median of the absolute values of diagonal detailing coefficients of the decomposition level $j_0 + 1$.

3. COMPUTATIONAL EXPERIMENT RESULTS

Due to the nonlinear nature of the estimation procedure it is impossible to do analytical studies of the filtering factor (8) and therefore a numerous computational experiment were carried out to filter different (by spectral composition) images. Let us highlight the experiment results with the LENA image (see Fig. 1), which is often used in foreign publications as a test image. In Fig. 1, *a*) an exact image is shown, in Fig. 1, *b*) – noisy image with relative noise level $\delta_\eta = 0.10$, where

$$\delta_\eta = \sqrt{\frac{\sum_{i_X=1}^{N_X}\sum_{i_Y=1}^{N_Y}\left(\tilde{F}_{i_X,i_Y} - F_{i_X,i_Y}\right)^2}{\sum_{i_X=1}^{N_X}\sum_{i_Y=1}^{N_Y}\left(F_{i_X,i_Y}\right)^2}}. \tag{14}$$

a *b*

Fig. 1. Accurate and noisy images

One can see a significant distortion of the exact image by normally distributed measurement noise. On fig. 2 shows the dependence on the smoothing parameter α :

- relative smoothing error (solid curve)

$$\delta_F(\alpha) = \sqrt{\frac{\sum_{i_X=1}^{N_X}\sum_{i_Y=1}^{N_Y}\left(\hat{F}_{i_X,i_Y}(\alpha) - F_{i_X,i_Y}\right)^2}{\sum_{i_X=1}^{N_X}\sum_{i_Y=1}^{N_Y}\left(F_{i_X,i_Y}\right)^2}}; \tag{15}$$

- statistics $\rho_W(\alpha)$ – a dotted curve is shown in the figure;
- quintiles $\vartheta_{0.025,N}$, $\vartheta_{0.975,N}$ – are shown by dashed lines.

For the convenience of display in the figure, the last three quantities are divided by the value $N = N_X N_Y = 65536$. As it follows from (11), as the filtering parameter

values are accepted for which the statistics values are between dashed lines (quintiles (12)), which, have become one dashed line due to the scale of the figure. Therefore, as an estimate α_W the value is taken α, for which the function $\rho_W(\alpha)$ is between these dashed lines.

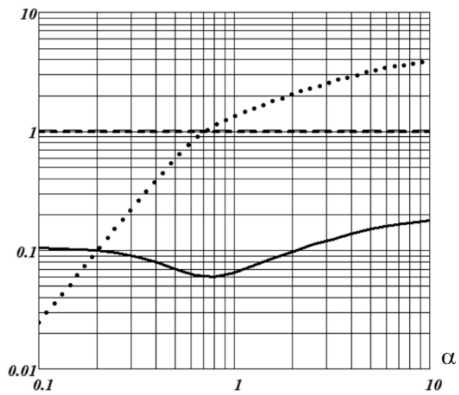


Fig. 2. Characteristics algorithm of filtration

Fig. 3. Filtered image of LENA

An analysis of these graphs allows us to conclude that the proposed approach to choosing a filtering parameter allows us to calculate values α_W from the region of the minimum of the relative filtering error. In this experiment, at $\delta_\eta = 0.10$, the relative filtering error $\delta_F(\alpha_W)$ is 0.046. The filtered image is shown in fig. 3. For a relative noise level of 0.15 – $\delta_F(\alpha_W)$ equals 0.061, which indicates good stability of the proposed filtering algorithm to measurement noise.

CONCLUSION

The proposed locally adaptive filtering algorithm is essentially an adaptation of the optimal Wiener algorithm to the real information available in this experiment. The introduced filtering parameter and its choice from the condition of the minimum MSE makes it possible to compensate for the lack of a priori information on the expansion coefficients of the exact image. The comparison with the filtering results, the same noisy images by threshold algorithms (for more details see [4, 7]) shows that the proposed algorithm has 15…20 % less filtering MSE, although it requires more operations due to the need to calculate the values (7).

REFERENCES

1. Chui C.K. *An introduction to wavelets*. New York, London, Academic Press, 2001. 213 p.

2. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia, Pa., Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. 357 p.

3. Gao R.X., Yan R. *Wavelets: theory and applications for manufacturing*. Springer, 2011. 243 p. DOI: 10.1007/978-1-4419-1545-0.

4. Voskoboinikov Yu.E. *Wavelet filtering algorithms with examples in the MathCAD package*. Palmarium Academic Publishing, 2016. 196 p. (In Russian).

5. Baleanu D. *Advances in wavelet theory and their applications in engineering, physics and technology*. InTech, 2012. 326 p.

6. Om H., Biswas M. An improved image denoising method based on wavelet thresholding. *Journal of Signal and Information Processing*, 2012, vol. 3, no. 1, pp. 109–116.

7. Voskoboinikov Yu.E., Gochakov A.V. Estimation of optimal threshold values in algorithms of wavelet filtration of images. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2011, vol. 47, no. 2, pp. 105–113.

8. Debalina J. Kaushik S. Wavelet thresholding for image noise removal. *International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication*, 2014, vol. 2, no. 6, pp. 1400–1405.

9. Voskoboinikov Y.E., Gochakov A.V. Quasi-optimal algorithm of estimating the coefficients of wavelet expansions during signal filtration. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2010, vol. 46, no. 1. Pp. 27–36. DOI: 10/3103/S8756699010010048.

10. Chen G.Y., Bui T.D. Multiwavelet denoising using neighbouring coefficients. *IEEE Signal Processing Letters*, 2003, vol. 10, no. 7, pp. 211–214.

11. Krishna G.C., Nagarjuna R., Dhanaraj C. An adaptive wavelet thresholding image denoising method using neighboring wavelet coefficients. *International Journal of Innovation Research in Engineering and Science*, 2013, vol. 9, no. 2, pp. 46–59.

12. Rao B.C., Latha M.D. Selective neighbouring wavelet coefficients approach for image denoising. *International Journal of Computer Science and Communication*, 2011, vol. 2, no. 1, pp. 73–77.

13. Kumar R., Saini B.S. Improved image denoising technique using neighboring wavelet coefficients of optimal wavelet with adaptive thresholding. *International journal of computer theory and engineering*, 2012, vol. 4, no. 3, pp. 395–400. DOI: 10.7763/IJCTE.2012.V4.491.

14. Voskoboinikov Y.E. Estimation of optimal parameters of the multiplicative algorithm of wavelet filtering of images. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 402–407. DOI: 10/3103/S8756699017040136.

15. Mallat S. Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of $L^2(R)$. *Transactions of the American Mathematical Society*, 1989, vol. 315, no. 1, pp. 69–87. DOI: 10.2307/2001373.

16. Mallat S. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, vol. 11, no. 7, pp. 674–693. DOI:10.1109/34.192463.

Voskoboinikov Yuri Evgenievich, graduate of the Department of Automation of NSTU (NETI), Doctor of Physics and Mathematics, Head of the Department of Applied Mathematics of the Novosibirsk State University of Architecture and Civil Engineering (Sibstrin), Professor of the Department of Automation of the Novosibirsk State Technical University. Honored Worker of the Higher School of the Russian Federation. The main direction of scientific research is methods and algorithms for solving ill-posed problems of interpreting experimental data; methods and algorithms for filtering signals and images; identification of dynamic systems. He is the author of over 300 scientific papers, including 5 scientific monographs on solving ill-posed problems. E-mail: voscob@mail.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-25-36

Локально-адаптивный алгоритм вейвлет-фильтрации изображений[*]

Ю.Е. ВОСКОБОЙНИКОВ

Аннотация

На протяжении четырех последних десятилетий для фильтрации изображений (особенно контрастных) широко используются алгоритмы, основанные на разложении зашумленного изображения в ортогональном базисе вейвлет-функций. При этом большинство

[*] *Received 30 November 2022.*

алгоритмов вейвлет-фильтрации носят пороговый характер, а именно: коэффициент разложения, меньший по абсолютной величине, некоторой пороговой величины зануляется, в противном случае коэффициент подвергается некоторому (чаще всего нелинейному) преобразованию. Определенным (и весьма существенным) недостатком пороговых алгоритмов является то, что все коэффициенты определенного уровня разложения обрабатываются с одной одинаковой пороговой величиной (т. е. постоянной величиной для всех коэффициентов разложения). Это не позволяет учитывать «индивидуальную энергию» каждого коэффициента разложения для более оптимальной его обработки. Поэтому в настоящей работе предлагается для каждого коэффициента свой фильтрующий множитель, построенный на основе оптимальной винеровской фильтрации и в котором для компенсации неполной исходной информации о величине обрабатываемого коэффициентов разложения вводится параметр фильтрации. Для выбора параметра фильтрации предложен статистический подход, позволяющий с приемлемой точностью оценить оптимальное значение этого параметра. Выполненный вычислительный эксперимент показал эффективность разработанного алгоритма вейвлет-фильтрации изображений.

Ключевые слова: вейвлет-функции, двумерные вейвлет-функции, алгоритмы вейвлет-фильтрации изображений, ошибки вейвлет-фильтрации, фильтрующие множители, оптимальный фильтрующий множитель, квазиоптимальный фильтрующий множитель, выбор оптимального параметра фильтрации

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Chui C.K.* An introduction to wavelets. – New York; London: Academic Press, 2001. – 213 p.

2. *Daubechies I.* Ten lectures on wavelets. – Philadelphia, Pa.: Society for Industrial and Applied Mathematics, 1992. – 357 p.

3. *Gao R.X., Yan R.* Wavelets: theory and applications for manufacturing. – Springer, 2011. – 243 p. – DOI: 10.1007/978-1-4419-1545-0.

4. *Воскобойников Ю.Е.* Алгоритмы вейвлет-фильтрации с примерами в пакете MathCAD. – Palmarium Academic Publishing, 2016. – 196 с.

5. *Baleanu D.* Advances in wavelet theory and their applications in engineering, physics and technology. – InTech, 2012. – 326 p.

6. *Om H., Biswas M.* An improved image denoising method based on wavelet thresholding // Journal of Signal and Information Processing. – 2012. – Vol. 3, N 1. – P. 109–116.

7. *Voskoboinikov Yu.E.*, *Gochakov A.V.* Estimation of optimal threshold values in algorithms of wavelet filtration of images // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2011. – Vol. 47, N 2. – P. 105–113.

8. *Debalina J. Kaushik S.* Wavelet thresholding for image noise removal // International Journal on Recent and Innovation Trends in Computing and Communication. – 2014. – Vol. 2, N 6. – P. 1400–1405.

9. *Voskoboinikov Y.E., Gochakov A.V.* Quasi-optimal algorithm of estimating the coefficients of wavelet expansions during signal filtration // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2010. – Vol. 46, N 1. – P. 27–36. – DOI: 10/3103/S8756699010010048.

10. *Chen G.Y., Bui T.D.* Multiwavelet denoising using neighbouring coefficients // IEEE Signal Processing Letters. – 2003. – Vol. 10, N 7. – P. 211–214.

11. *Krishna G.C., Nagarjuna R., Dhanaraj C.* An adaptive wavelet thresholding image denoising method using neighboring wavelet coefficients // International Journal of Innovation Research in Engineering and Science. – 2013. – Vol. 9, N 2. – P. 46–59.

12. *Rao B.C., Latha M.D.* Selective neighbouring wavelet coefficients approach for image denoising // International Journal of Computer Science and Communication. – 2011. – Vol. 2, N 1. – P. 73–77.

13. *Kumar R., Saini B.S.* Improved image denoising technique using neighboring wavelet coefficients of optimal wavelet with adaptive thresholding // International Journal of Computer Theory and Engineering. – 2012. – Vol. 4, N 3. – P. 395–400. – DOI: 10.7763/IJCTE.2012.V4.491.

14. *Voskoboinikov Y.E.* Estimation of optimal parameters of the multiplicative algorithm of wavelet filtering of images // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2017. – Vol. 53, N 4. – P. 402–407. DOI: 10/3103/S8756699017040136.

15. *Mallat S.* Multiresolution approximation and wavelet orthonormal bases of $L^2(R)$ // Transactions of the American Mathematical Society. – 1989. – Vol. 315, N 1. – P. 69–87. – DOI: 10.2307/2001373.

16. Mallat S. A theory of multiresolution signal decomposition: the wavelet representation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. – 1989. – Vol. 11, N 7. – P. 674–693. – DOI:10.1109/34.192463.

For citation:

Voskoboinikov Yu.E. A locally adaptive wavelet filtering algorithm for images. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 25–36. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-25-36.

Для цитирования:

Воскобойников Ю.Е. Локально-адаптивный алгоритм вейвлет-фильтрации изображений // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 1 (89). – С. 25–36. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-25-36.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 89, № 1, 2023, с. 37–54

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 89, No. 1, 2023, pp. 37–54

ИНФОРМАЦИОННЫЕ
ТЕХНОЛОГИИ
И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИИ

INFORMATION
TECHNOLOGIES
AND TELECOMMUNICATIONS

УДК 004.056

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-37-54

Анализ стандартов обеспечения информационной безопасности*

Д.В. КЛИШИН[1,a], А.А. ЧЕЧУЛИН[2,b]

[1] *197101, РФ, г. Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, 49А, Национальный исследовательский университет ИТМО*
[2] *199178, Россия, г. Санкт-Петербург, 14-я линия, 39, Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук*

[a] *dvklishin@itmo.ru* [b] *andreych@bk.ru*

Целью работы является систематизация имеющихся знаний о моделях информационной безопасности, представленных в стандартах и научных исследованиях для решения проблемы трудоемкости: анализа и выбора актуальной для информационной инфраструктуры предприятия модели информационной безопасности, оценки текущего уровня информационной безопасности предприятия.

При выявлении и анализе использующихся моделей информационной безопасности в рамках настоящей работы рассмотрены стандарты, нормативные правовые акты и научные исследования в области информационной безопасности. Систематизация знаний о моделях информационной безопасности производилась с помощью анализа стандартов, научных исследований, нормативных правовых актов по информационной безопасности; выявления общих свойств моделей информационной безопасности; группировки критериев и свидетельств, подтверждающих реализацию мер информационной безопасности, по общим признакам; выявления способов автоматизации оценки текущего уровня информационной безопасности.

В ходе работы выявлены основные критерии модели информационной безопасности; сформирован перечень свидетельств, позволяющих контролировать реализацию мер информационной безопасности; выявлены общие признаки критериев, свидетельств, достаточных для группирования; выявлены виды свидетельств; сформирован алгоритм оценки текущего уровня информационной безопасности предприятия; выявлены способы автоматизации сбора информации об используемой предприятием модели информационной безопасности и свидетельств реализации мер информационной безопасности.

Настоящая работа систематизирует знания о существующих моделях и позволяет проанализировать критерии информационной безопасности без необходимости изучения всех рассмотренных в статье стандартов и научных работ, что позволяет сократить трудоемкость анализа и выбора актуальной для информационной инфраструктуры предприятия модели информационной безопасности. Результаты настоящей работы будут применены для выявления возможности автоматизации оценки текущего уровня информационной безопасности предприятия.

* *Статья получена 20 сентября 2022 г.*

Ключевые слова: информационная безопасность, уровень информационной безопасности, оценка уровня информационной безопасности, модель информационной безопасности, критерии информационной безопасности, свидетельства, требования, стандарты

ВВЕДЕНИЕ

Организация информационной безопасности на предприятии начинается с определения актуальных рисков и угроз информационной безопасности для информационной инфраструктуры предприятия. При применении проактивного подхода к управлению процессами информационной безопасности требуется выбрать и реализовать меры информационной безопасности, позволяющие снизить или устранить актуальные риски и угрозы информационной безопасности. В качестве проактивного инструмента, позволяющего подобрать необходимый набор мер информационной безопасности под определенные риски и угрозы информационной безопасности, разработаны модели информационной безопасности.

Под моделью информационной безопасности подразумеваются требования к совокупности технических и организационных мер по обеспечению информационной безопасности, а также требования к объектам и процессам информационной безопасности. Структура модели состоит из мер информационной безопасности, сгруппированных по общим признакам – критериям. Реализация данных мер необходима для снижения или устранения определенных рисков, угроз информационной безопасности и достижения требуемого уровня информационной безопасности на предприятии.

Модели информационной безопасности представлены нормативными правовыми актами, международными стандартами, научными исследованиями и требованиями для определенных сфер финансового и промышленного рынка.

Таким образом, в представленной работе рассматриваются существующие отечественные и зарубежные варианты моделей информационной безопасности, ставится вопрос об объеме выборки мер и критериев модели информационной безопасности, а также формируется перечень свидетельств, необходимых для доказательства реализации мер информационной безопасности.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящее время в области информационной безопасности имеется много моделей информационной безопасности. Большинство из этих моделей информационной безопасности имеют схожие или общие меры и критерии, помимо этого, они имеют уникальные для каждой модели информационной безопасности особенности.

В случаях, когда выбор подходящей модели информационной безопасности не определен требованиями законодательства и регуляторов отрасли, то подбор актуальной для информационной инфраструктуры предприятия модели информационной безопасности является трудоемкой задачей. Выбор необходимой модели информационной безопасности также может потребоваться для компенсирования мер, не рассматриваемых в моделях, определенных требованиями нормативных правовых актов.

Научная новизна данной работы заключается в предложении методики проведения оценки соответствия реальных показателей уровня информационной безопасности организации требованиям стандартов, нормативных правовых актов и руководящих документов в области ИБ, представленных моделями информационной безопасности; в статье предложены способы автоматизации процессов, описанных в методике.

Для достижения цели работы необходимо следующее: провести литературный обзор стандартов, нормативных правовых актов и научных исследований по информационной безопасности для выявления моделей информационной безопасности; проанализировать модели информационной безопасности, представленные в стандартах, нормативных правовых актах и научных исследованиях; систематизировать полученные знания путем выявления общих свойств для моделей информационной безопасности; выявить и систематизировать критерии моделей и свидетельства, подтверждающие реализацию мер информационной безопасности; выявить возможные способы автоматизации сбора свидетельств реализации мер информационной безопасности.

2. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Согласно исследованию организации Compliance Forge [11], на международном рынке ИБ насчитывается более 180 нормативных правовых актов и стандартов, описывающих модели информационной безопасности.

При выявлении и анализе использующихся моделей в рамках настоящей работы были рассмотрены следующие документы по информационной безопасности:

– нормативная правовая документация ФСТЭК России [1–4];
– стандарты ГОСТ Р ИСО/МЭК серии 27 [5–7];
– серия стандартов NIST [8–10];
– стандарт PCI DSS [12];
– научные исследования в области информационной безопасности, в том числе фреймворки [11, 13, 14].

Также помимо стандартов, описывающих модели, были проанализированы работы [14, 15], описывающие методы оценки соответствия текущего уровня информационной безопасности с моделью, описанной в стандартах.

В рамках настоящей работы рассматривались только базовые наборы мер по обеспечению информационной безопасности, представленные в рассматриваемых документах, с целью определения объема выборки критериев и мер. Определение объема выборки критериев и мер каждого документа требуется для выявления пересечений множеств мер информационной безопасности, что позволяет определить общие и различные для каждой модели меры и критерии информационной безопасности и на основе полученной информации выявить перечень свидетельств, подтверждающих реализацию мер.

В ходе оценки документов по информационной безопасности были выявлены критерии моделей информационной безопасности. Количество критериев и мер представлено в табл. 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В рамках работы было выявлено, что большинство из рассмотренных моделей информационной безопасности имеют схожие или общие меры и критерии, также они имеют уникальные особенности.

В ходе анализа моделей информационной безопасности было выявлено, что модели имеют следующие отличительные признаки:

– детализация мер информационной безопасности;
– объем выборки критериев информационной безопасности;
– рассматриваемые угрозы и риски информационной безопасности;
– подход к обеспечению информационной безопасности.

Таблица 1

Table 1

Критерии моделей информационной безопасности

Criteria of information security models

№ п/п	Наименование стандарта	Критерии
1	Серия стандартов ГОСТ Р ИСО/МЭК: ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000–2021 [5] ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2021 [6] ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002–2021 [7]	Количество критериев: 14. Количество мер информационной безопасности: 114
		Стандартом не предусмотрено категорирование информационной инфраструктуры для определения наиболее подходящего для предприятия набора мер, в связи с чем оценка реализации осуществляется для всех мер информационной безопасности
2	Серия стандартов NIST Special Publication: 800-53 Revision 5 [8] 800-53A Revision 5 [9] 800-53B Revision 5 [10]	Количество критериев: 20. Количество мер информационной безопасности: >256
		Стандартом предусмотрено категорирование информационной инфраструктуры для определения наиболее подходящего для предприятия набора мер, в связи с чем оценка реализации мер осуществляется в зависимости от выбранной категории. Процесс оценки использует три категории, основанные на возможном воздействии на информационную инфраструктуру. К каждому уровню воздействия должен применяться свой набор мер
3	NIST Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity [11]	Количество критериев: 22. Количество мер информационной безопасности: 98
		Стандартом не предусмотрено категорирование информационной инфраструктуры для определения наиболее подходящего для предприятия набора мер, в связи с чем оценка реализации осуществляется для всех мер информационной безопасности

Продолжение табл. 1

Continuon of Tab. 1

№ п/п	Наименование стандарта	Критерии
4	Payment Card Industry Data Security Standard. Requirements and Testing Procedures (PCI DSS) [12]	Количество критериев: 12. Количество мер информационной безопасности: 288
		Стандартом предусмотрено категорирование информационной инфраструктуры для определения наиболее подходящего для предприятия набора мер, в связи с чем оценка реализации мер осуществляется в зависимости от выбранной категории. Категория выбирается по признакам значимости информационной инфраструктуры (по количеству транзакций)
5	Приказ ФСТЭК России № 17 от 11.02.2013 г. [1]	Количество критериев: 17. Количество мер информационной безопасности: 151
		Стандартом предусмотрено категорирование информационной инфраструктуры для определения наиболее подходящего для предприятия набора мер, в связи с чем оценка реализации мер осуществляется в зависимости от выбранной категории. Набор мер выбирается в зависимости от класса защищенности информационной системы, который зависит от масштаба информационной системы
6	Приказ ФСТЭК России № 21 от 18.02.2013 г. [2]	Количество критериев: 15. Количество мер информационной безопасности: 109
		Стандартом предусмотрено категорирование информационной инфраструктуры для определения наиболее подходящего для предприятия набора мер, в связи с чем оценка реализации мер осуществляется в зависимости от выбранной категории. Набор мер выбирается в зависимости от уровня защищенности персональных данных, который зависит от категории, вида и угроз, обрабатываемых персональных данных
7	Приказ ФСТЭК России № 239 от 25.12.2017 г. [3]	Количество критериев: 13. Количество мер информационной безопасности: 113
		Стандартом предусмотрено категорирование информационной инфраструктуры для определения наиболее подходящего для предприятия набора мер, в связи с чем оценка реализации мер осуществляется в зависимости от выбранной категории. Набор мер выбирается в зависимости от категории значимости информационной инфраструктуры

Окончание табл. 1

End of Tab. 1

№ п/п	Наименование стандарта	Критерии
8	Secure Controls Framework (SFC) [13]	Количество критериев: 32. Количество мер информационной безопасности: 1058
		Стандартом предусмотрено категорирование информационной инфраструктуры для определения наиболее подходящего для предприятия набора мер, в связи с чем оценка реализации мер осуществляется в зависимости от выбранной категории
9	A framework and theory for cyber security assessments [14]	Количество критериев: 22. Количество мер информационной безопасности: 102. Отношения между критериями: 51
		Стандартом предусмотрено категорирование информационной инфраструктуры для определения наиболее подходящего для предприятия набора мер, в связи с чем оценка реализации мер осуществляется в зависимости от выбранной категории

С учетом вышеперечисленных отличительных признаков анализ моделей информационной безопасности позволил выявить схожесть и различия разных моделей. Для выполнения целей и задач, поставленных в рамках настоящей работы, требуется выбрать документ по информационной безопасности, включающий в себя наибольший объем выборки критериев и мер информационной безопасности.

В рамках настоящей статьи в качестве работы, в которой представлен наибольший объем выборки критериев и мер информационной безопасности, было выбрано исследование Secure Controls Framework [13], включающее в себя анализ более 184 стандартов и исследований, из которых взяты и объединены общие критерии, а также представлены уникальные для каждого стандарта исследования, что позволило сократить общее количество мер. Схематическое изображение объема выборки стандартов, нормативных правовых актов и исследований представлено на рис. 1.

В ходе анализа критериев модели информационной безопасности, представленных в исследовании Secure Controls Framework [13], была выявлена необходимость сокращения количества критериев модели путем объединения схожих по описанию и назначению критериев. Критерии, выбранные для объединения, представлены в табл. 2.

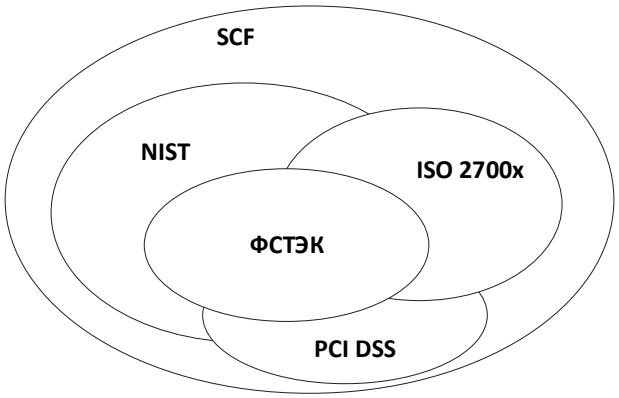


Рис. 1. Схематическое изображение объема выборки рассмотренных работ

Fig. 1. Schematic representation of the sample size of the considered works

Ниже представлен итоговый перечень критериев, выбранных для систематизации в рамках настоящей работы:

– организация и управление деятельностью по информационной безопасности (GOV);
– безопасная разработка (TDA);
– риск-ориентированный подход (RTV);
– обеспечение доступности (CAP);
– кадровая безопасность (HRS);
– соответствие правовым и договорным требованиям (CPL);
– обработка и категорирование информации (DCH);
– управление активами (AST);
– управление конфигурацией (CFG);
– управление изменениями (CHG);
– мониторинг информационной безопасности (MON);
– реагирование на инциденты информационной безопасности (IRO);
– архитектура информационной безопасности (SEA);
– защита информационной инфраструктуры и компонентов (NET);
– криптографическая защита информации (CRY);
– защита рабочих мест (END);
– идентификация и аутентификация (IAC);
– выявление нерегламентированных функциональных характеристик (EMB);
– контроль за использованием мобильных устройств и носителей информации (MDM);
– управление уязвимостями и обновлениями (VPM);
– физическая безопасность (PES);
– безопасность персональных данных (PRI).

Таблица 2

Table 2

Критерии Secure Controls Framework, выбранные для объединения

Secure Controls Framework Criteria selected for integration

№ п/п	Объединяемые критерии	Причина объединения	Наименование нового критерия
1	Организация и управление деятельностью по информационной безопасности (GOV). Управление проектами по информационной безопасности (PRM). Обеспечение информационной безопасности (OPS)	Все меры из указанных критериев относятся к верхнеуровневой административной деятельности по информационной безопасности и имеют общие признаки	Организация и управление деятельностью по информационной безопасности (GOV)
2	Обеспечение безопасности облачных сервисов (CLD). Контроль выполнения мер информационной безопасности (IAO). Безопасная разработка (TDA). Безопасность веб-приложений (WEB)	Все меры из указанных критериев относятся к использованию предприятием программного обеспечения, программный код которого разработан работниками предприятия	Безопасная разработка (TDA)
3	Управление рисками (RSK). Управление угрозами (THR)	Все меры из указанных критериев относятся к применению риск-ориентированного подхода	Риск-ориентированный подход (RTV)
4	Непрерывность бизнес-процессов и восстановление информационной инфраструктуры (BCD). Обеспечение доступности (CAP). Обслуживание информационной инфраструктуры (MNT)	Все меры из указанных критериев относятся к риск-ориентированному подходу и имеют общие признаки для группирования	Обеспечение доступности (CAP)
5	Кадровая безопасность (HRS). Обучение персонала (SAT)	Все меры из указанных критериев относятся к обеспечению свойства доступности информации, обрабатываемой / хранящейся информационной инфраструктурой предприятия	Кадровая безопасность (HRS)
6	Соответствие правовым и договорным требованиям (CPL). Управление взаимодействиями с подрядчиками и поставщиками (TPM)	Административная часть мер из указанных критериев относится к деятельности отдела кадров	Соответствие правовым и договорным требованиям (CPL)

Поскольку основной целью информационной безопасности является предоставление безопасного доступа легитимных субъектов к объектам информационной инфраструктуры, будет закономерно систематизировать выявленные критерии информационной безопасности по уровням реализации механизмов безопасности, по целям и функциональным категориям.

При анализе перечня критериев, выбранных для систематизации, было выявлено, что критерии можно условно распределить между четырьмя группами.

1. Политика информационной безопасности, включающей в себя критерии, относящиеся к верхнеуровневым, организационным мерам, позволяющим планировать и управлять процессами информационной безопасности.

2. Контроль информационной безопасности, включающей в себя критерии, относящиеся к контролю организации и мониторингу информационной безопасности.

3. Система защиты, включающей в себя критерии, относящиеся средствам и системам защиты информации.

4. Безопасность системы, включающей в себя критерии, относящиеся к безопасному функционированию системы.

Анализ мер информационной безопасности из выбранных для систематизации критериев позволил сформировать и систематизировать перечень свидетельств, необходимых для контроля за выполнением мер информационной безопасности.

Выявленные свидетельства можно разделить на четыре группы.

1. Организационно-распорядительная документация – все свидетельства, относящиеся к документации, связанной с административно-бытовой деятельностью предприятия.

2. Информация об информационной инфраструктуре – все свидетельства, относящиеся к информации, связанной с информационными технологиями, используемыми в информационной инфраструктуре предприятия.

3. Документация по информационной безопасности – все свидетельства, относящиеся к документации, связанной с информационной безопасностью.

4. Информация о средствах защиты информации – все свидетельства, относящиеся к информации о наличии средств защиты информации, автоматизирующих процессы управления ИБ, а также их конфигурации.

К группе «Организационно-распорядительная документация» относятся следующие свидетельства: протоколы обучения работников; результаты проверки знаний работников; приказы о назначении работников на должности, связанные с обслуживанием информационной инфраструктуры; кадровая документация и записи о профессиональных компетенциях; схема организационной структуры предприятия; договоры с подрядными организациями по части обслуживания и доступа к информационной инфраструктуре; документация о территории, принадлежащей предприятию на праве собственности или аренды; договоры с провайдерами интернет-услуг или услуг по предоставлению вычислительных мощностей; информация по обучению сотрудников использованию и обслуживанию информационной инфраструктуры и отчетность по итогам; планы действий по непрерывности и восстановлению бизнес-процессов.

К группе «Информация об информационной инфраструктуре» относятся следующие свидетельства: наличие альтернативных мест хранения и обработки информации на случай возникновения нештатных ситуаций; результаты инструментальных сканирований объектов информационной инфраструктуры; конфигурация активов информационной инфраструктуры; инвентарная опись активов информационной инфраструктуры с их описанием; схема информационной инфраструктуры; верхнеуровневые политики, положения, регламенты и стандарты, регламентирующие процессы информационной безопасности; документы, описывающие требования и порядок реализации процедур по информационной безопасности; перечень конфиденциальной информации; перечень критической информационной инфраструктуры; отчеты о мониторинге информационной безопасности; матрицы доступа; журнал учета машинных носителей информации; журнал безопасности доступа к носителям информации; информация об отказоустойчивости информационной инфраструктуры; информация об энергозависимости информационной инфраструктуры; перечень отказоустойчивых технических средств; перечень энергозависимых технических средств, которым необходимо обеспечить наличие резервных источников питания.

К группе «Документация по информационной безопасности» относятся следующие свидетельства: верхнеуровневые политики, положения, регламенты, стандарты (регламентирующие планирование процессов по обеспечению защиты информации; порядок действий в нештатных ситуациях; порядок обучения пользователей; правила предотвращений вторжений; правила проведения аудита; выявление и устранение уязвимостей; обеспечение доступности; правила управления обновлениями; обеспечение целостности; резервное копирование информации; физическую защиту технических средств); низкоуровневые документы, процедуры, стандарты и т. п. (описывающие требования и порядок организации деятельности по информационной безопасности; оценки риска и угроз; предотвращения вторжений; выявления уязвимостей; определения источника времени; сбора и хранения информации о событиях безопасности; проведения внутренних аудитов; проведения внешних аудитов); политика информационной безопасности; дорожная карта / планы развития информационной безопасности; модель угроз информационной безопасности; отчеты об оценке рисков; методика оценки рисков; план мероприятий по обеспечению защиты информации; план действий в нештатных ситуациях; протоколы отработки действий в нештатных ситуациях; результаты сканирований, пентестов, штабных киберучений и киберучений; отчеты о проведении внешних и внутренних аудитов; журнал событий безопасности; критические сегменты информационной инфраструктуры; категорирование информации; перечни разрешенных действий и разрешенного программного обеспечения и операционных систем; журнал резервного копирования; журнал восстановления информации; перечень компонентов программного обеспечения, разрешенных к установке; реестр доверенных источников для получения обновлений ПО.

К группе «Информация о средствах защиты информации» относится информация о средствах защиты информации, позволяющих автоматизировать предотвращение компьютерных атак; выявление уязвимостей; синхронизацию системного времени; процесс сбора, записи, хранения, учета событий безопас-

ности в журнале событий безопасности; процесс анализа действий отдельных пользователей; процессы управления доступом пользователей; процессы управления учетными записями пользователей; процессы управления парольной политикой; защиту аутентификационной информации при ее передаче; антивирусную защиту; процессы учета машинных носителей информации; уничтожение (стирание) информации; выявление компьютерных инцидентов; резервирование средств и систем; контроль безотказного функционирования средств и систем; обеспечивающие резервное копирование информации; восстановление информации; управление изменениями конфигурации программного обеспечения; установку только разрешенного к использованию программного обеспечения; поиск и получение обновлений программного обеспечения; контроль целостности обновлений на предмет ошибок, вирусов, встроенных программных закладок; процессов обновления программного обеспечения.

В результате анализа групп свидетельств можно выделить три вида свидетельств: 1) документальные свидетельства – свидетельства, полученные из документов предприятия; 2) программные свидетельства – свидетельства, полученные от программного обеспечения; 3) аудиторские свидетельства – свидетельства, полученные при аудиторской проверке.

Варианты автоматизации процесса сбора свидетельств реализации мер информационной безопасности представлены в табл. 3.

Таблица 3

Table 3

Виды свидетельств

Types of evidences

Документальные свидетельства	Свидетельства, собранные аудитором	Свидетельства, полученные от ПО
– Анализ наличия документов, наличия их пересмотра и обновлений путем анализа метаданных всех версий документов – Поиск информации в документах по ключевым словам – Приведение всех документов по информационной безопасности к единому формату, который позволяет сконвертировать информацию о мерах в документы формата json, csv и т. п. – Перечень активов и их конфигураций в формате json	– Подключение к интерфейсам программного обеспечения, таким как REST API или другим API – Получение конфигураций программного обеспечения, средств защиты информации, аппаратно-программных комплексов из централизованных систем управления, таких как Active Directory, Kaspersky Security Center, сетевых хранилищ (NAS), MaxPatrol SIEM и т. п. – Выгрузка организационной информации о предприятии из такого программного обеспечения, как 1С и Active Directory в форматах json, csv – Сбор информации аудитором в документ, который позволяет сконвертировать информацию о мерах в документы формата json, csv и т. п.	Получение актуальной информации о сети за счет анализа результатов автоматизированного инструментального сканирования программного обеспечения и средств защиты информации

В качестве долгосрочной перспективы использования программного обеспечения для автоматизации оценки текущего уровня информационной безопасности можно рассмотреть вариант формирования модели информационной безопасности за счет:

– приведения всех документов по информационной безопасности к единому формату, который позволяет сконвертировать информацию об используемых мерах в документы формата json, csv и т. п.;

– предоставления перечня активов и их конфигураций в формате json, csv и т. п.

В случаях, когда автоматизированный сбор информации невозможен, аудитор может самостоятельно создавать объекты информационной инфраструктуры из предложенных шаблонов и заполнять поля их значений.

Целью выявления вариантов автоматизации сбора свидетельств является снижение объема трудозатрат на оценку соответствия внутренних показателей предприятия эталонным моделям информационной безопасности. Оценка соответствия внутренних показателей предприятия эталонным моделям информационной безопасности позволит определить текущий уровень информационной безопасности предприятия и повысить его за счет реализации мер информационной безопасности, описанных в эталонной модели, но не реализованных ранее. Для оценки соответствия внутренних показателей предприятия эталонным моделям информационной безопасности может быть использована методика, представленная на рис. 2.

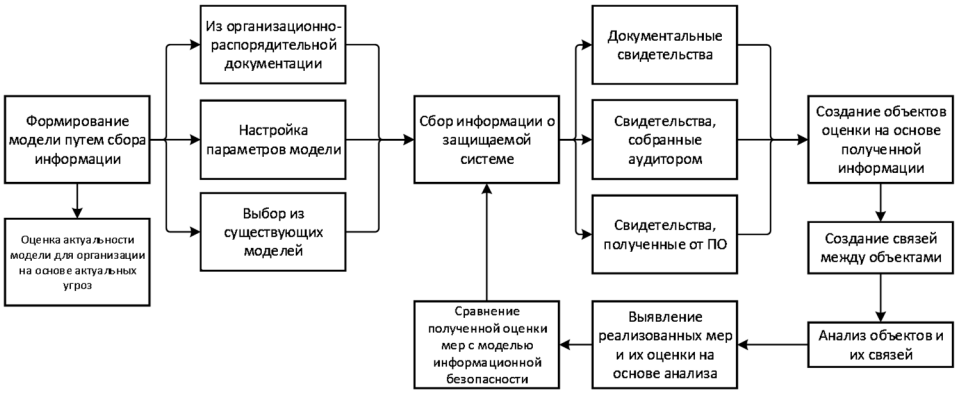


Рис. 2. Методика оценки текущего уровня информационной безопасности

Fig. 2. Methodology for assessing the current level of information security

Данная методика может быть применена в программном обеспечении, которое позволит выполнить комплексную оценку текущего уровня информационной безопасности предприятия. Определение текущего уровня информационной безопасности предполагается за счет оценки соответствия модели текущего уровня и модели, выбранной предприятием в качестве эталонной для обеспечения информационной безопасности.

Для определения модели, выбранной предприятием в качестве эталонной, необходимо проанализировать организационно-распорядительную документацию предприятия в области информационной безопасности предприятия или выбрать модель из стандартов и нормативных правовых актов.

Для автоматизации сбора информации об используемой на предприятии модели информационной безопасности можно рассмотреть варианты, представленные в табл. 4.

Таблица 4

Table 4

Информация об используемой модели

Information on the model used

Из организационно-распорядительной информации	Выбор параметров модели	Выбор модели
– Автоматический поиск по ключевым словам в политике информационной безопасности и верхнеуровневых документах по информационной безопасности – Поиск информации по ключевым словам о параметрах модели информационной безопасности в проектной документации, инструкциях пользователей и администраторов, низкоуровневых регламентах, описывающих настройки – Формирование модели информационной безопасности за счет приведения документации к единому формату, который позволяет сконвертировать информацию о мерах в документы формата json, csv и т. п.	Аудитор самостоятельно выбирает параметры модели информационной безопасности, дополняя шаблоны моделей или модели, сформированные после автоматизированного анализа документов по информационной безопасности	Аудитор выбирает готовые шаблоны моделей информационной безопасности, сформированные на основе нормативных правовых документов и международных стандартов

В качестве долгосрочной перспективы использования программного обеспечения для автоматизации оценки текущего уровня информационной безопасности можно рассмотреть вариант формирования модели за счет приведения документации к единому формату, который позволяет сконвертировать информацию о мерах в документы формата json, csv и т. п.

Оценка текущего уровня информационной безопасности предприятия является комплексной и включает в себя определение реализованных мер информационной безопасности для всех объектов информационной инфраструктуры. Поскольку для разных объектов информационной инфраструктуры предприятия требуется реализовывать разный набор мер, то при формировании эталонной модели информационной безопасности, которую использует предприятие, требуется использовать объектно ориентированные методы моделирования. Также поскольку у типовых объектов информационной инфраструктуры может быть использован разный набор мер информационной безопасности или набор мер, отличный от набора мер эталонной модели информационной безопасности, то в случае моделирования текущего уровня информационной безопасности предприятия требуется использовать объектно ориентированные методы моделирования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной статьи были рассмотрены стандарты, нормативные правовые акты и научные исследования в области информационной безопасности, что позволило выявить основные критерии модели информационной безопасности; сформировать перечень свидетельств, позволяющих контролировать реализацию мер информационной безопасности; выявить общие признаки критериев и свидетельств, достаточных для группирования и систематизации; выявить виды свидетельств; сформировать методику оценки текущего уровня информационной безопасности предприятия; выявить способы автоматизации сбора информации об используемой предприятием модели информационной безопасности и свидетельств реализации мер информационной безопасности.

В работе выявлены общие для каждого рассматриваемого стандарта критерии и свидетельства, что позволило разработать методику оценки текущего уровня информационной безопасности, а также систематизировать имеющиеся знания о моделях информационной безопасности и решить проблемы трудоемкости анализа и выбора актуальной для информационной инфраструктуры предприятия модели информационной безопасности.

Исходя из полученной информации можно сделать вывод, что наилучшим принципом, лежащим в основе программного обеспечения, позволяющего автоматизировать оценку текущего уровня информационной безопасности предприятия, является формирование моделей объектов информационной инфраструктуры предприятия и присвоение им характеристик, описанных в стандартах, нормативных правовых актах и организационно-распорядительной документации в области информационной безопасности предприятия. Затем требуется сформировать модели объектов информационной инфраструктуры и присвоить им характеристики, соответствующие актуальным на момент проведения аудита, далее сравнить данные модели объектов.

В качестве примера реализации программного обеспечения, создающего модели объектов информационной инфраструктуры, можно взять программное обеспечение Maltego, Bloodhound.

Выявленные критерии информационной безопасности позволят сформировать наиболее актуальный перечень мер, пункты которого не будут повторяться и будут соответствовать моделям информационной безопасности, рассматриваемым в современных исследованиях и стандартах по информационной безопасности. Сформированный перечень свидетельств позволит разработать способ автоматизации контроля реализации мер информационной безопасности. Автоматизация процесса контроля реализации мер информационной безопасности позволит уменьшить трудоемкость процесса выявления текущего уровня информационной безопасности у предприятий за счет сравнения модели информационной безопасности, используемой предприятием, и фактически реализованных мер.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке гранта РФФИ 19-29-06099-мк.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 11 февраля 2013 г. № 17 «Об утверждении Требований о защите информации, не составляющей государственную тайну, содержащейся в государственных информационных системах». – URL: https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702 (дата обращения: 03.03.2023).

2. Приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 18 февраля 2013 г. № 21 «Об утверждении состава и содержания организационных и технических мер по обеспечению безопасности персональных данных при их обработке в информационных системах персональных данных». – URL: https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/691-prikaz-fstek-rossii-ot-18-fevralya-2013-g-n-21 (дата обращения: 03.03.2023).

3. Приказ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 25 декабря 2017 г. № 239 «Об утверждении требований по обеспечению безопасности значимых объектов критической информационной инфраструктуры Российской Федерации». – URL: https://fstec.ru/en/53-normotvorcheskaya/akty/prikazy/1592-prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239 (дата обращения: 03.03.2023).

4. Методический документ Федеральной службы по техническому и экспортному контролю от 11 февраля 2014 г. «Меры защиты информации в государственных информационных системах». – URL: https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/805-metodicheskij-dokument (дата обращения: 03.03.2023).

5. ГОСТР ИСО/МЭК 27000–2021. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Общий обзор и терминология: взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 27000–2012: дата введения 2021–11–30. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – 28 с.

6. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2021. Методы и средства обеспечения безопасности. Системы менеджмента информационной безопасности. Требования: взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 27001–2006: введ. 2022–01–01. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – 23 с.

7. ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002–2021. Методы и средства обеспечения безопасности. Свод норм и правил применения мер обеспечения информационной безопасности: взамен ГОСТ Р ИСО/МЭК 27002–2012: введ. 2021–11–30. – М.: Рос. ин-т стандартизации, 2021. – 68 с.

8. NIST SP 800-53 Rev. 5. Security and privacy controls for information systems and organizations: – September 2020. – 492 p.

9. NIST SP 800-53A Rev. 5. Security and privacy controls for Information systems and organizations: – January 2022. – 733 p.

10. NIST SP 800-53B Rev. 5. Security and privacy controls for information systems and organizations. – October 2022. – 85 p.

11. Framework for improving critical infrastructure cybersecurity. Version 1.1 / National Institute of Standards and Technology. – NIST, April 16, 2018. – 55 p.

12. Payment Card Industry Data Security Standard (PCI DSS). Requirements and Security Assessment Procedures. Version 3.2.1. – May 2018. – 139 p.

13. Secure Controls Framework: website. – URL: https://www.securecontrolsframework.com/ (accessed: 03.03.2023).

14. *Sommestad T.* A framework and theory for cyber security assessments: Dr. of Philosophy diss. / Royal Institute of Technology. – Stockholm, Sweden, 2012. – 248 p.

15. Проблемные вопросы информационной безопасности киберфизических систем / Д.С. Левшун, Д.А. Гайфулина, А.А. Чечулин, И.В. Котенко // Информатика и автоматизация. – 2020. – Т. 19, № 5. – С. 1050–1088.

16. Choosing models for security metrics visualization / M. Kolomeec, G. Gonzalez-Granadillo, E. Doynikova, A. Chechulin, I. Kotenko, H. Debar // Computer Network Security. MMM-ACNS 2017. – Springer-Verlag, 2017. – P. 75–87. – (Lecture Notes in Computer Science; vol. 10446).

Клишин Данил Владимирович, аспирант Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО». Основное направление научных исследований – информационная безопасность. E-mail: dvklishin@itmo.ru

Чечулин Андрей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник лаборатории проблем компьютерной безопасности Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Санкт-Петербургский федеральный исследовательский центр Российской академии наук». Основное направление научных исследований – информационная безопасность. E-mail: andreych@bk.ru

Klishin Danil V., a post-graduate student, Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics. His research interests are currently focused on information security. E-mail: dvklishin@itmo.ru

Chechulin Andrey A., PhD (Eng.), an associate professor, St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences. His research interests are currently focused on information security. E-mail: andreych@bk.ru.

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-37-54

Analysis of information security standards[*]

D.V. KLISHIN[1,a], *A.A. CHECHULIN*[2,b]

[1] *Saint-Petersburg National Research University of Information Technologies, Mechanics and Optics, Kronverksky Prospekt 49, bldg. A, St. Petersburg, 197101, Russian Federation*

[2] *St. Petersburg Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences, 14 liniya, 39, St, Petersburg, 199178, Russian Federation*

[a] *dvklishin@itmo.ru* [b] *andreych@bk.ru*

Abstract

The purpose of the work is to systematize the available knowledge about information security models presented in standards and scientific research to solve the problem of labor intensity: analysis and selection of an information security model relevant to the information infrastructure of the enterprise; and assessment of the current level of information security of the enterprise.

When in identifying and analyzing the information security models used, standards, regulatory legal acts and scientific research in the field of information security are considered within the framework of this work. The systematization of knowledge about information security models was carried out with the help of analysis of standards, scientific research, normative legal acts on information security; identifying common properties of information security models; grouping criteria and evidence confirming the implementation of information security measures by common signs; identifying ways to automate the assessment of the current level of information security.

In the course of the work: the main criteria of the information security model were identified; a list of certificates was formed that allow monitoring the implementation of information security measures; common features of criteria, certificates sufficient for grouping were revealed; types of certificates were identified; an algorithm for assessing the current level of information security of an enterprise was formed; methods of automatization of collecting information about models of information security used by an enterprise and evidence of the implementation of information security measures were identified .

This work systematizes knowledge about the existing models and allows analyzing the criteria of information security without a need to study all the standards and scientific papers

[*] *Received 20 September 2022.*

considered in this work, which reduces the labor intensity of the analysis and selection of an information security model relevant to the information infrastructure of an enterprise. The results of this work will be applied to identify the possibility of automating the assessment of the current level of information security of an enterprise.

Keywords: information security, information security level, information security level assessment, information security model, information security criteria, certificates, requirements, standards

REFERENCES

1. Order of the FSTEC of Russia No. 17 dated February 11, 2013 “On the approval of the Requirements for the protection of information that does not constitute a state secret contained in state information systems”. (In Russian). Available at: https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/702 (accessed 03.03.2023).

2. Order of the FSTEC of Russia No. 21 dated February 18, 2013 “On the approval of the Composition and content of organizational and technical measures to ensure the security of personal data during their processing in personal data information systems”. (In Russian). Available at: https://fstec.ru/normotvorcheskaya/akty/53-prikazy/691-prikaz-fstek-rossii-ot-18-fevralya-2013-g-n-21 (accessed 03.03.2023).

3. Order of the FSTEC of Russia No. 239 dated December 25, 2017 “On approval of requirements for ensuring the security of significant objects of critical information infrastructure of the Russian Federation”. (In Russian). Available at: https://fstec.ru/en/53-normotvorcheskaya/akty/prikazy/1592-prikaz-fstek-rossii-ot-25-dekabrya-2017-g-n-239 (accessed 03.03.2023).

4. Methodical document of the FSTEC of Russia dated February 11, 2014 “Information protection measures in state information systems”. (In Russian). Available at: https://fstec.ru/tekhnicheskaya-zashchita-informatsii/dokumenty/114-spetsialnye-normativnye-dokumenty/805-metodicheskij-dokument (accessed 03.03.2023).

5. GOST ISO/MEK 27000–2021. *Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Sistemy menedzhmenta informatsionnoi bezopasnosti. Obshchii obzor i terminologiya* [State standard GOST R ISO/MEK 27000–2021. Information technology. Security techniques. Information security management systems. Overview and vocabulary]. Moscow, Russian Standardization Institute Publ., 2021. 28 p.

6. GOST R ISO/MEK 27001–2021. *Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Sistemy menedzhmenta informatsionnoi bezopasnosti. Trebovaniya* [State standard GOST R ISO/MEK 27001–2021. Information technology. Security techniques. Information security management systems. Requirements]. Moscow, 2021. 23 p.

7. GOST ISO 27002–2021. *Metody i sredstva obespecheniya bezopasnosti. Svod norm i pravil primeneniya mer obespecheniya informatsionnoi bezopasnosti* [State standard GOST ISO 27002–2021. Information technology. Security techniques. Code of practice for information security controls]. Moscow, 2021. 68 p.

8. NIST SP 800-53 Rev. 5. *Security and privacy controls for information systems and organizations*. September 2020. 492 p.

9. NIST SP 800-53A Rev. 5. *Security and privacy controls for Information systems and organizations*. January 2022. 733 p.

10. NIST SP 800-53B Rev. 5. *Security and privacy controls for information systems and organizations*. October 2022. 85 p.

11. NIST. *Framework for Improving Critical Infrastructure Cybersecurity*. Version 1.1. April 16, 2018. 55 p.

12. Payment Card Industry Data Security Standard (PCI DSS). *Requirements and Security Assessment Procedures*. Version 3.2.1. May 2018. 139 p.

13. Secure Controls Framework. Website. Available at: https://www.securecontrolsframework.com/ (accessed 03.03.2023).

14. Sommestad T. *A framework and theory for cyber security assessments*. Dr. of Philosophy diss. Royal Institute of Technology. Stockholm, Sweden, 2012. 248 p.

15. Levshun D., Gaifulina D., Chechulin A., Kotenko I. Problemnye voprosy informatsionnoi bezopasnosti kiberfizicheskikh sistem [Problematic issues of information security of cyber-physical systems]. *Informatika i avtomatizatsiya = Informatics and Automation*, 2020, vol. 19, no. 5, pp. 1050–1088.

16. Kolomeec M., Gonzalez-Granadillo G., Doynikova E., Chechulin A., Kotenko I., Debar H. Choosing models for security metrics visualization. Computer Network Security. MMM-ACNS 2017. Springer-Verlag, 2017, pp. 75–87.

Для цитирования:

Клишин Д.В., Чечулин А.А. Анализ стандартов обеспечения информационной безопасности // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 1 (89). – С. 37–54. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-37-54.

For citation:

Klishin D.V., Chechulin A.A. Analiz standartov obespecheniya informatsionnoi bezopasnosti [Analysis of information security standards]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 37–54. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-37-54.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 89, № 1, 2023, с. 55–80

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 89, No. 1, 2023, pp. 55–80

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

УДК 681.2

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-55-80

Высокочастотная электромагнитная система для деструкции биологических тканей *

С.В. БЕЛАВСКАЯ[a], Л.И. ЛИСИЦЫНА[b], А.Н. КУЗЬМИН[c], Е.К. ВИНСКАЯ[d], Л.Г. НАВРОЦКИЙ[e], В.П. РАЗИНКИН[f], А.А. БЛОХИН[g]

630073, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *Svetlana.belana@yandex.ru* [b] *lisitcinali@gmail.com* [c] *anton@kuz-min.ru*
[d] *katerinavns@gmail.com* [e] *leonid.navrotsky@gmail.com* [f] *razinkin_vp@mail.ru*
[g] *snakebss@mail.ru*

Рассмотрена возможность использования воздействующего электромагнитного излучения в высокочастотном диапазоне для проведения абляции биологических тканей (мягких и повышенной плотности). Дан сравнительный анализ характеристик абляции, выполненной при помощи электромагнитного излучения СВЧ-диапазона (метод микроволновой абляции (МВА)) и высокочастотного (ВЧ) диапазона. Экспериментально выявлено, что характеристики абляции, выполненной обоими методами, близки друг к другу. Предложены и экспериментально проверены методики ВЧ-абляции, выполненной по неинвазивному и инвазивному способам. Предложен лазерный контроль степени деструкции биологической ткани, увеличивающий достоверность контроля. Эксперименты проведены с использованием высокочастотного генератора на фиксированной частоте 13,56 МГц, созданного с участием авторов настоящей работы. Использование ВЧ-генератора обеспечило проведение воздействия на биологическую ткань с излучателем игольчатого типа (медицинская сталь) без замкнутого электрического контура. В качестве биоптата использованы свиной кожный покров и мышцы крупного рогатого скота. Выполнены процессы выжигания объекта воздействия, резекции и коагуляции. Показано, что при ВЧ-абляции (ВЧА) происходит нагрев ткани до 120 °С. Для исследования температуры в очаге воздействия использован мультиметр с функцией тепловизора CEM DT-898 производства ФРГ. Такой мультиметр позволяет провести захват участка с максимальной температурой в месте разряда, который возникает при приближении излучателя к кожному покрову и нагревает кожный покров до определенной температуры, в результате чего и возникает термическая абляция. Выявлено, что ВЧ-абляция происходит практически без влияния на окружающие ткани. Разработана и выполнена высокочастотная электромагнитная система для проведения экспериментальных исследований. По результатам работы предложено абляцию биологической ткани проводить с использованием отечественных ВЧ-генераторов.

* *Статья получена 17 августа 2022 г.*

Ключевые слова: биологическая ткань, абляция термическая, микроволновая, высокочастотная, разряд, температура, электрическое сопротивление, деструкция, степень, качество, лазерный контроль

ВВЕДЕНИЕ

XXI век – век бурного внедрения технологий радиоволновой хирургии. Использование для деструкции и разрушения биологических тканей живых организмов энергии электромагнитного (ЭМ) излучения сегодня находит всё большее применение и с каждым днем всё шире внедряется в практику. Абляция как метод разрушения биологической ткани без ее физического удаления сегодня широко используется в медицинской практике [1–24]. В настоящее время абляцию биологических тканей используют в косметологии, ортопедии, травматологии, хирургии, онкологии и др. Абляция может быть термическая и нетермическая [5]. Наиболее часто используемые виды термической абляции: радиочастотная (РЧА) и микроволновая (МВА). Рабочая частота радиочастотной абляции – от 150 до 500 кГц, рабочая частота микроволновой абляции – 945…2450 МГц [1–24]. Радиочастотные генераторы начали систематически применять в 90-х годах XX века для радиочастотной абляции опухолей. Генераторы для МВА стали серийно производить в первом десятилетии XXI века [6, 7]. Авторы [6, 7] впервые в России применили систему для МВА «Evident» (США), работающую на частоте 915 МГц, при лечении злокачественных новообразований печени. В результате проведенных исследований было сделано заключение о высокой эффективности метода МВА. Сегодня считается, что микроволновая абляция предпочтительнее радиочастотной. Однако в настоящее время для осуществления МВА в России используются в основном зарубежные дорогостоящие микроволновые генераторы, поставки которых сегодня затруднены. Кроме того, МВА имеет ряд недостатков, которые можно ликвидировать, используя ВЧ-генераторы.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Исследовать возможность использования энергии ВЧ электромагнитного излучения для проведения абляции глубокорасположенных, злокачественных, плотных (костных и хрящевых) биологических тканей. Провести сравнительный анализ характеристик абляции биологических тканей, выполненной электромагнитным излучением ВЧ- и СВЧ-диапазонов. Рассмотреть возможность повышения достоверности контроля качества и степени деструкции биологических тканей.

2. ТЕОРИЯ

Сегодня методами хирургии, хорошо себя зарекомендовавшими и широко используемыми на практике, являются электро- и радиоволновые методы. Использование воздействия на биологические ткани электромагнитным излучением СВЧ-диапазона обладает рядом неоспоримых преимуществ [6–10]:

– отсутствие замкнутой электрической цепи и нейтральных электродов и, следовательно, связанных с ними неблагоприятных воздействий на организм;

– возможность работы с тканями повышенной плотности;
– независимость от электрофизических свойств объекта воздействия;
– хорошо регулируемая и контролируемая зона некроза;
– небольшое время воздействия;
– отсутствие ограничений при лечении опухолей, прилежащих к сосудам диаметром более трех миллиметров;
– возможность повышения температуры до 120 °С и более.

Однако использование метода на практике затруднено в связи со сложностью передачи СВЧ-энергии (возникает сильный нагрев антенны, и, следовательно, требуется система активного охлаждения штифта), с использованием СВЧ-излучения, вредного для организма в целом, а также с высокой ценой систем МВА, имеющихся на рынке.

Воздействие электромагнитным излучением высокочастотного диапазона (3…30 МГц согласно ГОСТ Р 52002–2003) лишено вышеперечисленных недостатков. Поэтому использование воздействия ЭМ-излучением высокочастотного диапазона для целей абляции биологических тканей более предпочтительно.

В настоящее время все известные приборы высокочастотной электромагнитной деструкции используются для проведения поверхностных, неглубоких операций (удаление папиллом, родинок и т. д.), поэтому разработка ВЧ электромагнитной системы для деструкции глубоких, плотных тканей (костных, хрящевых), а также злокачественных новообразований является актуальнейшей задачей современности.

3. РАЗРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ

3.1. ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИБОРЫ И УСТРОЙСТВА

1. ВЧ-генератор.

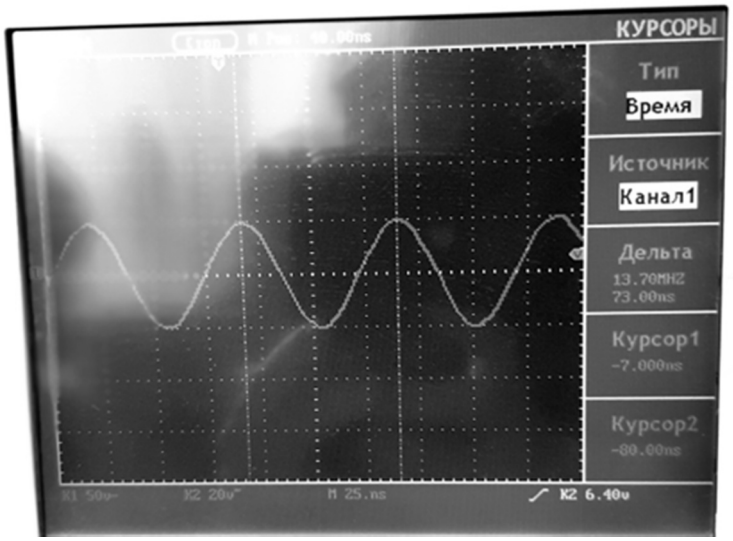
ВЧ-генератор на фиксированной частоте 13,56 МГц (ГВЧ-1б, разработанный и выполненный соавторами настоящей статьи), который имеет следующие параметры:

• частота генерируемого электрического излучения:
– без нагрузки 13,56 МГц;
– с нагрузкой 13,50 МГц;
• выходная мощность 100…150 Вт;
• значение мощности в рабочей зоне 100…120 Вт;
• внешние габариты 240 × 320 × 430 мм;
• изменение параметров при изменении температуры окружающей среды от 0 до 40 °С и влажности от 0 до 70 %:
– уход частоты 0,1 %;
– изменение выходной мощности в рабочей зоне 5 %;
• уровень радиопомех, создаваемых при работе генератора, не превышает значений, установленных ГОСТ 23450-79.

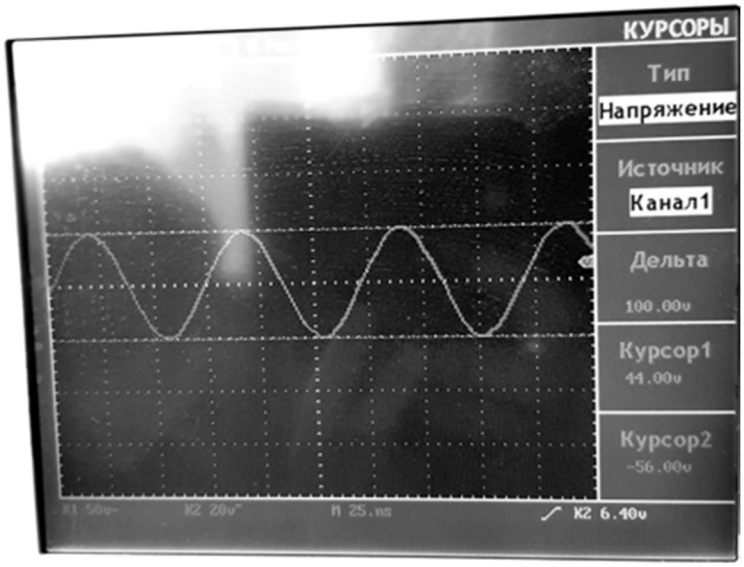
Генератор прошел полные технические испытания, рекомендован для использования и внедрен на производственных предприятиях г. Новосибирска и г. Москвы.

2. Генератор электромагнитного излучения на частоте 2450 МГц.
3. ВЧ-излучатель игольчатого типа (медицинская сталь).
4. Осциллограф OWON PDS 5022S.

На рис. 1 представлен пример осциллограммы выходного сигнала генератора ГВЧ-1б, полученного на осциллографе OWON PDS 5022S, где зафиксирована амплитуда 50 В и рабочая частота.



a



b

Рис. 1. Осциллограмма выходного сигнала генератора ГВЧ-1б:

а – курсорами на осциллограмме показана частота сигнала; *б* – курсорами на осциллограмме показан размах сигнала

Fig. 1. Waveform of the output signal of the generator GVCH-1b:

a is the cursors on the waveform show the frequency of the signal; *b* is the cursors on the waveform show the scope of the signal

5. Мультиметр CEM DT-898.

Для исследования температуры в очаге воздействия использован мультиметр с функцией тепловизора производства ФРГ (рис. 2). Используемый мультиметр позволяет провести захват участка с максимальной температурой в месте разряда.

Рис. 2. Внешний вид мультиметра CEM DT-898 с функцией тепловизора

Fig. 2. Appearance of the CEM DT-898 multimeter with the function of a thermal imager

6. Цифровой измеритель иммитанса Tonghui TH2822A для измерения электрического сопротивления.

7. Многокаскадный фотоэлектронный умножитель ФЭУ-97 с умножительной системой на 14 жалюзийных динодах, расположенный в затемненной камере.

8. Выпрямитель стабилизированный ВС-22 (для питания ФЭУ-97).

9. Полупроводниковый инжекционный лазер видимого диапазона с длиной волны 650 нм и мощностью 100 мВт.

10. Оптоволокно MMF.

11. Цифровой миллиамперметр.

3.2. БИОПТАТ

В эксперименте исследованию были подвергнуты биоптат мышечных тканей крупного рогатого скота и свиной кожный покров, так как в медико-биологических разработках первичные исследования принято проводить на тканях животных, биохимические и физиологические характеристики которых близки к человеческим [20].

3.3. БЛОК-СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ (ВЫСОКОЧАСТОТНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ)

На основе описанных приборов и устройств разработана установка для проведения экспериментальных исследований. Блок-схема установки представлена на рис. 3.

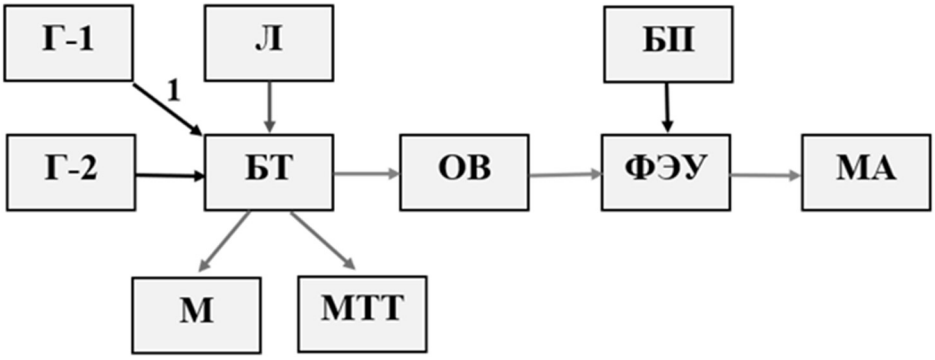


Рис. 3. Блок-схема установки для исследования:

БТ – биологическая ткань; ОВ – оптическое волокно; ФЭУ – фотоэлектронный умножитель; МА – миллиамперметр; Г-1 – генератор ЭМ-колебаний с частотой 2450 МГц; *1* – электромагнитный излучатель; Г-2 – генератор ЭМ-колебаний с частотой 13,56 МГц; Л – лазер; М – мультиметр; БП – блок питания, МТТ – мультиметр с функцией тепловизора

Fig. 3. Block diagram of the device for research:

БТ is a biological tissue; ОВ is an optical fiber; ФЭУ –is a photoelectronic multiplier; МА is a milliammeter; Г-1 is an electromagnetic oscillator with a frequency of 2450 MHz; *1* is an electromagnetic emitter; Г-2 is an electromagnetic oscillator with a frequency of 13,56 MHz; Л is a laser; M is amultimeter; БП is a power unit, МТТ is a multimeter with the thermal imager function

4. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Все экспериментальные исследования проведены на установке (высокочастотной электромагнитной системе), блок-схема которой представлена на рис. 3.

4.1. ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗМОЖНОСТИ ПРОВЕДЕНИЯ АБЛЯЦИИ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Для подтверждения возможности проведения высокочастотной электромагнитной абляции биологической ткани необходимо проверить осуществимость процессов резекции, выжигания и коагуляции. Результаты исследований представлены на рис. 4–9.

На рис. 4 представлена фотография разреза свиного кожного покрова шириной 1 мм, глубиной 1,5 мм и протяженностью 35 мм, выполненного за 7 секунд воздействия ВЧ электромагнитного излучения. Излучатель – стержень диаметром ~ 1,3 мм.

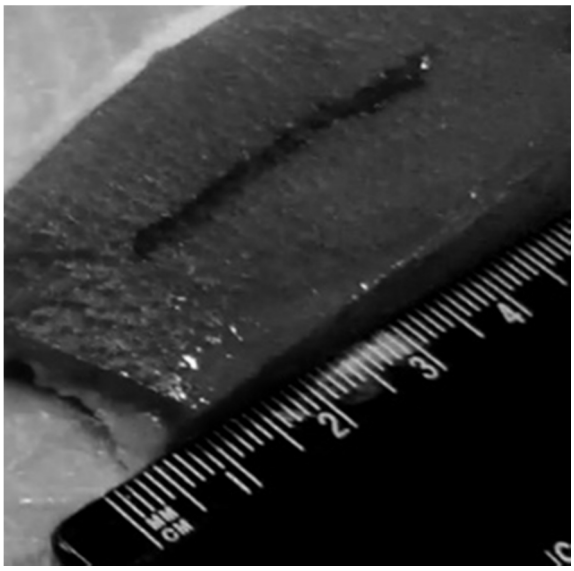


Рис. 4. Фотография разреза (резекции) кожного покрова

Fig. 4. Photo of the skin incision (resection)

На рис. 5 представлена фотография точечного прокола кожного покрова диаметром ~ 1…1,5 мм с коагуляцией краев, полученного за одну секунду при ВЧ-абляции.

На рис. 4 и 5 видно, что коагуляция краев разреза и прокола биологической ткани имеет ширину не более 0,3…0,5 мм.

В процессе абляции происходит изменение структуры ткани, проявляющееся в динамике таких параметров, как плотность, электрическое сопротивление, импеданс, объем и др. В настоящей работе изменение структуры биологических тканей оценивалось по динамике электрического сопротивления.

С целью выяснения влияния ВЧ-абляции на окружающие участки объекта воздействия проведено измерение электрического сопротивления кожного покрова после проведения ВЧ-абляции. Результаты измерения представлены на рис. 6, где четко видно, что на расстоянии 2…2,5 мм от участка, подвергшегося воздействию, электрическое сопротивление кожного покрова практически

остается без изменения, т. е. ВЧ-абляция осуществляется практически при отсутствии воздействия на окружающие ткани.

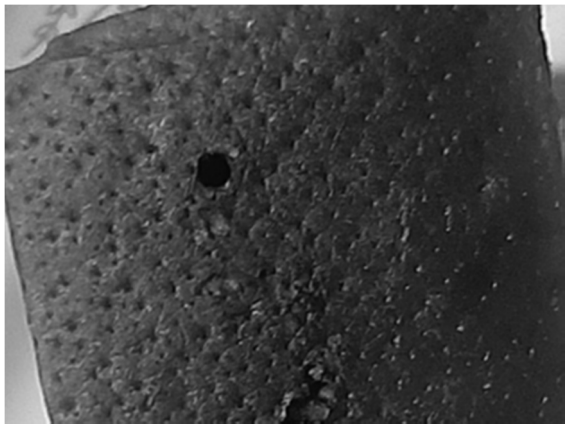


Рис. 5. Фотография кожного покрова с проколом, выполненным рабочим излучателем

Fig. 5. Photo of the skin with a puncture made by a working radiator

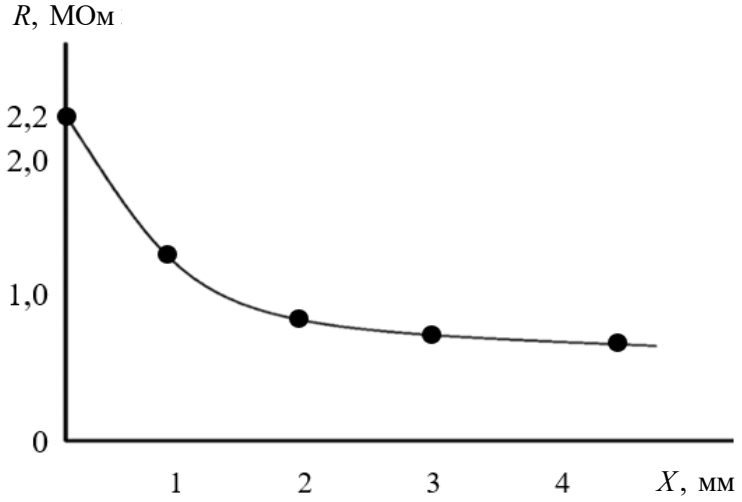


Рис. 6. Зависимость сопротивления кожного покрова от расстояния до разреза после проведения ВЧ-абляции

Fig. 6. Dependence of skin resistance on the distance to the incision after HF ablation

В некоторых случаях ВЧ-абляция возникает в результате возникновения электрического разряда. Разряд, нагревающий биологический объект до определенной температуры, возникает при приближении излучателя к биологической ткани, в результате чего возникает термическая абляция. На рис. 7 представлена фотография с фиксацией разряда между излучателем и поверхностью исследуемого кожного покрова.

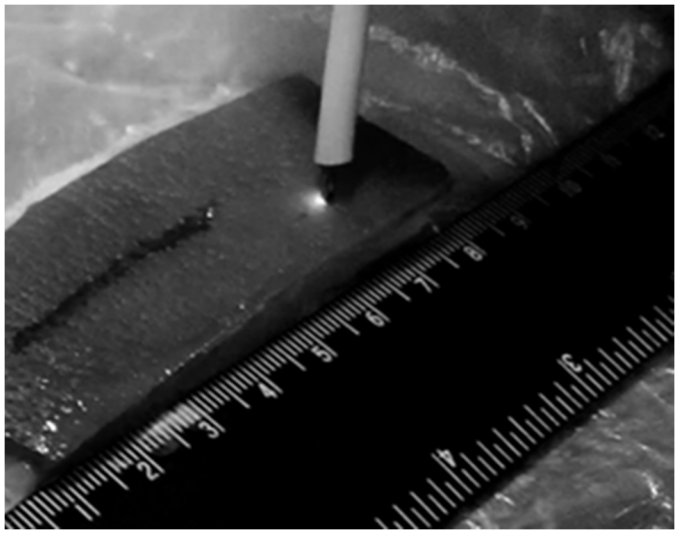


Рис. 7. Фотография разряда между излучателем и поверхностью кожного покрова при осуществлении ВЧ-абляции

Fig. 7. Photo of the discharge between the emitter and the surface of the skin during HF ablation

Используемый мультиметр с функцией тепловизора позволил провести захват участка с максимальной температурой в месте разряда. Пример фиксации температуры на дисплее мультиметра представлен на рис. 8, где температура в очаге воздействия составляет 124,4 °С.

Рис. 8. Пример фиксации температуры в очаге воздействия на экране мультиметра CEM DT-898

Fig. 8. An example of fixing the temperature in the focus of exposure on the screen of the multimeter CEM DT-898

Зависимость температуры от напряжения на аноде используемой лампы в генераторе ГВЧ-1б (в условных единицах) представлена на рис. 9, где явно видно, что температура в очаге воздействия ВЧ-абляции достигает 120 °С, чего вполне достаточно для резекции, коагуляции и выжигания патологического очага.

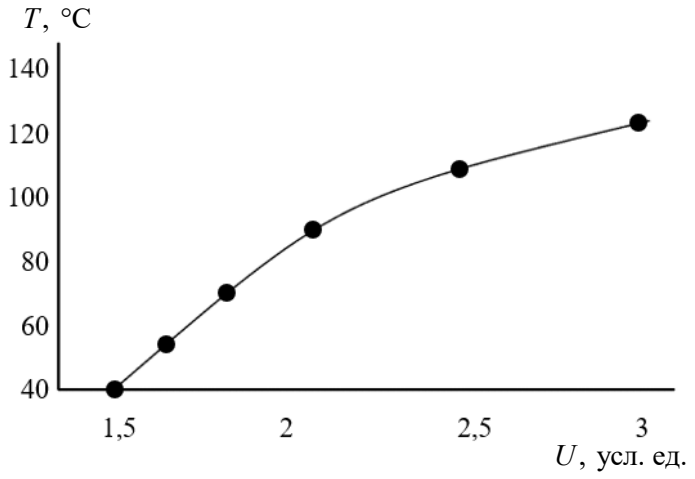


Рис. 9. Зависимость температуры очага воздействия от напряжения на аноде генераторной лампы

Fig. 9. Dependence of the temperature of the source of exposure on the voltage at the anode of the generator lamp

Анализируя результаты исследований, можно сделать вывод, что абляция биологических тканей в высокочастотном диапазоне воздействующего излучения возможна.

4.2. ВЫСОКОЧАСТОТНАЯ АБЛЯЦИЯ МЯГКИХ ТКАНЕЙ И ТКАНЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ

Абляция мягких биологических тканей и тканей повышенной плотности с помощью ВЧ электромагнитного излучения была проведена неинвазивным и инвазивным способами.

При проведении абляции на частоте 13,56 МГц использован излучатель, выполненный в виде закругленного на рабочем конце стального стержня (медицинская сталь) диаметром около 1,3 мм.

Для проведения абляции неинвазивным способом использован процесс сканирования излучателя диаметром ~ 2,5…3 мм по поверхности исследуемого образца.

На рис. 10 представлена фотография образца мягкой ткани после воздействия ВЧ электромагнитным излучением при сканировании излучателя по поверхности образца площадью около 1 см^2 со скоростью $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Область абляции на фотографии выглядит просветленным участком. Электрическое сопротивление исследуемого биоптата в области абляции – около 3 кОм.

Далее рассмотрены результаты экспериментальных исследований по ВЧ-абляции тканей, выполненной инвазивным способом путем прокола объекта воздействия излучателем, изготовленным в виде острой иглы, мощность излучения – около 60 Вт. На рис. 11 представлена фотография образца толщиной 16 мм и временем обработки 20 с (глубина прокола – на всю толщину образца, средний диаметр прокола ~2,5 мм). Деструкция осуществлена вокруг прокола на всю глубину (осветленный участок).

Рис. 10. Фотография образца, обработанного ВЧ электромагнитным излучением мощностью около 10 Вт

Fig. 10. Photo of a sample treated with HF electromagnetic radiation with a power of about 10 watts

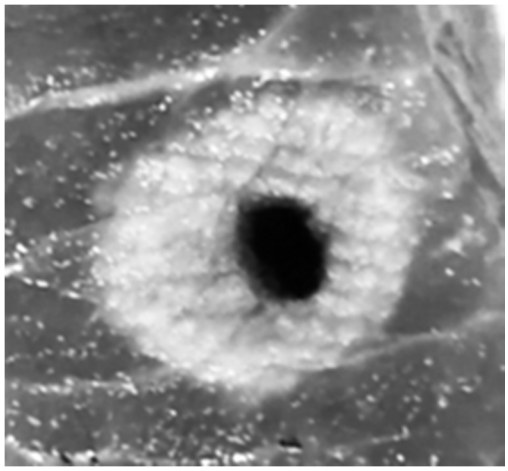


Рис. 11. Фотография образца, обработанного ВЧ электромагнитным излучением в течение 20 с

Fig. 11. Photo of a sample treated with HF electromagnetic radiation for 20 seconds

На рис. 12 представлена зависимость изменения электрического сопротивления исследуемого образца от расстояния между центром прокола и исследуемой точкой. Максимальное сопротивление – 5 кОм – соответствует участку с абляцией. На графике имеется характерный скачок сопротивления – это граница между частью образца с абляцией и без нее, и видно, что абляция образца произошла практически без влияния на окружающие участки ткани.

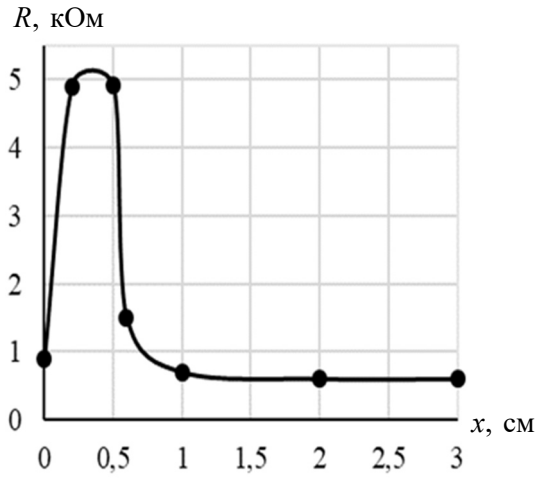


Рис. 12. Зависимость изменения электрического сопротивления исследуемого образца от расстояния «центр прокола – исследуемая точка»

Fig. 12. Dependence of the change in the electrical resistance of the test sample on the distance (the puncture center is the test point)

На рис. 13 представлена зависимость глубины прокола от времени обработки образцов ВЧ-излучением. Для примера на рис. 14 представлены фотографии образцов в разрезе с глубиной прокола: а) 1,3 мм, б) 9 мм, на которых видно, что при обработке образца в течение двух секунд (глубина прокола 1,3 мм) абляция (просветленная область) только начинает формироваться вокруг прокола, а при обработке в течение 14 секунд (глубина прокола 9 мм) область абляции занимает уже широкое пространство. На рис. 14 видно, что при увеличении глубины прокола участок абляции значительно увеличивается и достигает 15…20 мм.

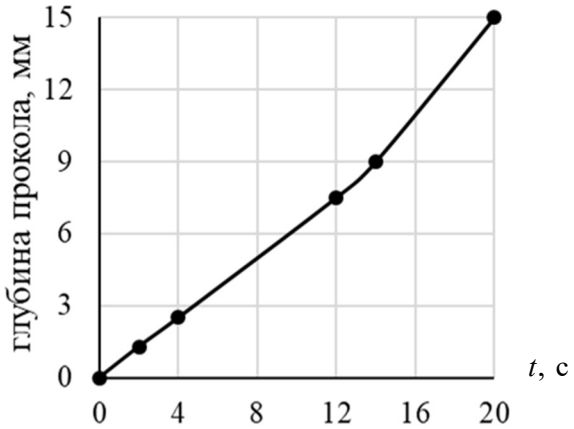
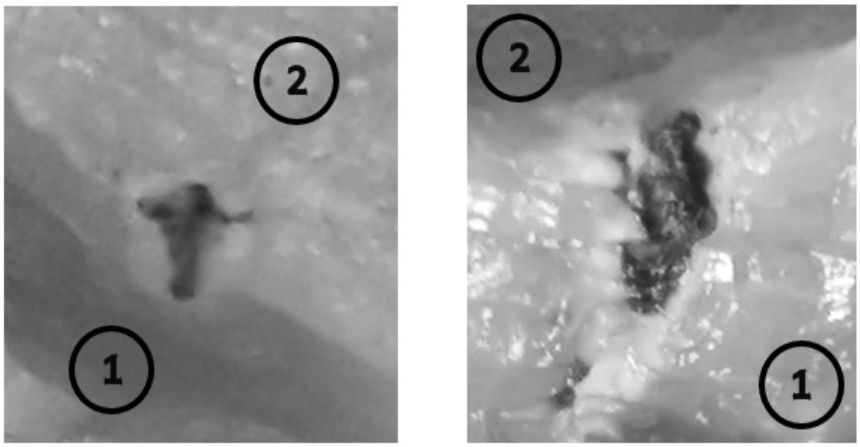


Рис. 13. Зависимость глубины прокола от времени ВЧ-обработки образцов

Fig. 13. Dependence of the puncture depth on the time of HF processing of samples



а *б*

Рис. 14. Фотографии образцов в разрезе с разной глубиной прокола:

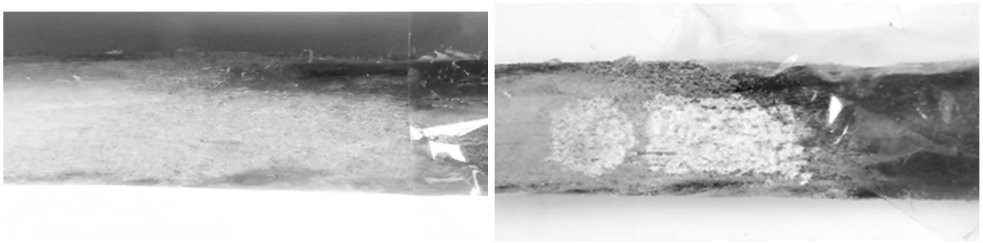
а – 1,3 мм; *б* – 9 мм; *1* – область среза; *2* – поверхность образца

Fig. 14. Photos of samples in the section with a different puncture depth:

a – 1,3 mm; *b* – 9 mm; *1* is a slice area; *2* is a sample surface

Для проведения абляции костных тканей неинвазивным способом использован процесс сканирования излучателя по поверхности исследуемого образца. Излучатель выполнен в виде стержня с закругленным рабочим концом. Сканирование по поверхности образца проводилось со скоростью примерно $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м/с.

На рис. 15 представлены фотографии образцов костной ткани до воздействия высокочастотным электромагнитным излучением и после воздействия мощностью 20 Вт при сканировании излучателя по поверхности образца площадью около 1…2 см^2. Область абляции на фотографии выглядит просветленным участком. При мощности ЭМ излучения 20 Вт разряд между поверхностью костной ткани и излучателем отсутствовал. Увеличение мощности излучения приводило к обугливанию участка абляции. Величина электрического сопротивления исследуемого биоптата в области абляции составила выше 100 МОм.



а *б*

Рис. 15. Фотографии образцов костных тканей:

а – до обработки ВЧ-излучением; *б* – после обработки высокочастотным электромагнитным излучением мощностью 20 Вт

Fig. 15. Photos of bone tissue samples:

a – before HF radiation treatment; *b* – after treatment with HF electromagnetic radiation with a power of 20 watts

Далее рассмотрены результаты экспериментов по ВЧ-абляции костной ткани, выполненной инвазивным способом при помощи прокола объекта воздействия излучателем, изготовленным в виде стержня диаметром ~1,3 мм. Прокол костной ткани осуществлялся при формировании разряда между излучателем и объектом воздействия.

На рис. 16 представлена фотография образца толщиной 9 мм и с временем обработки 20 секунд при мощности генератора около 60 Вт (глубина прокола – на всю толщину образца, средний диаметр прокола ~2,5 мм). Вокруг прокола – область абляции (осветленная область) шириной в среднем 2,5 мм и электрическим сопротивлением выше 100 МОм.

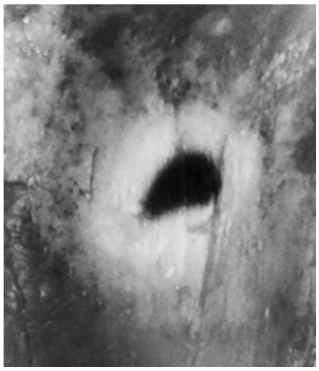


Рис. 16. Фотография образца костной ткани после высокочастотной инвазивной обработки

Fig. 16. Photo of a bone tissue sample after high-frequency invasive treatment

На рис. 17 приведена фотография участка хрящевой ткани, на которой высокочастотная абляция осуществлена также с помощью прокола. Видно, что абляции подвергнут участок хрящевой ткани (осветленный), расположенный вокруг прокола.

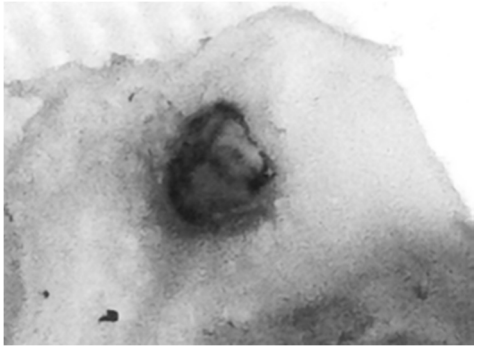


Рис. 17. Фотография участка хрящевой ткани после высокочастотной инвазивной обработки

Fig. 17. Photo of a section of cartilage tissue after high-frequency invasive treatment

Вывод по анализу проведенных исследований: метод высокочастотной абляции может быть использован для обработки как мягких тканей, так и тканей повышенной плотности (костных и хрящевых).

4.3. СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК АБЛЯЦИИ МЯГКИХ БИОЛОГИЧЕСКИХ ТКАНЕЙ И ТКАНЕЙ С ПОВЫШЕННОЙ ПЛОТНОСТЬЮ, ВЫПОЛНЕННОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ ВЧ- И СВЧ-ДИАПАЗОНОВ

Для сравнения характеристик абляции биологических тканей на высокой частоте были выполнены исследования СВЧ-абляции на рабочей частоте 2450 МГц. Использованы образцы мышечной ткани крупного рогатого скота толщиной 10 мм с начальным электрическим сопротивлением 500…600 Ом. На рис. 18 представлены фотографии исследуемых образцов, обработанных СВЧ-излучением в течение разного времени, на которых видно, что с увеличением времени воздействия изменяется степень и качество деструкции.

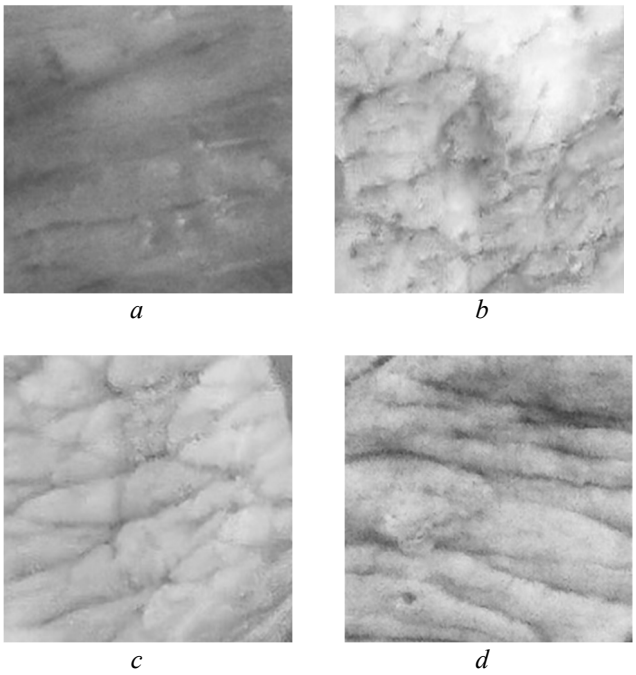


Рис. 18. Фотографии исследуемых образцов после обработки СВЧ-излучением в течение разного времени:

a – 0 мин, *b* – 1 мин, *c* – 1,5 мин, *d* – 2 мин

Fig. 18. Photos of the studied samples after treatment with microwave radiation for different times:

a – 0 min, *b* – 1 min, *c* – 1,5 min, *d* – 2 min

На рис. 19 представлена зависимость изменения электрического сопротивления исследуемых образцов от времени обработки СВЧ излучением. Образец, представленный на рис. 18, *d*, подвергнут наибольшей объемной деструкции. Электрическое сопротивление этого образца – около 3 кОм, что соответствует данным ВЧ-абляции, представленным на рис. 12.

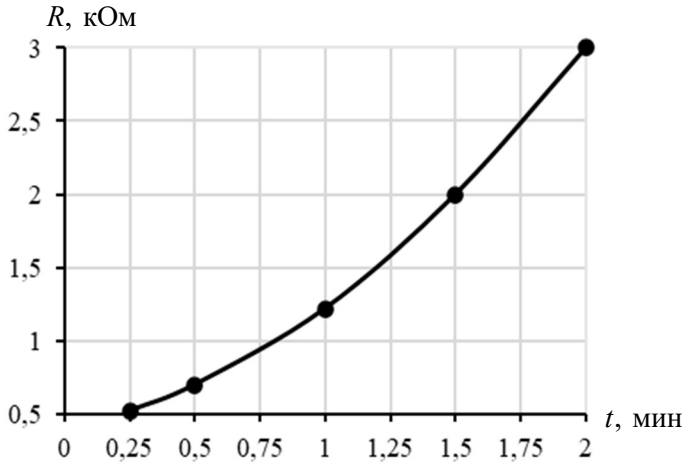


Рис. 19. Зависимость электрического сопротивления исследуемых образцов от времени обработки СВЧ-излучением

Fig. 19. Dependence of the electrical resistance of the studied samples on the time of treatment with microwave radiation

Для оценки параметров абляции костной ткани, выполненной по предлагаемому методу, было проведено сравнение с характеристиками абляции, выполненной методом МВА.

Образец участка очищенной костной ткани (рис. 20) подвергся СВЧ-излучению на рабочей частоте 2450 МГц. При этом изменялась структура ткани и ее цвет: поверхность костной ткани становилась осветленной (практически белой). Изменение структуры костной ткани оценивалось по динамике электрического сопротивления. До проведения МВА величина электрического сопротивления исследуемого образца составляла 20 кОм. После воздействия в течение 15 секунд сопротивление возросло до 30 кОм, после воздействия в течение 30 секунд величина сопротивления оказалась выше 100 МОм (рис. 21), что соответствует результатам ВЧ-абляции.

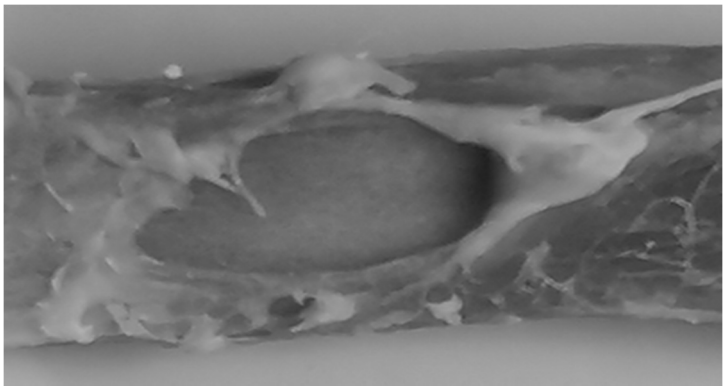


Рис. 20. Образец костной ткани до проведения абляции

Fig. 20. A sample of a bone tissue before ablation

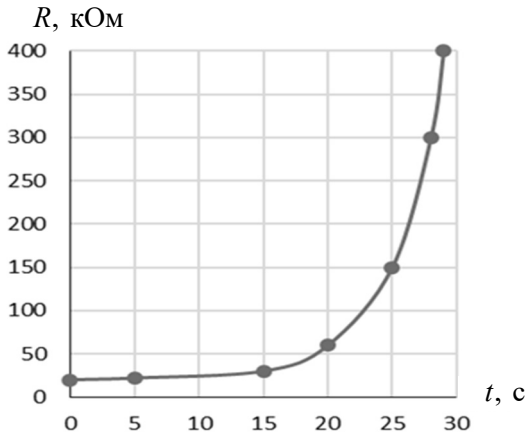


Рис. 21. Зависимость электрического сопротивления костной ткани от времени обработки СВЧ-излучением

Fig. 21. Dependence of the electrical resistance of a bone tissue on the time of treatment with microwave radiation

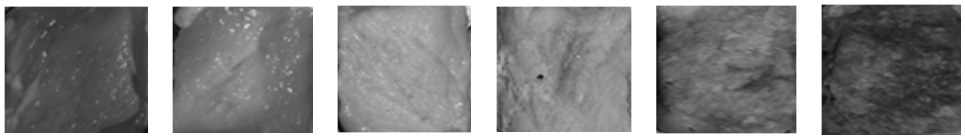
Следовательно, характеристики абляции, выполненной ВЧ-излучением, не уступают характеристикам абляции, выполненной СВЧ-излучением.

4.4. КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И СТЕПЕНИ ДЕСТРУКЦИИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ ТКАНИ

Состояние поверхности биологического объекта возможно оценить визуально, с помощью электронных микроскопов, с помощью импедансометрии, ультразвуковыми и оптическими методами и др. В настоящей работе для более достоверного контроля качества и степени деструкции биологических тканей выбран оптический метод с использованием лазерного излучения.

В эксперименте исследованию были подвергнуты биоптат мышечных тканей и биоптат тканей повышенной плотности (костной) крупного рогатого скота. Исследования были проведены на частотах электромагнитного излучения 13,56 МГц и 2450 МГц.

На рис. 22 представлены фотографии, обработанные МВА в течение разного времени.



a *b* *c* *d* *e* *f*

Рис. 22. Фотографии исследуемых образцов после обработки СВЧ-излучением в течение разного времени:

a) 0 с, *b*) 5 с, *c*) 10 с, *d*) 15 с, *e*) 30 с, *f*) 45 с

Fig. 22. Photos of the samples under study after treatment with microwave radiation for different times:

a) 0 s, *b*) 5 s, *c*) 10 s, *d*) 15 s, *e*) 30 s, *f*) 45 s

Как и ранее, качество и степень деструкции биологических тканей оценивались с помощью измерения электрического сопротивления. С увеличением времени воздействия электрическое сопротивление биологических тканей тоже увеличивается. На рис. 23 представлена зависимость сопротивления биологических тканей от времени обработки ЭМ-излучением на частоте 2450 МГц. После обработки в течение 15 секунд сопротивление резко возросло и при времени обработки в течение 30 секунд составило 24 МОм. При обработке биологической ткани в течение 45 секунд значение электрического сопротивления составило более 100 МОм, т. е. оценка качества и степени деструкции с помощью измерения электрического сопротивления затруднена.

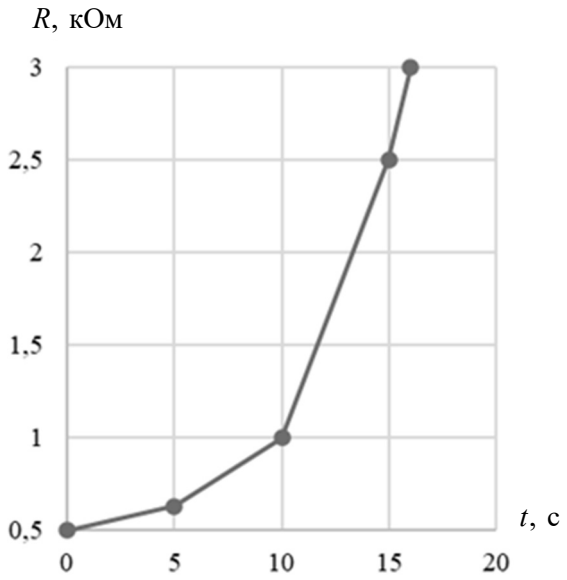


Рис. 23. Зависимость электрического сопротивления биологических тканей от времени обработки методом МВА

Fig. 23. Dependence of the electrical resistance of a biological tissue on the time of treatment by the MWA method

Предложено качество и степень деструкции оценить с помощью разработанной экспериментальной установки, использующей лазерное излучение, блок-схема которой представлена на рис. 3. На рис. 24 представлена зависимость выходного тока ФЭУ от времени обработки. Как и следовало ожидать, с увеличением времени обработки сигнал, отраженный от биологической ткани, а следовательно, и выходной ток ФЭУ увеличиваются в результате увеличения плотности ткани. При обработке ЭМ-излучением более 15 секунд биологическая ткань начинает сгорать, обеспечивая меньшее отражение. Следовательно, с помощью отраженного лазерного луча можно оценить степень деструкции.

Далее была исследована степень деструкции биологической ткани повышенной плотности (костной). Деструкция осуществлена высокочастотным электромагнитным излучением (13,56 МГц). На рис. 25 представлены фотогра-

фии: а) до обработки, б) после обработки высокочастотным электромагнитным излучением мощностью 20 Вт (осветленные участки).

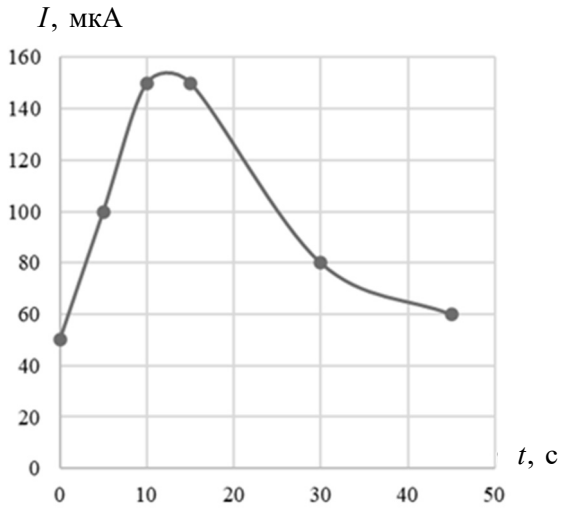


Рис. 24. Зависимость выходного тока ФЭУ от времени обработки биологической ткани сверхвысокочастотным электромагнитным излучением

Fig. 24. Dependence of the PMT output current on the time of treatment of a biological tissue by microwave electromagnetic radiation

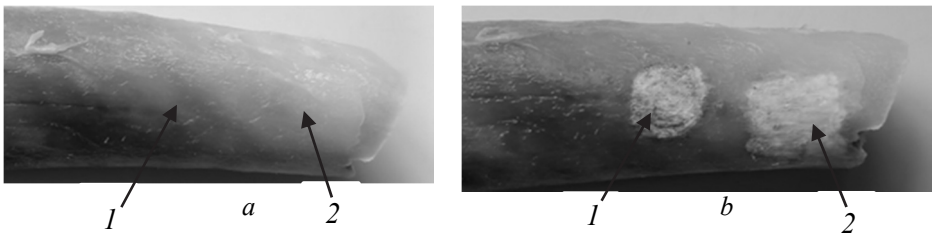


Рис. 25. Фотографии костной ткани:

a – до обработки; *b* – после обработки; *1* – более влажный участок костной ткани (начальная степень деструкции); *2* – более сухой участок костной ткани (глубокая деструкция)

Fig. 25. Photos of a bone tissue:

a – before processing; *b* – after processing; *1* – the area of bone tissue is wetter (initial degree of destruction); *2* – the area of bone tissue is drier (complete destruction)

До обработки высокочастотным электромагнитным излучением электрическое сопротивление поверхности костной ткани участка *1* составляло ~20 кОм, участка *2* ~30 кОм. После обработки методом сканирования излучателя по поверхности костной ткани площадью около 1…1,5 см^2 электрическое сопротивление участка *1* составило ~30 МОм, участка *2* – более 100 МОм. Таким образом, значение электрического сопротивления достоверно отражает степень только начального этапа деструкции костной ткани.

Степень деструкции костной ткани была оценена с помощью предложенного лазерного контроля. На рис. 26 показана зависимость выходного тока ФЭУ от величины питающего напряжения. Анализ рис. 26 показывает, что степень деструкции сухого участка костной ткани значительно выше, чем степень деструкции более влажного участка (участка с начальной степенью деструкции), но величи́ны тока в обоих случаях легко контролируемы. Следовательно, начальную и глубокую степень деструкции костной ткани можно более достоверно оценить с помощью лазерного контроля.

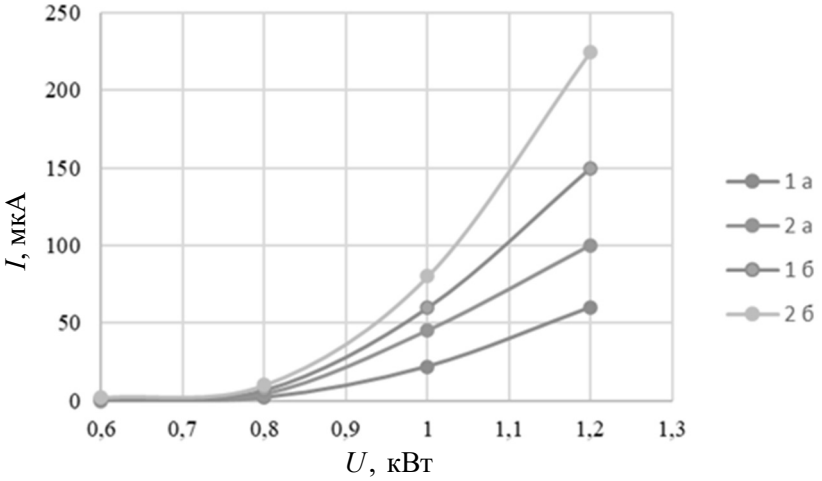


Рис. 26. Зависимость выходного тока ФЭУ от величины питающего напряжения

Fig. 26. Dependence of the output current of the power source on the value of the supply voltage

Проведенные исследования позволяют сделать определенный вывод: лазерный контроль увеличивает достоверность контроля качества и степени деструкции биологической ткани.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенные исследования свидетельствуют о возможности выполнения резекции биологических тканей в высокочастотном диапазоне воздействующего электромагнитного излучения. Показано, что резекция биологической ткани на определенную глубину с длиной разреза 35 мм возможна за очень короткое время (около 7 с), т. е. имеет место высокая скорость достижения необходимого результата практически при минимальном воздействии на окружающие ткани. Кроме того, области коагуляции краев разреза и прокола, полученных при ВЧ-абляции, имеет относительно небольшие размеры.

2. Предложенным методом высокочастотной абляции могут быть обработаны как мягкие ткани, так и ткани повышенной плотности (костные и хрящевые), а также глубоколежащие ткани.

3. Качество абляции, выполненной высокочастотным электромагнитным излучением, не уступает качеству абляции, выполненной методом МВА.

4. Высокочастотная абляция биологической ткани может быть выполнена неинвазивным способом путем сканирования по площади объекта воздействия со скоростью не менее $1{,}5 \cdot 10^{-2}$ м/с, а также инвазивным способом путем прокола объекта воздействия на глубину от 1,5 до 15 мм и более.

5. Предложенный метод лазерного контроля увеличивает достоверность оценки качества и степени деструкции биологических тканей.

6. Разработанный высокочастотный генератор на 13,56 МГц пригоден для использования в данных целях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Жуликов А.Л., Маланин Д.А.* Применение метода холодноплазменной аблации в травматологии и других областях хирургии // Волгоградский научно-медицинский журнал. – 2008. – № 1. – С. 59–61.

2. Устройство для формирования холодной плазмы в физиологическом растворе / Н.А. Жумантаева, А.Н. Алейник, Л.И. Лисицына, В.В. Педдер // Научный вестник НГТУ. – 2016. – № 1 (62). – С. 35–48.

3. *Жумантаева Н.А., Лисицына Л.И.* Щадящее удаление биологических тканей с патологией методом холодно-плазменной коблации // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск, 26–27 апр. 2017 г. – Новосибирск, 2017. – С. 566–569.

4. The device for generating cold plasma in an electrically conductive solution, with the aim of tissue spare / N.A. Zhumantaeva, L.I. Lisitsyna, A.N. Aleinik, V.V. Pedder // The 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2016: proceedings. – Novosibirsk, 2016. – P. 650–652.

5. Современные методы абляции злокачественных новообразований печени / Л.И. Москвичева, Д.В. Сидоров, М.В. Ложкин, Л.О. Петров, М.В. Забелин // Исследования и практика в медицине. – 2018. – Т. 5, № 4. – С. 58–71.

6. Новый метод микроволновой абляции злокачественных новообразований печени / Д.В. Сидоров, Н.А. Гришин, М.В. Ложкин, В.А. Вишневский, Л.О. Петров // Онкохирургия. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 50.

7. Микроволновая абляция при лечении злокачественных новообразований печени / Д.В. Сидоров, С.О. Степанов, Н.А. Гришин, М.В. Ложкин, Л.О. Петров, О.А. Майновска // Онкология. Журнал им. П.А. Герцена. – 2013. – № 2. – С. 27–31.

8. Effect of microwave ablation treatment of hepatic malignancies on serum cytokine levels / J. Zhao, Q. Li, M. Muktiali, B. Ren, Y. Hu, D. Li, Z. Li, D. Li, Y. Xie, M. Tao, R. Liang // BMC Cancer. – 2020. – Vol. 20. – P. 812.

9. Результаты радиочастотной абляции при лечении колоректальных метастазов в печени / К.Н. Петренко, Е.О. Барсукова, Л.О. Полищук, Е.П. Фисенко, Г.А. Шатверян, О.Г. Скипенко // Российский журнал гастроэнтерологии, гепатологии, колопроктологии. – 2007. – Т. 17, № 3. – С. 84–90.

10. Использование аппарата радиочастотной абляции при резекции печени / В.Д. Федоров, В.А. Вишневский, В.А. Кубышкин [и др.] // Хирургия. Журнал им. Н.И. Пирогова. – 2004. – № 5. – С. 21–25.

11. Microwave coagulation therapy for hepatic tumors: review of the literature and critical analysis / C. Boutros, P. Somasundar, S. Garrean, A. Saied, N.J. Espat // Surgical Oncology. – 2010. – Vol. 19 (1). – P. e22–e32.

12. *Kulaylat M.N., Gibbs J.F.* Thermoablation of colorectal liver metastasis // Journal of Surgical Oncology. – 2010. – Vol. 101 (8). – P. 699–705.

13. Small hepatocellular carcinoma in cirrhosis: randomized comparison of radio-frequency thermal ablation versus percutaneous ethanol injection / R.A. Lencioni, H.P. Allgaier, D. Cioni, M. Olschewski, P. Deibert, L. Crocetti, H. Frings, J. Laubenberger, I. Zuber, H.E. Blum, C. Bartolozzi // Radiology. – 2003. – Vol. 228 (1). – P. 235–240.

14. *Razafindratsira T., Isambert M., Evrard S.* Complications of intraoperative radiofrequency ablation of liver metastases // HPB (Oxford). – 2011. – Vol. 13 (1). – P. 15–23.

15. Микроволновая абляция в комбинированном лечении первичных опухолей и метастазов печени / М.М. Трандофилов, М.Н. Рудакова, К.Ю. Рябов, О.Ф. Шершнев, А.В. Прохоров // Анналы хирургической гепатологии. – 2015. – Т. 20 (4). – С. 34–39. – DOI: 10.16931/1995-5464.2015434-39.

16. *Балахнин П.В., Шмелев А.С., Шачинов Е.Г.* Чрескожная энергетическая абляция опухолей: принципы, технологии, результаты // Практическая онкология. – 2016. – Т. 17, № 3. – С. 129–153.

17. Радиочастотная абляция как вспомогательный и окончательный метод лечения метастатического поражения печени у больных колоректальным раком / Э.Э. Топузов, М.А. Бобраков, В.К. Балашов, Е.И. Дрогомирецкая, Е.А. Ерохина, О.Н. Кислицина, А.Н. Петряшов, А.Н. Круглов, Р.Э. Топузов, Е.В. Напольская // Вестник Северо-Западного государственного медицинского университета им. И.И. Мечникова. – 2017. – Т. 9, № 1. – С. 7–14.

18. Радиочастотная катетерная абляция хронической формы фибрилляции предсердий методом изоляции легочных вен и анатомической модификации субстрата аритмии / А.В. Ардашев, Е.Г. Желяков, Е.А. Долгушина, М.С. Рыбаченко, Д.А. Мангутов, А.В. Конев, С.В. Волошко, О.Ю. Врублевский, М.В. Крючко, Э.Н. Ливенцева // Кардиология. – 2008. – № 12. – С. 41–48.

19. История развития радиочастотной абляции в травматологии и ортопедии / М.А. Гвоздев, М.В. Рябинин, А.С. Сапрыкин, Н.Н. Корнилов // Современные проблемы науки и образования. – 2021. – № 1. – URL: https://science-education.ru/ru/article/view?id=30460 (дата обращения: 06.03.2023).

20. *Тихонов В.Н.* Мини-свиньи – надежда человечества // Химия и жизнь – XXI век. – 2011. – № 9. – С. 32–36.

21. *Винская Е.К., Белавская С.В., Лисицына Л.И.* Лазерный контроль степени деструкции биологической ткани // Наука. Технологии. Инновации: 16 Всероссийская научная конференция молодых ученых, Новосибирск, 5–8 дек. 2022 г.: в 11 ч. – Новосибирск, 2022. – Ч. 6. – С. 119–123.

22. Абляция костной ткани, выполненная путем воздействия электромагнитным излучением высокочастотного диапазона / Л.И. Лисицына, С.В. Белавская, А.Н. Кузьмин, Е.К. Винская // Современные проблемы телекоммуникаций: материалы Российской научно-технической конференции, Новосибирск,20–21 апр. 2022 г. – Новосибирск, 2022. – С. 648–652.

23. Comparative analysis of soft biological tissue ablation characteristics obtained by electromagnetic radiation of HF and UHF ranges / S.V. Belavskaya, L.I. Lisitsyna, A.N. Kuzmin, E.K. Vinskaya // IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM): proceedings, Erlagol, 30 June – 4 July 2022. – IEEE, 2022. – P. 510–513.

24. *Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Blokhin A.A.* Utilization of high frequency electrical signal for biological tissue ablation // Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021): proceedings, Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021. – Novosibirsk, 2021. – P. 72–75.

Белавская Светлана Витальевна, кандидат технических наук, доцент кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование биофизических процессов, измерительная техника. Имеет более 200 публикаций, включая 18 авторских свидетельств и патентов РФ. E-mail: Svetlana.belana@yandex.ru

Лисицына Лилия Ивановна, доктор технических наук, профессор кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – разработка диагностических и терапевтических устройств, исследование биофизических процессов. Имеет более 500 научных публикаций, включая 40 авторских свидетельств и патентов РФ. E-mail: lisitcinali@gmail.com

Кузьмин Антон Николаевич, магистр техники и технологии, инженер I кат. НПП «ВЕРСЕТ». Основное направление научных исследований – разработка медицинских устройств, исследование биофизических процессов. Имеет более 40 научных публикаций, включая один патент РФ. E-mail: anton@kuz-min.ru

Винская Екатерина Константиновна, студент 4-го курса физико-технического факультета Новосибирского государственного технического университета. Занимается научными разработками в течение двух лет в области разработки устройства по абляции биологических тканей. Имеет 3 научные публикации. E-mail: katerinavns@gmail.com

Навроцкий Леонид Григорьевич, и.о. заведующего лабораторией лазерной биофизики, научный сотрудник Института лазерной физики СО РАН, преподаватель-исследователь НГТУ (старший преподаватель). Основное направление научных исследований – исследование биофизических процессов в биологических тканях. Имеет более 40 научных публикаций и 2 патента на изобретения. E-mail: leonid.navrotsky @gmail.com

Разинкин Владимир Павлович, доктор технических наук, профессор Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – широкополосное СВЧ-устройство высокого уровня мощности. Имеет более 160 научных работ, включая 36 патентов РФ на изобретение. E-mail: Razinkin@corp.nstu.ru

Блохин Александр Александрович, магистр техники и технологии, ассистент кафедры электронных приборов Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – исследование биофизических процессов, компьютерная обработка данных. Имеет более 40 научных работ, включая один патент РФ на изобретение. E-mail: snakebss@mail.ru

Belavskaya Svetlana V., PhD (Eng.), an associate professor at the Department of Electronic Devices, Novosibirsk State Technical University. The main field of her scientific research is the study of biophysical processes an d measuring equipment. She has more than 200 publications, including 18 copyright certificates and patents of the Russian Federation. E-mail: BelavskayaSV@gmail.com

Lisitsyna Liliya I., D. Sc. (Eng.), professor at the Department of Electronic Devices, Novosibirsk State Technical University. The main field of her scientific research is development of diagnostic devices and study of biophysical processes. She has more than 500 scientific publications, including 40 copyright certificates and patents of the Russian Federation. E-mail: lisitcinali@ gmail.com

*Kuzmin Anton N., a m*aster of engineering and technology, the Ist cathegory engineer of "VERSET", LLC. The main field of his scientific research is development of medical devices and study of biophysical processes. He has more than 40 scientific publications, including 1 patent of the Russian Federation. E-mail: anton@kuz-min.ru

Vinskaya Ekaterina K., 4th year student at the Faculty of Physics and Technology, Novosibirsk State Technical University. She has been engaged in scientific research for 2 years in the field of developing a device for ablation of biological tissues. She has 3 scientific publications. E-mail: katerinavns@gmail.com

Navrotsky Leonid G., an acting head of the Laser Biophysics Lab, researcher at the Institute of Laser Physics SB RAS, research teacher at NSTU (senior lecturer). The main field of his scientific research is study of biophysical processes in biological tissues. He has more than 40 scientific publications and 2 patents for inventions. E-mail: leonid.navrotsky @gmail.com

Razinkin Vladimir P., D. Sc. (Eng.), an associate professor, Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is a wide range microwave high power device. He has more than 160 scientific publications, including 36 patents of the Russian Federation. E-mail: Razinkin@corp.nstu.ru

*Blokhin Alexander A., a m*aster of engineering and technology, assisting lecturer at the Department of Electronic Devices, Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is study of biophysical processes and computer data processing. He has more than 40 scientific publications, including 1 patent of the Russian Federation. E-mail: snakebss@mail.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-55-80

A high-frequency electromagnetic system for biological tissues destruction *

S.V. BELAVSKAYA [a], *L.I. LISITSYNA* [b], *A.N. KUZMIN* [c], *E.K. VINSKAYA* [d], *L.G. NAVROTSKY* [e], *V.P. RAZINKIN* [f], *A.A. BLOKHIN* [g]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *Svetlana.belana@yandex.ru* [b] *lisitcinali@gmail.com* [c] *anton@kuz-min.ru*
[d] *katerinavns@gmail.com* [e] *leonid.navrotsky@gmail.com* [f] *razinkin_vp@mail.ru*
[g] *snakebss@mail.ru*

Abstract

The possibility of using an impacting electromagnetic radiation in the high-frequency range for ablation of biological tissues (soft and high density) is considered. A comparative analysis of the characteristics of ablation performed using electromagnetic radiation of the microwave range (microwave ablation method (MWA)) and high-frequency (HF) range is given. It was experimentally revealed that the characteristics of ablation performed by both methods are close to each other. HF ablation techniques performed by non-invasive and invasive methods are proposed and experimentally tested. Laser control of the degree of destruction of biological tissue is proposed which increases the reliability of control. The experiments were carried out using a high-frequency generator at a fixed frequency of 13.56 MHz created with the participation of the authors of this work. The use of an HF generator provided an effect on a biological tissue with a needle-type emitter (medical steel), without using a closed electrical circuit. Pig skin and muscles of cattle were used as biopsies. The processes of burning out the object of exposure, resection and coagulation were performed. It is shown that with HF ablation (HF), the tissue is heated to 120 ° C. A multimeter with the function of a thermal imager CEM DT-898 manufactured in Germany was used to study the temperature in the focus of exposure. This multimeter allows capturinge the area with the maximum temperature at the place of discharge, which occurs when the emitter approaches the skin and heats the skin to a certain temperature, as a result of which thermal ablation occurs. It was revealed that HF ablation occurs practically without affecting the surrounding tissues. A high-frequency electromagnetic system for conducting experimental studies has been developed and implemented. Based on the results of the work, it is proposed to ablate biological tissue using Russian HF generators.

Keywords: biological tissue, ablation, thermal, microwave, high frequency, discharge, temperature, electrical resistance, destruction, degree, quality, laser control

REFERENCES

1. Zhulikov A.L., Malanin D.A. Primenenie metoda kholodnoplazmennoi ablatsii v travmatologii i drugikh oblastyakh khirurgii [Application of the cold plasma ablation method in traumatology and other areas of surgery]. *Volgogradskii nauchno-meditsinskii zhurnal = Volgograd scientific and medical journal*, 2008, no. 1, pp. 59–61.

2. Zhumantaeva N.A., Aleinik A.N., Lisitsyna L.I., Pedder V.V. Ustroistvo dlya formirovaniya kholodnoi plazmy v fiziologicheskom rastvore [The device for generating cold plasma in saline]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta = Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2016, no. 1 (62), pp. 35–48.

3. Zhumantaeva N.A., Lisitsyna L.I. [Spring removal of biological issue with pathology by cold-plasma collection method]. *Sovremennye problemy telekommunikatsii* [Modern problems of telecommunications]. Materials of the Russian Scientific and Technical conference, Novosibirsk, 26–27 April 2017, pp. 566–569. (In Russian).

4. Zhumantaeva N.A., Lisitsyna L.I., Aleinik A.N., Pedder V.V. The device for generating cold plasma in an electrically conductive solution, with the aim of tissue spare. *The 17th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices, EDM 2016: proceedings*, Novosibirsk, 2016, pp. 650–652.

* *Received 17 August 2022.*

5. Moskvicheva L.I., Sidorov D.V., Lozhkin M.V., Petrov L.O., Zabelin M.V. Sovremennye metody ablyatsii zlokachestvennykh novoobrazovanii pecheni [Modern methods of ablation of malignant tumors of the liver]. *Issledovaniya i praktika v meditsine = Research'n Practical Medicine Journal*, 2018, vol. 5, no. 4, pp. 58–71.

6. Sidorov D.V., Grishin N.A., Lozhkin M.V., Vishnevskiy V.A., Petrov L.O. Novyi metod mikrovolnovoi ablyatsii zlokachestvennykh novoobrazovanii pecheni [A new method of microwave ablation of malignanthepatic tumors]. *Onkokhirurgiya = Oncosurgery*, 2012, vol. 4, no. 1, p. 50.

7. Sidorov D.V., Stepanov S.O., Grishin N.A., Lozhkin M.V., Petrov L.O., Mainovska O.A. Mikrovolnovaya ablyatsiya pri lechenii zlokachestvennykh novoobrazovanii pecheni [Microwave ablation for the treatment of malignant liver tumors]. *Onkologiya. Zhurnal im. P.A. Gertsena = P.A. Herzen Journal of Oncology*, 2013, no. 2, pp. 27–31.

8. Zhao J., Li Q., Muktiali M., Ren B., Hu Y., Li D., Li Z., Li D., Xie Y., Tao M., Liang R. Effect of microwave ablation treatment of hepatic malignancies on serum cytokine levels. *BMC Cancer*, 2020, vol. 20, p. 812.

9. Petrenko N.N., Barsukova Ye.O., Polischuk L.O., Fisenko Ye.P., Shatveryan G.A., Skipenko O.G. Rezul'taty radiochastotnoi ablyatsii pri lechenii kolorektal'nykh metastazov v pecheni [Results of radio-frequency ablation of colorectal cancer metastases in the liver]. *Rossiiskii zhurnal gastroenterologii, gepatologii, koloproktologii = Russian Journal of Gastroenterology, Hepatology, Coloproctology*, 2007, vol. 17, no. 3, pp. 22–28.

10. Fedorov V.D., Vishnevsky V.A., Kubyshkin V.A., et al. Ispol'zovanie apparata radiochastotnoi ablyatsii pri rezektsii pecheni [The use of radiofrequency ablation apparatus for liver resection]. *Khirurgiya. Zhurnal im. N.I. Pirogova = Pirogov Russian Journal of Surgery*, 2004, no. 5, pp. 21–25.

11. Boutros C., Somasundar P., Garrean S., Saied A., Espat N.J. Microwave coagulation therapy for hepatic tumors: review of the literature and critical analysis. *Surgical Oncology*, 2010, vol. 19 (1), pp. e22–e32.

12. Kulaylat M.N., Gibbs J.F. Thermoablation of colorectal liver metastasis. *Journal of Surgical Oncology*, 2010, vol. 101 (8), pp. 699–705.

13. Lencioni R.A., Allgaier H.P., Cioni D., Olschewski M., Deibert P., Crocetti L., Frings H., Laubenberger J., Zuber I., Blum H.E., Bartolozzi C. Small hepatocellular carcinoma in cirrhosis: randomized comparison of radio-frequency thermal ablation versus percutaneous ethanol injection. *Radiology*, 2003, vol. 228 (1), pp. 235–240.

14. Razafindratsira T., Isambert M., Evrard S. Complications of intraoperative radiofrequency ablation of liver metastases. *HPB (Oxford)*, 2011, vol. 13 (1), pp. 15–23.

15. Trandofilov M.M., Rudakova M.N., Ryabov K.Yu., Shershnev O.F., Prokhorov A.V. Mikrovolnovaya ablyatsiya v kombinirovannom lechenii pervichnykh opukholei i metastazov pecheni [Microwave ablation in combined treatment of primary and metastatic liver tumors]. *Annaly khirurgicheskoi gepatologii = Annals of HPB Surgery*, 2015, vol. 20 (4), pp. 34-39. DOI: 10.16931/1995-5464.2015434-39.

16. Balakhnin P.V., Shmelev A.S., Shachinov E.G. Chreskozhnaya energeticheskaya ablyatsiya opukholei: printsipy, tekhnologii, rezul'taty [Percutaneous energy ablation of tumors: principles, technologies, results]. *Prakticheskaya onkologiya = Practical Oncology*, 2016, vol. 17, no. 3, pp. 129–153.

17. Topuzov E.E., Bobrakov M.A., Balashov V.K., Drogomiretskaya E.I., Erokhina E.A., Kislitsina O.N., Petryashov A.N., Kruglov A.N., Topuzov R.E., Napolskaya E.V. Radiochastotnaya ablyatsiya kak vspomogatel'nyi i okonchatel'nyi metod lecheniya metastaticheskogo porazheniya pecheni u bol'nykh kolorektal'nym rakom [Radiofrequency ablation as an auxiliary and final method of treatment of metastatic liver damage in patients with colorectal cancer]. *Vestnik Severo-Zapadnogo gosudarstvennogo meditsinskogo universiteta im. I.I. Mechnikova = Herald of the Northwestern State Medical University named after I.I. Mechnikov*, 2017, vol. 9, no. 1, pp. 7–14.

18. Ardashev A.V., Zhelyakov E.G., Dolgushina E.A., Rybatchenko M.S., Mangutov D.A., Konev A.V., Voloshko S.V., Vrublevsky O.Yu., Kryuchko M.V., Liventseva E.N. Radiochastotnaya kateternaya ablyatsiya khronicheskoi formy fibrillyatsii predserdii metodom izolyatsii legochnykh ven i anatomicheskoi modifikatsii substrata aritmii [Radiofrequency ablation of chronic atrial fibrillation by combined isolation of pulmonary veins and anatomical modification of substrate of arrhythmia]. *Kardiologiya = Cardiology*, 2008, no. 12, pp. 41–48.

19. Gvozdev M.A., Ryabinin M.V., Saprykin A.S., Kornilov N.N. Istoriya razvitiya radiochastotnoi ablyatsii v travmatologii i ortopedii [History of development of radiofrequency ablation in traumatology and orthopedics]. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya = Modern problems of science and education*, 2021, no. 1. Available at: https://science-education.ru/ru/article/view?id=30460 (accessed 06.03.2023).

20. Tikhonov V.N. Mini-svin'i – nadezhda chelovechestva [Mini-pigs – the hope of mankind]. *Khimiya i zhizn' – XXI vek = Chemistry and Life – 21st Century*, 2011, no. 9, pp. 32–36.

21. Vinskaya E.K., Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I. [Laser control of destruction degree of biological tissue]. *Nauka. Tekhnologii. Innovatsii* [science. Technologies. Innovations]. 16 All-Russian Scientific Conference of Young Scientists, Novosibirsk, 5–8 Dec. of 2022. In 11 pt. Pt. 6, pp. 119–123. (In Russian).

22. Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K. [Ablation of bone tissue performed by exposure to high-frequency electromagnetic radiation]. *Sovremennye problemy telekommunikatsii* [Modern problems of telecommunications]. Materials of the Russian Scientific and Technical conference, Novosibirsk, 20–21 April 2022, pp. 648–652. (In Russian).

23. Belavskaya S.V., Lisitsyna L.I., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K. Comparative analysis of soft biological tissue ablation characteristics obtained by electromagnetic radiation of HF and UHF ranges. *IEEE 23 International Conference of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM)*: proceedings, Erlagol, 30 June – 4 July 2022. IEEE, 2022, pp. 510–513.

24. Lisitsyna L.I., Belavskaya S.V., Blokhin A.A. Utilization of high frequency electrical signal for biological tissue ablation. *Actual Problems of Electronic Instrument Engineering (APEIE-2021)*: proceedings, Novosibirsk, 19–21 Nov. 2021, pp. 72–75.

Для цитирования:

Высокочастотная электромагнитная система для деструкции биологических тканей / С.В. Белавская, Л.И. Лисицына, А.Н. Кузьмин, Е.К. Винская, Л.Г. Навроцкий, В.П. Разинкин, А.А. Блохин // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 1 (89). – С. 55–80. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-55-80.

For citation:

Belavskaya S.S., Lisitsyna L.I., Kuzmin A.N., Vinskaya E.K., Navrotsky L.D., Razinkin V.P., Blokhin A.A. Vysokochastotnaya elektromagnitnaya sistema dlya destruktsii biologicheskikh tkanei [A high-frequency electromagnetic system for biological tissues destruction]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 55–80. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-55-80.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 89, № 1, 2023, с. 81–90

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 89, No. 1, 2023, pp. 81–90

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

УДК 535.411.854

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-81-90

Повышение пространственного разрешения цифровых голограмм с помощью одномерного субпиксельного сканирования*

В.И. ГУЖОВ[a], Д.С. ХАЙДУКОВ, К.В. ЗАХАРОВ, О.Ю. МАЙЕР

630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет

[a] *v.guzhov@corp.nstu.ru*

В статье рассмотрен вопрос повышения пространственного разрешения при регистрации цифровых голограмм. На практике дискретизация осуществляется получением усредненных значений сигнала по площади датчиков. Разрешение определяется размером площадки датчика, по которой происходит усреднение. Метод повышения разрешения основан на уравнении дискретизации сигналов, полученных методом субпиксельного сдвига при использовании обобщенных функций. Субпиксельный сдвиг осуществляется с помощью пространственного сдвига на величину меньшую, чем элемент разрешения.

Для дискретизации могут использоваться апертуры с площадью различной формы, например, эллиптические, ромбовидные, гексагональные, но наиболее часто используются прямоугольные апертуры. Уравнение дискретизации, полученное с использованием обобщенных функций, предусматривает использование двумерной апертурной функции. Ниже рассмотрен способ повышения разрешения при использовании одномерной функции. Это можно сделать исходя из структуры голографического сигнала. При этом можно использовать субпиксельный сдвиг только в одном направлении.

Цифровая голография отличается тем, что для регистрации сигнала используются матрицы фотодетекторов, которые имеют пространственное разрешение значительно меньшее, чем фотографические среды, применяемые в традиционных методах голографии. Поэтому в цифровой голографии используются оптические схемы с малыми углами между интерферирующими волновыми полями. Однако при этом накладываются определенные ограничения на форму исследуемых объектов. Если объекты имеют форму поверхности, значительно отличающуюся от плоской, необходимо использовать традиционные оптические схемы.

В статье приведено математическое моделирование метода повышения разрешения на основе восстановления сигналов из реальной голограммы, полученных обычным способом. Повышение разрешения достигается использованием одномерного субпиксельного сдвига.

Использование одномерного субпиксельного сдвига позволяет значительно упростить оптическую схему голографической установки.

* *Статья получена 16 января 2022 г.*

Ключевые слова: цифровая голография, дискретизация, частота дискретизации, пространственные частоты, обобщенные функции, преобразование Фурье, спектр, сверхразрешение, субпиксельный сдвиг

ВВЕДЕНИЕ

Для получения тонких голограмм (голограмм, в которых толщиной эмульсии можно пренебречь) наиболее часто используется внеосевая схема оптической установки, предложенная Э. Лейтом и Ю. Упатниексом [1–4]. При восстановлении действительного и мнимого изображений из голограммы для устранения влияния центрального пучка используются углы между интерферирующими волновыми полями порядка 30…60 градусов. При таких условиях для регистрации голограмм требуются фотографические среды с большим пространственным разрешением 2000…4000 линий/мм.

В последние годы усилия многих исследователей направлены на разработку методов цифровой голографии [5–8]. Основным отличием этих методов от традиционных является использование электронных устройств для регистрации оптических сигналов. Современные устройства регистрации, основанные на использовании матриц фотоприемников, имеют разрешение около 200…300 линий/мм. Поэтому для получения голограмм используются оптические схемы с углами порядка 1…5 градусов между интерферирующими волновыми полями [9]. Однако при таких небольших углах интерференции возможна запись голограмм только для объектов с формой поверхности, близкой к плоской.

Целью настоящей статьи является исследование нового метода получения синтезированных голограмм из набора голограмм, зафиксированных устройствами ввода оптических изображений с низким разрешением для получения изображений объектов с высоким разрешением на основе субпиксельных сдвигов. В радиотехнике данный подход называется методом синтезированной апертуры (synthetic aperture). В оптической литературе такие методы часто называются методами сверхразрешения при получении изображений [10–14].

1. СИНТЕЗ ВЫСОКОРАЗРЕШАЮЩИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ НАБОРА НИЗКОРАЗРЕШАЮЩИХ РАСТРОВ ПРИ СМЕЩЕНИИ ОБЪЕКТА НА СУБПИКСЕЛЬНУЮ ВЕЛИЧИНУ

Непрерывный аналоговый сигнал можно представить последовательностью его значений (отсчетов). Эти отсчеты берутся в точках, отделенных друг от друга некоторым интервалом, который называется интервалом дискретизации. Число интервалов дискретизации, при которых по дискретным значениям всегда можно точно восстановить непрерывный сигнал, определяется теоремой Уиттекерра – Котельникова – Шеннона (Whittaker – Kotelnikov – Shannon) [15–18]. Однако теория дискретизация основана на допущении бесконечного числа отсчетов в бесконечно малых точках (с помощью бесконечной гребенки Дирака) [19].

Реальная дискретизация оптического изображения осуществляется измерением сигнала с помощью ограниченной матрицы детекторов, состоящей из элементов с некоторой ограниченной площадкой (апертурой). Числовые зна-

чения отсчетов получаются путем пространственного интегрирования на каждой из апертур. В этом случае процесс дискретизации можно описать с помощью аппарата обобщенных функций [20, 21].

Если имеется возможность получения изображений с низким разрешением с пространственным сдвигом на субпиксельную величину, т. е. на шаг меньший, чем элемент разрешения, то принципиально можно восстановить изображение с разрешением, определяемым величиной этого шага.

В [22, 23] приведен алгоритм для дискретизации функции с помощью конечного набора апертур. Если синтезировать изображение, состоящее из последовательного повторения отсчетов изображений с низким разрешением, полученных при субпиксельном сдвиге, то в области Фурье получим следующее выражение:

$$F_{\tau,\Delta x}(\omega)=\left(\left[F(\omega)\otimes\operatorname{sinc}\left(\frac{\omega N}{2}\right)\right]\Im\left(\operatorname{rect}_{\tau}(\omega)\right)\right)\otimes\operatorname{comb}_{\frac{2\pi}{\Delta x}}(\omega)\,, \qquad (1)$$

где $\left(\left[F(\omega)\otimes\operatorname{sinc}\left(\frac{\omega N}{2}\right)\right]\Im\left(\operatorname{rect}_{\tau}(\omega)\right)\right)$ – спектр синтезированной функции. Из него можно выделить спектр исходного сигнала с разрешением, определяемым субпиксельным сдвигом $\left[F(\omega)\otimes\operatorname{sinc}\left(\frac{\omega N}{2}\right)\right]$. Это можно сделать, пронормировав этот спектр на спектр апертурной функции $\Im\left(\operatorname{rect}_{\tau}(\omega)\right)$.

В [24] рассмотрен вопрос о получении изображений из синтезированных голограмм с помощью двумерного субпиксельного сканирования. Для осуществления сдвига необходимо устройство, осуществляющее перемещение по координатам x и z (координаты размещения голограммы). Однако природа получения голограммы позволяет значительно упростить этот процесс. В следующем разделе показана возможность восстановления изображений из синтезированных голограмм при использовании сканирования только по одной координате.

2. НЕОБХОДИМОЕ РАЗРЕШЕНИЕ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ГОЛОГРАММ

Голограмма является результатом интерференции двух когерентных пучков. Один из пучков отражается от объекта, другой является опорным.

Например, при взаимодействии двух плоских пучков на некотором экране возникает картина полос, показанная на рис. 1 (слева). Расстояние между центрами интерференционных полос можно найти из следующего выражения:

$$\Delta x=\frac{\lambda}{2\sin(\theta_x/2)}\,, \qquad (2)$$

где θ_x – угол между пучками в плоскости x; λ – длина волны.

При увеличении угла между интерферирующими пучками расстояние между интерферирующими полосами уменьшается. Если $\lambda=0{,}6$ мкм, то при угле 60 градусов расстояние соизмеримо с длиной волны. При угле 30 градусов

$\Delta x = 1{,}16$ мкм; при угле 15 градусов $\Delta x = 3{,}8$ мкм; при угле один градус $\Delta x =$ = 34,4 мкм.

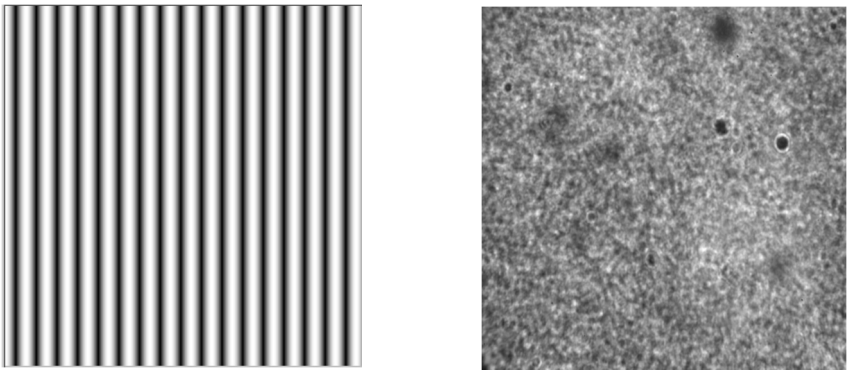


Рис. 1. Интерференция двух плоских волн (слева) и участок реальной голограммы (3,5 мм × 3.5 мм) под микроскопом (справа)

Fig. 1. Interference of two plane waves (left) and a section of a real hologram (3.5 mm × 3.5 mm) under a microscope (right)

По теореме Котельникова, чтобы восстановить картину интерферирующих полос, необходимо взять не менее двух точек на полосу. При этом необходимое разрешение устройства регистрации должно быть как минимум в два раза меньше расстояния между полосами. Физический размер пикселя в матрице фотоприемников Canon EOS M50 составляет 3,7 мкм. Поэтому при использовании матрицы такого типа необходимо использовать методы субпиксельного сканирования.

Голограмма – это интерференционная картина между волновым полем, отраженным от диффузного объекта сложной формы и известной опорной волной. Поэтому необходимое разрешение при дискретизации необходимо выбирать больше, чем при интерференции плоских пучков.

Интерференционные полосы на голограмме не видны даже при большом увеличении. Причиной этого являются спеклы (англ. *speckle* – крапинка, пятнышко). Спекл-структуры возникают из-за пространственного ограничения спектров интерферирующих волн. Средний размер спеклов можно определить с помощью выражения

$$b = 1{,}22\frac{\lambda L}{d}, \tag{3}$$

где L – расстояние от рассеивающей поверхности до плоскости наблюдения, d – диаметр освещенной поверхности.

Размер спеклов может существенно превышать период полос. Например, при L = 150 мм, d = 20 мм и λ = 0,6 мкм средний размер спекла будет около 55 мкм. Таким образом, картина полос на голограмме будет маскироваться спекл-структурой. В результате проследить интерференционные полосы на голограмме явно не удается даже при большом увеличении (рис. 1 справа). Однако ориентация полос будет сказываться на восстановлении изображений их голограмм.

3. ВОССТАНОВЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ ИЗ СИНТЕЗИРОВАННЫХ ГОЛОГРАММ ПРИ СУБПИКСЕЛЬНОМ СДВИГЕ ПО ОДНОЙ КООРДИНАТЕ

На рис. 2 (слева) показана оцифрованная голограмма размером 2048 × 2048 и восстановленное из нее изображение (справа). Голограмма сканировалась на микроскопе с увеличением в 8 раз. Физический размер оцифрованного участка 3,5 × 3,5 мм.

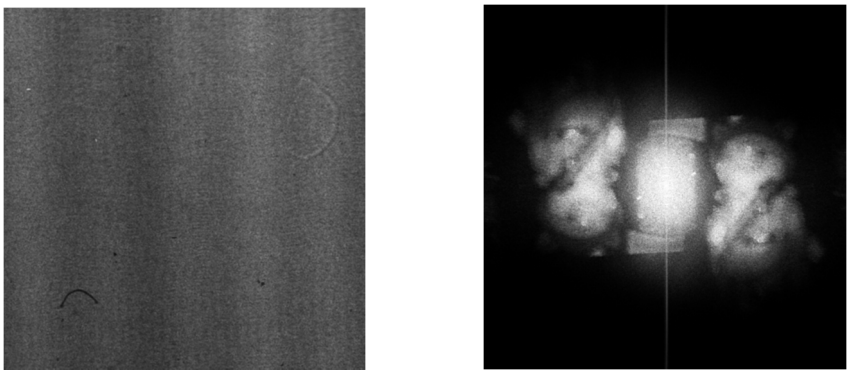


Рис. 2. Действительное и мнимое изображение (справа), восстановленное из отсканированной голограммы (слева) (2048 × 2048 точек)

Fig. 2. An image (right) reconstructed from a scanned hologram (left) (2048 × 2048 pixels)

На рис. 3 (слева) показана голограмма размером 256 × 256, полученная усреднением по окрестности 8 × 8, и восстановленное из нее изображение (справа). Каждая точка образуется как усредненная точка участков изображений размером 8 × 8. Видно, что разрешения голограммы уже не хватает для нормального восстановления изображений.

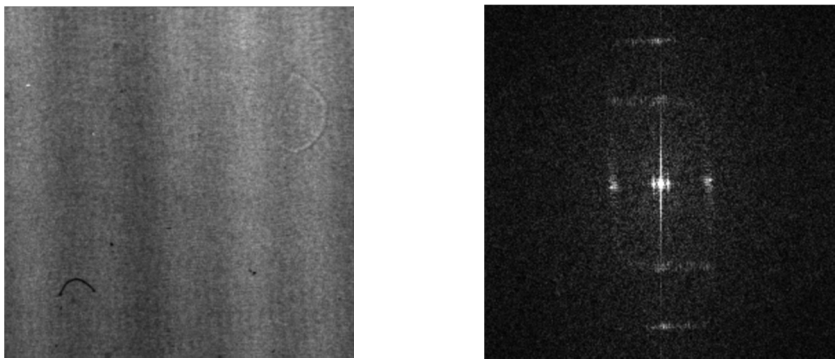


Рис. 3. Голограмма после усреднения с окном 8 × 8 (256 × 256 пикселей) и восстановленные из нее действительное и мнимое изображения

Fig. 3. A hologram after averaging with a window of 8 × 8 (256 × 256 pixels) and real and virtual images reconstructed from it

На рис. 4. (вверху) показана голограмма, сгенерированная с субпиксельными сдвигами только по оси *x*. Размер выбранной окрестности 8 × 8. Размер по оси *y* в 8 раз больше, чем на рис. 3. Реальное и мнимое изображения, восстановленные из такой голограммы, показаны на рис. 4 (внизу).

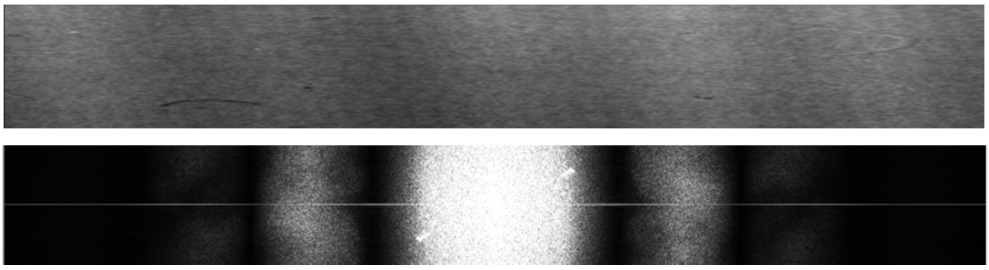


Рис. 4. Изображение (внизу), восстановленное из сгенерированной голограммы (вверху) (2048 × 256 точек)

Fig. 4. An image (bottom) reconstructed from the generated hologram (top) (2048 × 256 pixels)

Вид одномерной апертурной функции при использовании окрестности с окном 8 × 8 показан на рис. 5.

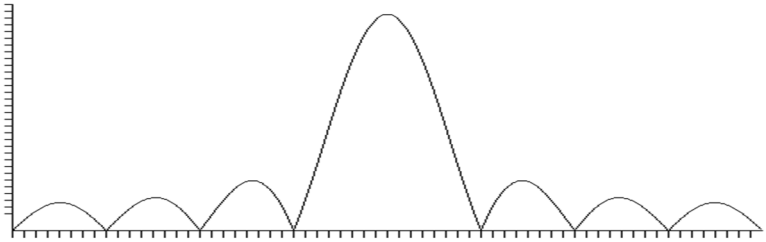


Рис. 5. Апертурная функция (размер по *x* – 2048 точек / пикселей)

Fig. 5. Aperture function (*x* size – 2048)

На рис. 6 показано восстановленное из голограммы изображение после поэлементного деления спектра сгенерированной голограммы на спектр апертурной функции при увеличении размера оцифрованной голограммы по оси *y* 2048 × 8192 точек (3,5 мм × 14 мм).

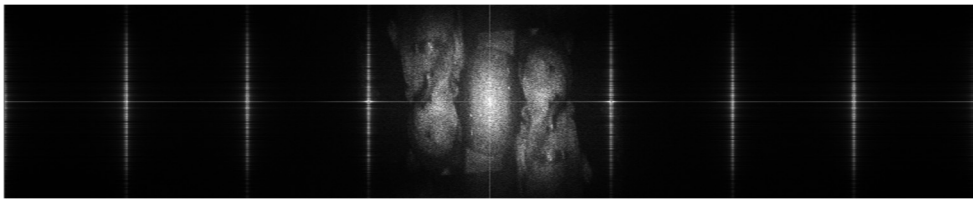


Рис. 6. Восстановленное изображение из сгенерированной голограммы после поэлементного деления спектра сгенерированной голограммы на спектр одномерной апертурной функции

Fig. 6. A reconstructed image from the generated hologram after the element-wise division of the spectrum of the generated hologram into the spectrum of the one-dimensional aperture function

Этот пример показывает возможность восстановления изображений при регистрации голограммы с низкой частотой дискретизации только при сдвиге по координате x.

Интерференционные полосы расположены на голограмме вертикально (по оси y). Их не видно из-за наложения спекл-структуры (рис. 2, слева). Если осуществить субпиксельный сдвиг по координате y и затем восстановить изображение с помощью одномерной апертурной функции, то повышения разрешения не произойдет.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье рассмотрен метод восстановления изображений из цифровых голограмм, полученных с недостаточным пространственным разрешением, методом субпиксельного сдвига.

Метод основан на дополнении исходной голограммы значениями, полученными при пространственном сдвиге объекта или матрицы фотоприемников на величину меньшую, чем разрешение голограммы, только по одной координате. После преобразования Фурье проводится поэлементное деление элементов восстановленного изображения на элементы спектра одномерной апертурной функции.

Показано, что даже в случае недостаточного разрешения устройств регистрации голограмм можно восстановить изображение при априорном знании апертурной функции. Приведены результаты моделирования алгоритма.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Leith E.N., Upatnieks J.* Reconstructed wavefronts and communication theory // Journal of the Optical Society of America. – 1962. – Vol. 52. – P. 1123–1130.

2. *Кольер Р., Беркхарт К., Лин Л.* Оптическая голография. – М.: Мир, 1973. – 686 с.

3. Оптическая голография: в 2 т. / под ред. Г. Колфилда. – М.: Мир, 1982. – 735 с.

4. *Миллер М.* Голография. – Л.: Машиностроение, 1979. – 140 с.

5. *Goodman J.W., Lawrence R.W.* Digital image formation from electronically detected holograms // Applied Physics Letters. – 1967. – Vol. , N 3. – P. 77–79.

6. *Ярославский Л.П., Мерзляков Н.С.* Цифровая голография. – М.: Наука, 1982. – 219 с.

7. *Schnars U., Jueptner W.* Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction // Applied Optics. – 1994. – Vol. 33, N 2. – P. 179–181.

8. *Гужов В.И.* Компьютерная голография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2018. – 270 с. – ISBN 978-5-8114-3410-7.

9. *Гужов В.И., Ильиных С.П., Хайбулин С.В.* Восстановление фазовой информации на основе методов пошагового фазового сдвига при малых углах между интерферирующими пучками // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 3. – С. 101–106. – DOI: 10.15372/AUT20170313.

10. *Васьков С.Т., Ефимов В.М., Резник А.Л.* Быстрая цифровая реконструкция сигналов и изображений по критерию минимума энергии // Автометрия. – 2003. – Т. 39, № 4. – С. 13–20.

11. Super-resolution in digital holography by a two-dimensional dynamic phase grating / M. Paturzo, F. Merola, S. Grilli, S. De Nicola, A. Finizio, P. Ferraro // Optics Express. – 2008. – Vol. 16. – P. 17107–17118.

12. *Claus D.* High resolution digital holographic synthetic aperture applied to deformation measurement and extended depth of field method // Applied Optics. – 2010. – Vol. 49 (16). – P. 3187–3198.

13. *Tippie A.E., Kumar A., Fienup J.R.* High-resolution synthetic-aperture digital holography with digital phase and pupil correction // Optics Express. – 2011. – Vol. 19, N 13. – P. 12027–12038.

14. *Блажевич С.В., Селютина Е.С.* Повышение разрешения цифрового изображения с использованием субпиксельного сканирования // Научные ведомости БелГУ. Серия: Математика. Физика. – 2014. – № 5 (176). – С. 186–190.

15. *Котельников В.А.* О пропускной способности «эфира» и проволоки в электросвязи // Успехи физических наук. – 2006. – Т. 176, № 7. – С. 762–770.

16. *Nyquist H.* Certain topics in telegraph transmission theory // Transactions of the American Institute of Electrical Engineers. – 1928. – Vol. 47. – P. 617–644.

17. *Wittaker E.T.* On the function which are represented by the expansion of interpolating theory // Proceedings of the Royal Society of Edinburgh. – 1915. – Vol. 35. – P. 181–194.

18. *Shannon C.E.* Communication in the presence of noise // Proceedings of the IRE. – 1949. – Vol. 37, N 1. – P. 10–21.

19. Дискретизация сигналов с помощью конечного набора апертур / В.И. Гужов, И.О. Марченко, Е.Е. Трубилина, А.А. Трубилин // Омский научный вестник. – 2021. – № 1 (175). – С. 55–58. – DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-55-58.

20. *Владимиров В.С.* Обобщенные функции в математической физике. – М.: Наука, 1979. – 320 с.

21. *Гельфант И.М., Шилов Г.Е.* Обобщенные функции и действия над ними. – 2-е изд. – М.: Физматгиз, 1959. – 470 с.

22. *Гужов В.И., Марченко И.О., Трубилина Е.Е.* Повышение пространственного разрешения сигналов в оптических системах // Компьютерная оптика. – 2022. – Т. 46, № 1. – С. 65–70. – DOI: 10.18287/2412-6179-CO-924.

23. Восстановление изображений из серии голограмм, зарегистрированных с низким разрешением с помощью нового уравнения дискретизации / В.И. Гужов, С.П. Ильиных, К.В. Захаров, О.Ю. Майер // Автометрия. – 2022. – Т. 58, № 4. – С. 125–139. – DOI: 10.15372/AUT20220413.

Гужов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры систем сбора и обработки данных Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований – голографические измерительные системы. Имеет более 270 публикаций. E-mail: v.guzhov@corp.nstu.ru

Хайдуков Дмитрий Сергеевич, кандидат технических наук, ассистент кафедры ССОД. Автор более 30 работ. Область научных интересов: голография, бесконтактное измерение деформаций. E-mail: dmitriyhaydukov@gmail.com

Захаров Константин Владимирович, ассистент кафедры защиты информации Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – цифровые голографические системы.

Майер Ольга Юрьевна, аспирант Новосибирского государственного технического университета. Основное направление исследований – высокоточные измерительные системы.

Guzhov Vladimir I., D.Sc. (Eng.), professor at the department of data collection and data processing systems, Novosibirsk State Technical University. The main field of his scientific research is high-precision measuring systems. He is the author of more than 270 publications. Email: v.guzhov@corp.nstu.ru

Khaidukov Dmitry, PhD, assistant lecturer at the SSOD department. He is the author of more than 30 papers. His research interests include holography and contactless measurement of deformations. E-mail:dmitriyhaydu-kov@gmail.com

Zakharov Konstantin Vladimirovich, aassistant lecturer at the department of information security, Novosibirsk State Technical University. The main field of his research is digital holographic systems.

Mayer Olga Yurievna, post-graduate student in the Novosibirsk State Technical University. The main field of her research is high-precision measuring systems.

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-81-90

Improving the spatial resolution of digital holograms using one-dimensional subpixel scanning *

V.I. GUZHOV[a], D.S. KHAIDUKOV, K.V. ZAKHAROV [b], O.Y. MAYER [c]

Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation

[a] *v.guzhov@corp.nstu*

Abstract

The article considers the issue of increasing the spatial resolution during the registration of digital holograms. In practice, discretization is carried out by measuring signal samples using sensors with a certain finite aperture. The resolution is determined by the size of the aperture area over which the averaging takes place. The resolution enhancement method is based on the sampling equation for signals obtained by the subpixel shift method using generalized functions. A subpixel shift is carried out using a spatial shift by a value less than the element of resolution.

Apertures of various shapes are used, for example, elliptical, diamond-shaped, hexagonal, but rectangular apertures are most commonly used. The discretization equation involves the use of a two-dimensional aperture function. Below is a way to increase the resolution when using a one-dimensional function. This can be done based on the structure of the holographic signal. In this case, you can use a subpixel shift in only one direction.

Digital holography is distinguished by the fact that photodetector matrices which have a spatial resolution much lower than photographic media used in traditional holography methods are used to register the signal,. Therefore, digital holography uses optical schemes with small angles between interfering beams. However, certain restrictions are imposed on the shape of the objects under study. If the objects have a shape that is significantly different from a flat one, it is necessary to use traditional schemes.

The article presents mathematical modeling of the resolution enhancement method based on the recovery of signals from a real hologram obtained in the usual way. The increase in resolution is achieved using a one-dimensional subpixel shift.

The use of a one-dimensional subpixel shift makes it possible to significantly simplify the optical scheme of the holographic setup.

Keywords: digital holography, sampling, sampling rate, spatial frequencies, generalized functions, Fourier transform, spectrum, super resolution, subpixel shift

REFERENCES

1. Leith E.N., Upatnieks J. Reconstructed wavefronts and communication theory. *Journal of the Optical Society of America*, 1962, vol. 52, pp. 1123–1130.

2. Collie R., Burckhardt Ch., Lin L. *Opticheskaya golografiya* [Optical holography]. Moscow, Mir Publ., 1973. 686 p. (In Russian).

3. Caulfield G., ed. *Optical holography*. New York, Academic Press, 1979 (Russ. ed.: *Opticheskaya golografiya*. V 2 t. Moscow, Mir Publ., 1982. 735 p.).

4. Miller M. *Golografiya* [Holography]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1979. 140 p. (In Russian).

5. Goodman J.W., Lawrence R.W. Digital image formation from electronically detected holograms. *Applied Physics Letters*, 1967, vol. 11, no. 3, pp. 77–79.

6. Yaroslavskii L.P., Merzlyakov N.S. *Tsifrovaya golografiya* [Digital holography]. Moscow, Nauka Publ., 1982. 219 p.

7. Schnars U., Jueptner W. Direct recording of holograms by a CCD-target and numerical reconstruction. *Applied Optics*, 1994, vol. 33, no. 2, pp. 179–181.

8. Guzhov V.I. *Komp'yuternaya golografiya* [Computer holography]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2018. 270 p. ISBN 978-5-8114-3410-7.

* *Received 16 January 2022.*

9. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Khaibullin S.V. Phase information recovery based on the methods of phase shifting interferometry with small angles between interfering beams. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, vol. 53, iss. 3, pp. 288–293. DOI: 10.3103/S875669901703013X. Translated from *Avtometriya*, 2017, vol. 53, iss. 3, pp. 101–106. DOI: 10.15372/AUT20170313.

10. Vas'kov S.T., Efimov V.M., Reznik A.L. Fast digital image and signal reconstruction by the minimum energy criterion. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2003, iss. 4, pp. 11–17. Translated from *Avtometriya*, 2003, vol. 39, no. 4, pp. 13–20.

11. Paturzo M., Merola F., Grilli S., Nicola S. De, Finizio A., Ferraro P. Super-resolution in digital holography by a two-dimensional dynamic phase grating. *Optics Express*, 2008, vol. 16, pp. 17107–17118.

12. Claus D. High resolution digital holographic synthetic aperture applied to deformation measurement and extended depth of field method. *Applied Optics*, 2010, vol. 49 (16), pp. 3187–3198.

13. Tippie A.E., Kumar A., Fienup J.R. High-resolution synthetic-aperture digital holography with digital phase and pupil correction. *Optics Express*, 2011, vol. 19, no. 13, pp. 12027–12038.

14. Blazhevich S.V., Selyutina E.S. Povyshenie razresheniya tsifrovogo izobrazheniya s ispol'zovaniem subpiksel'nogo skanirovaniya [Sub-pixel scanning to produce super-resolution digital images]. *Nauchnye vedomosti Belgorodskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika. Fizika = Belgorod State University Scientific Bulletin. Mathematics and Physics*, 2014, no. 5 (176), pp. 189–190.

15. Kotel'nikov V.A. O propusknoi sposobnosti «efira» i provoloki v elektrosvyazi [On the transmission capacity of 'ether' and wire in electric communications]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi*, 2006, vol. 176, no. 7, pp. 762–770. (In Russian).

16. Nyquist H. Certain topics in telegraph transmission theory. *Transactions of the American Institute of Electrical Engineers*, 1928, vol. 47, pp. 617–644.

17. Wittaker E.T. On the function which are represented by the expansion of interpolating theory. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, 1915, vol. 35, pp. 181–194.

18. Shannon C.E. Communication in the presence of noise. *Proceedings of the IRE*, 1949, vol. 37, no. 1, pp. 10–21.

19. Guzhov V.I., Marchenko I.O., Trubilina E.E., Trubilin A.A. Diskretizatsiya signalov s pomoshch'yu konechnogo nabora apertur [Sampling signals with finite set of apertures]. *Omskii nauchnyi vestnik = Omsk Scientific Bulletin*, 2021, no. 1 (175), pp. 55–58. DOI: 10.25206/1813-8225-2021-175-55-58.

20. Vladimirov V.S. *Obobshchennye funktsii v matematicheskoi fizike* [Generalized functions in mathematical physics]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 320 p.

21. Gel'fant I.M., Shilov G.E. *Obobshchennye funktsii i deistviya nad nimi* [Generalized functions and actions on them]. 2nd ed. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1959. 470 p.

22. Guzhov V.I., Marchenko I.O., Trubilina E.E. Povyshenie prostranstvennogo razresheniya signalov v opticheskikh sistemakh [Increasing the spatial resolution of signals in optical systems]. *Komp'yuternaya optika = Computer Optics*, 2022, vol. 46 (1), pp. 65–70. DOI: 10.18287/2412-6179-CO-924. (In Russian).

23. Guzhov V.I., Il'inykh S.P., Zakharov K.V., Maier O.Yu. Vosstanovlenie izobrazhenii iz serii gologramm, zaregistrirovannykh s nizkim razresheniem s pomoshch'yu novogo uravneniya diskretizatsii [Reconstruction of images from a series of low-resolution holograms using a new discretization equation]. *Avtometriya = Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2022, vol. 58, no. 4, pp. 125–139. DOI: 10.15372/AUT20220413. (In Russian).

Для цитирования:

Повышение пространственного разрешения цифровых голограмм с помощью одномерного субпиксельного сканирования / В.И. Гужов, Д.С. Хайдуков, К.В. Захаров, О.Ю. Майер // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 1 (89). – С. 81–90. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-81-90.

For citation:

Guzhov V.I., Khaidukov D.S., Zakharov K.V., Mayer O.Yu. Povyshenie prostranstvennogo razresheniya tsifrovykh gologramm s pomoshch'yu odnomernogo subpiksel'nogo skanirovaniya [Improving the spatial resolution of digital holograms using one-dimensional subpixel scanning]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 81–90. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-81-90.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 89, № 1, 2023, с. 91–100

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 89, No. 1, 2023, pp. 91–100

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

УДК 519.873

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-91-100

Оценка изменения фотосинтетической активной радиации светодиодного источника света в зависимости от времени эксплуатации*

В.С. СОЛДАТКИН[a], В.И. ТУЕВ[b], А.Ю. ХОМЯКОВ[c]

634050, г. Томск, пр. Ленина, 40, Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники

[a] *soldatkinvs@main.tusur.ru* [b] *vasilii.i.tuev@tusur.ru* [c] *khomyakov.a.yu@gmail.com*

Современные светодиодные источники света позволяют создавать необходимые значения фотосинтетической облученности как для выращивания рассады, так и для выращивания овощных культур в условиях закрытого грунта. Именно светодиодные источники света в ближайшем времени придут на смену натриевым лампам, которые используются в большинстве тепличных хозяйств, площадь которых на территории Российской Федерации насчитывается более трех тысяч гектар, при потреблении электроэнергии на освещение одного гектара теплицы не менее 1 МВт в час. В работе изложены результаты экспериментальных исследований фотонных характеристик светодиодных ламп. Проведены измерения светотехнических характеристик светодиодных ламп; проведен перерасчет световых величин в энергетические в соответствие с ГОСТ Р 58461–2019; проведены исследовательские испытания светодиодных ламп в нормальных климатических условиях в течение 10 000 часов с промежуточным испытанием на наработке в 5000 часов. Установлено, что среднеарифметическое значение фотосинтетической облученности снизилось в 1,9 раза. Со временем эксплуатации растет спектральная составляющая в синей области оптического спектра от 0,35 до 0,6 относительных единиц, при этом спектральная составляющая в желто-красной области оптического спектра снижается со временем эксплуатации. Снижение фотосинтетической облученности связано с деградацией люминофорной композиции со временем эксплуатации. Результаты данных исследований могут быть использованы разработчиками светодиодных источников света с целью повышения сохраняемости фотонных характеристик со временем эксплуатации, а в частности для совершенствования люминофорной композиции, обеспечивающей фотосинтетическую облученность источника света со временем эксплуатации.

Ключевые слова: фотосинтетическая облученность, светодиодные источники света, тепличные хозяйства, закрытый грунт, спектральные характеристики источников света, сохраняемость фотонных характеристик в процессе эксплуатации, люминофорная композиция, надежность, срок службы

---

* *Статья получена 08 февраля 2022 г.*

ВВЕДЕНИЕ

Свет важен не только для человека, но и для объектов всего биологического разнообразия на планете. Свет играет ключевую роль в росте, развитии и плодородности растений. Фотосинтез – фотобиологический процесс образования органических веществ из углекислого газа и воды под действием оптического излучения с выделением кислорода. Фотосинтез является неотъемлемым процессом развития растений [1]. Согласно [2], в рацион питания населения должны входить овощи, зелень и др. На большей части территории Российской Федерации исходя из климатических условий не представляется возможным в круглогодичном режиме обеспечивать население свежими овощами и зеленью, выращенными в открытом грунте. По этой причине используются сооружения защищенного грунта для выращивания продовольственных растений, таких как томаты, огурцы, салат и т. д. Согласно оценке экспертов [3], на территории нашей страны, общая площадь теплиц, эксплуатируемых в зимний период 2021 г., составила 3298 га, в весенний – 1017 га и в летний (парники и укрытия) – 56 га. Урожайность теплиц должна составлять в среднем 50 кг с одного квадратного метра, и для обеспечения рентабельности тепличное хозяйство должно иметь площадь не менее пяти гектар. Потребление электроэнергии на освещение одного гектара теплицы составляет примерно 1 МВт в час [4, 5]. Для сопоставления значений: в России за январь–июль 2022 г. объем электрической генерации составил $6{,}586 \times 10^8$ МВт в час [6], город Москва на утилитарное освещение потребляет от 450 до 1500 МВт в час в зависимости от длительности светового дня [7].

В настоящее время большинство тепличных хозяйств для освещения используют газоразрядные лампы ДНаТ (или ДНаЗ). Известно, что применение светодиодов в освещении теплиц позволяет снизить затраты на электроэнергию до 40 % [8]. На этом основании исследование применения светодиодных светильников в теплицах является актуальным.

Целью работы является исследование зависимости фотосинтетически активного потока радиации светодиодного источника света от времени эксплуатации.

Для достижения поставленной цели следует решить следующие задачи:

1) изготовить макеты светодиодных источников света;

2) провести измерение спектральных характеристик светодиодных источников излучения непосредственно после изготовления, а также после наработки через 10 000 часов;

3) провести сравнительный анализ полученных результатов.

1. УТОЧНЕНИЕ ЗАДАЧИ

Известно, что светодиодные источники света обладают световой отдачей до 250 лм/Вт и индексом цветопередачи до 95 [9– 11]. Для освещения растений ключевыми параметрами являются фотосинтетический поток фотонов, фотосинтетическая облученность и эффективность облучательного прибора в области фотосинтетически активной радиации. Фотосинтетический поток излучения – это поток излучения в области фотосинтетически активной радиации

(ФАР), а ФАР – это оптическое излучение в диапазоне длин волн от 400 до 700 нм, используемое растениями для фотосинтеза, роста и развития [4].

В стандарте [12] указано, что эффективность приборов в области фотосинтетически активной радиации должна быть:

– не менее 2,0 (мкмоль/с) / Вт – для приборов, предназначенных для освещения растений сверху;

– не менее 2,0 1,8 (мкмоль/с) / Вт – для приборов, предназначенных для дополнительного освещения растений в объеме циноза (межрядное освещение);

– не менее 2,0 1,9 (мкмоль/с) / Вт – для приборов, предназначенных для освещения растений в многоярусных установках стеллажного типа.

Согласно исследованиям [13], оптимальный спектр излучения источника света для фотосинтеза для всех видов и условий выращивания растений имеет два широких максимума длин волн с центрами на 620 и 440 нм и с «плечом» на 670 нм. Известно, что принцип работы большинства светодиодов белого цвета свечения основан на электролюминесценции кристалла синего цвета свечения в диапазоне длин волн 440…460 нм и фотолюминесценции люминофорной композиции в диапазоне длин волн 480…780 нм с максимумом длины волны 560 нм [14–16]. Соответственно, такие светодиоды белого цвета свечения можно использовать для выращивания растений. По данным [15], в России в 2019 г. для агропромышленного освещения произведено светодиодных светильников 2,2 тыс. шт. на сумму 8,1 млн рублей, традиционных – 129,3 тыс. шт. на сумму 451,8 млн рублей. Импортировано светодиодных светильников 134,6 тыс. шт. на сумму 2 252,2 млн рублей, традиционных – 39,9 тыс. шт., на сумму 554,2 млн рублей.

Для создания искусственного освещения для выращивания овощей и рассады применяются натриевые зеркальные лампы, например, ДНаЗ «Рефлакс» производства ООО «МОСТ Продакшн» или Philips [18].

На смену ДНаЗ в настоящее время приходят светодиодные источники света, например, светодиоды LM301H EVO производства ПАО Samsung (Республика Корея) при значениях прямого тока 65 мА и напряжения 2,7 В, фотосинтетический поток фотонов 0,56 мкмоль/с, эффективность облучательного прибора в области фотосинтетически активной радиации 3,14 мкмоль/Дж [11] или, например, светодиодный светильник «Diora Quadro Agro 30/4000 (PPF 70) Д лира», который имеет мощность 30 Вт, коррелированную цветовую температуру 4500 К, фотосинтетический поток излучения 70 мкмоль/с [19].

Отдельно следует отметить светодиодную лампу, которая содержит колбу, заполненную инертным газом, внутри которой находятся светодиодные излучающие элементы, электрически соединенные с устройством питания и управления, размещенным в цоколе лампы, при этом колба герметично соединена с цоколем лампы [16].

Конструкция лампы обеспечивает монтаж в стандартные светильники для ламп накаливания, что позволяет применять ее для выращивания рассады в бытовых условиях.

Для проведения оценки изменения фотосинтетического потока излучения светодиодного источника света в зависимости от времени эксплуатации выбрана светодиодная лампа [16], которая может применяться для выращивания рассады в бытовых условиях.

1.1. ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ, СВЕТОВЫЕ И ФОТОННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ВЕЛИЧИНЫ

Согласно [1], к энергетическим физическим величинам, в частности, относятся поток излучения (Вт), сила излучения (Вт/ср) и облучбнность (Вт/м^2).

Аналогами энергетическим являются световые физические величины: световой поток (лм), сила света (кд), освещенность (лк).

Переход от энергетических величин к световым осуществляется через коэффициент преобразования по формуле

$$A_{\text{с}} = K_{\text{э.с}} A_{\text{э}}, \tag{1}$$

где $A_{\text{с}}$ – световой поток, лм (сила света или освещенность); $K_{\text{э.с}}$ – коэффициент преобразования; $A_{\text{э}}$ – поток излучения, Вт.

Коэффициент преобразования определяется по формуле

$$K_{\text{э.с}} = \frac{K_m \int\limits_{400}^{700} \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda}{\int\limits_{400}^{700} \varphi(\lambda) d\lambda}, \tag{2}$$

где K_m – множитель для дневного зрения, равный 683 лм/Вт; $\varphi(\lambda)$ – спектральное распределение, Вт/нм; $V(\lambda)$ – относительная спектральная световая эффективность излучения; λ – длина волны, нм.

Аналогами энергетическим являются также фотонные физические величины: поток фотонов, фотонная сила света, фотонная облученность и т. д.

Переход от энергетических величин $A_{\text{э}}$ к фотонным $A_{\text{ф}}$ осуществляется через коэффициент преобразования $K_{\text{э.ф}}$ по формулам:

$$A_{\text{ф}} = K_{\text{э.ф}} A_{\text{э}}; \tag{3}$$

$$K_{\text{э.ф}} = \frac{\int\limits_{400}^{700} \varphi(\lambda) \dfrac{\lambda}{hcN_a} d\lambda}{\int\limits_{400}^{700} \varphi(\lambda) d\lambda}, \tag{4}$$

где $h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Дж $\cdot$ с – постоянная Планка; $c = 3 \cdot 10^{17}$ нм/с – скорость света; $Na = 6{,}022 \cdot 10^{23}$ моль$^{-1}$.

Преобразование световых величин в фотонные осуществляется по формуле

$$A_{\text{ф}} = K_{\text{с.ф}} A_{\text{с}}, \tag{5}$$

где $A_{\text{ф}}$ – фотосинтетический поток фотонов, мкмоль/с (фотонная сила света или фотонная облученность); $A_{\text{с}}$ – световой поток, лм (сила света или осве-

щенность); $K_{\text{с.ф}}$ – коэффициент преобразования, который определяется по формуле

$$K_{\text{с.ф}} = \frac{\int\limits_{400}^{700} \varphi(\lambda) \frac{\lambda}{hcN_a} d\lambda}{K_m \int\limits_{400}^{700} \varphi(\lambda) V(\lambda) d\lambda}. \quad (6)$$

В случае измерения спектрорадиометром спектральной плотности энергетической облученности в области ФАР в диапазоне от 400 до 700 нм облученность $E_{\text{ФАР}}$, мкмоль / (с · м^2), рассчитывают по формуле

$$E_{\text{ФАР}} = \int\limits_{400}^{700} E_\lambda \frac{\lambda}{hcN_a} d\lambda = K \int\limits_{400}^{700} E_\lambda \lambda d\lambda. \quad (7)$$

где E_λ – спектральная плотность энергетической облученности, Вт/(м^2 · нм); K – $8{,}36 \cdot 10^{-3}$ мкмоль · нм$^{-1}$ · Дж$^{-1}$ – коэффициент.

2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для проведения эксперимента изготовлено 10 макетов светодиодных ламп с цоколем Е27 ГОСТ 28108-89, тип колбы А ГОСТ Р МЭК 60064-99. В качестве источника оптического излучения используются светодиодные излучающие элементы ленточного типа.

Для проведения исследовательских испытаний в соответствии с ГОСТ Р 54815-2011 был изготовлен лабораторный стенд для исследования светотехнических характеристик. В его состав вошли ЛАТР, ваттметр и спектроколориметр ТКА-ВД/02.

Исследовательские испытания проводились в затемненной комнате и нормальных условиях в следующем порядке: макет лампы устанавливается в зажим цоколем вверх; оптическая ось выставляется в горизонтальной плоскости между макетом лампы (центром колбы) с фотоэлементом спектроколориметра; макет лампы подключается к ЛАТР, путем вращения ручки ЛАТР устанавливается напряжение на его выходе 220 ± 2 В; макет лампы выдерживается во включенном состоянии не менее 5 минут для термостабилизации; затем проводится измерение светотехнических характеристик лампы с применением спектроколориметра ТКА-ВД/02 и комплектного программного обеспечения. Далее по данной методике проводятся испытания для оставшихся девяти ламп.

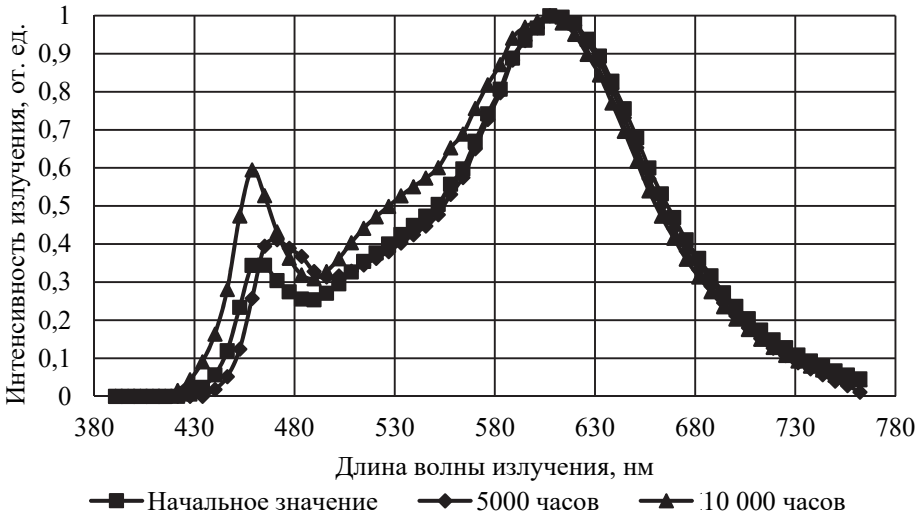
Полученные светотехнические характеристики светодиодных ламп представлены на рисунке и в таблице, среднеарифметическое значение потребляемой мощности (3,7 ± 10 %) Вт.

Далее лампы были установлены в испытательный стенд до наработки в 10 000 часов с промежуточным испытанием на наработке в 5000 часов. На каждом из этапов проводилось измерение светотехнических характеристик ламп

и с использованием формул (1) – (7) выполнялся перерасчет световых величин в энергетические. Полученные данные занесены в таблицу.

Из сопоставления данных рисунка следует, что со временем эксплуатации растет спектральная составляющая в синей области оптического спектра от 0,35 до 0,6 относительных единиц. Так как шкала интенсивности излучения нормирована, из графика можно сделать вывод, что спектральная составляющая в желто-красной области оптического спектра снижается со временем эксплуатации.

В таблице приведены среднеарифметические значения параметров светодиодных ламп до эксплуатации и в процессе эксплуатации, из которых видно, что со временем эксплуатации снижается излучательная способность светодиодной лампы.



Спектральные характеристики светодиодных ламп в зависимости от времени эксплуатации

Spectral characteristics of LED lamps depending on the operating time

Среднеарифметические значения результатов измерения ламп до эксплуатации и в процессе эксплуатации

Arithmetic mean values of lamp measurements before and during operation

Наименование параметра	Начальное значение	5000 часов	10 000 часов
Освещенность, лк	2596 ± 10 %	2573,1 ± 10 %	1369,8 ± 10 %
Облученность, Вт/м^2	8,18 ± 10 %	8,11 ± 10 %	4,26 ± 10 %
Фотосинтетическая облученность, мкмоль/с·м^2	40,3 ± 10 %	39,9 ± 10 %	20,5 ± 10 %

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе изложены результаты проведения экспериментальных исследований фотонных характеристик светодиодных ламп. Проведены измерения спектров излучения светодиодных ламп, рассчитаны значения фотосинтетической облученности, проведены исследовательские испытания светодиодных ламп в нормальных климатических условиях в течение 10 000 часов.

Установлено, что при эксплуатации в течение 10 000 часов в нормальных климатических условиях среднеарифметическое значение фотосинтетической облученности снизилось в 1,9 раза. Из графика со спектрами излучения светодиодных ламп можно сделать вывод, что снижение фотосинтетической облученности связано с деградацией люминофорной композиции при эксплуатации.

Результаты данных исследований могут быть использованы разработчиками светодиодных источников света для выращивания рассады и растений с целью повышения сохраняемости фотонных характеристик при эксплуатации, а в частности, для совершенствования люминофорной композиции, обеспечивающей фотосинтетическую облученность источника света.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ГОСТ Р 58461–2019. Освещение растений в сооружениях защищенного грунта. Термины и определения. – М: Стандартинформ, 2020. – 19 с.

2. СанПиН 2.3/2.4.3590-20. Санитарно-эпидемиологические требования к организации общественного питания населения. – 2020. – 57 с.

3. *Багненко О.* Тепличная отрасль России – 2022. – URL: https://www.apk-news.ru/teplichnaya-otrasl-rossii-2022-3/ (дата обращения: 07.03.2023).

4. *Глушков М.* Тепличное строительство: почему российские олигархи «подсели» на овощи / беседу вела Е. Мацейко // Строительство.ru. – 03.11.2016. – URL: https://rcmm.ru/ekonomika-i-biznes/31113-teplichnoe-stroitelstvo-pochemu-rossiyskie-oligarhi-podseli-na-ovoschi.html (дата обращения: 07.03.2023).

5. *Гнездова О.Е., Чугункова Е.С.* Энергообеспечение тепличных хозяйств с генерацией электрической и тепловой энергии и выработкой CO_2 // Силовое и энергетическое оборудование. Автономные системы. – 2019. – Т. 2, № 3. – С. 141–151.

6. Информационное агентство «AK&M». – URL: https://www.akm.ru/news/obem_elektricheskoy_generatsii_v_rossii_za_yanvar_iyul_2022_goda_vyros_na_1_5_/ (дата обращения: 07.03.2023).

7. Официальный сайт МИА «Россия сегодня». – URL: https://realty.ria.ru/20221111/usa-1830751971.html (дата обращения: 07.03.2023).

8. *Медведева А.* Реальную экономию от светодиодов в теплицах подсчитать сложно, но можно. – URL: https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agromir-xxi/novosti/realnuyu-yekonomiyu-ot-svetodiodov-v-teplicah-podschitat-slozhno-no-mozhno.html (дата обращения: 07.03.2023).

9. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy / Y. Narukawa, M. Ichikawa, D. Sanga, M. Sano, T. Mukai // Journal of Physics: Applied Physics. – 2010. – Vol. 43. – P. 354002.

10. *Андреева М.В., Солдаткин В.С., Туев В.И.* Оценка пространственного распределения спектроколориметрических характеристик светодиодных ламп в шагах МакАдама // Системы анализа и обработки данных. – 2022. – № 3 (87). – С. 75–88. – DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88.

11. Официальный сайт Samsung. – URL: https://www.samsung.com/led/lighting/mid-power-leds/3030-leds/lm301h-evo/ (дата обращения: 07.03.2023).

12. ГОСТ Р 57671–2017. Приборы облучательные со светодиодными источниками света для теплиц. Общие технические условия. – М: Стандартинформ, 2017. – URL: https://docs.cntd.ru/document/1200147051 (дата обращения: 07.03.2023).

13. *McCree K.J.* Action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants // Agricultural Meteorology. – 1972. – N 9. – P. 191–216.

14. Определение температурной зависимости электрических и световых параметров светодиодных элементов в лампе общего назначения / В.С. Солдаткин, К.Н. Афонин, В.С. Каменкова, Е.С. Ганская, В.И. Туев // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2017. – Т. 20, № 3. – С. 148–151.

15. Группа компаний «Лайтинг Бизнес Консалтинг»: сайт. – URL: https://www.lbconsulting.ru (дата обращения: 07.03.2023).

16. Патент на полезную модель № 188947 U1 Российская Федерация, МПК F21V 29/10, F21V 15/04, F21K 9/66. Светодиодная лампа: № 2018119785: заявл. 23.05.2018: опубл. 30.04.2019 / Афонин К.Н., Вилисов А.А., Солдаткин В.С. [и др.]; заявитель Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники (ТУСУР).

17. Методические рекомендации по технологическому проектированию теплиц и тепличных комбинатов для выращивания овощей и рассады: РД-АПК 1.10.09.01-14 / разраб. П.Н. Виноградовым и др. – М.: б. и., 2014. – 109 с.

18. OSRAM GmbH: website. – URL: https://www.osram.com/ecat/ (accessed: 07.03.2023).

19. *Полторацкий Д.А., Былков Д.В, Ильчук А.В.* Светодиодный светильник для овощеводства в промышленных тепличных хозяйствах // Сборник избранных статей научной сессии ТУСУР, Томск, 18–20 мая 2022 г.: в 3 ч. – Томск, 2022. – Ч. 1. – С. 270–275. – URL: https://storage.tusur.ru/files/154431/2022-izb-1.pdf (дата обращения: 07.03.2023).

20. Спектроколориметр «ТКА–ВД». – URL: http://www.spectrocolorimeter.ru/modif/tka_vd.html (дата обращения: 07.03.2023).

Солдаткин Василий Сергеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – технологии производства энергоэффективных световых устройств. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: soldatkinvs@main.tusur.ru

Туев Василий Иванович, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – технологии производства энергоэффективных световых устройств. Имеет более 50 печатных работ и учебных пособий. E-mail: tvi_retem@main.tusur.ru

Хомяков Артем Юрьевич, инженер, старший преподаватель кафедры радиоэлектронных технологий и экологического мониторинга Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. Основное направление научных исследований – полупроводниковая светотехника. Имеет более 20 печатных работ и учебных пособий. E-mail: khomyakov.a.yu@gmail.com

Soldatki Vasily S, PhD (Eng.), an associate professor at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is production technology of energy-efficient lighting devices. He has more than 50 printed works and manuals. E-mail: soldatkinvs@main.tusur.ru

Tuev Vasily I, D.Sc. (Eng.), a professor of the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is production technology of energy-efficient lighting devices. He has more than 50 printed works and manuals. E-mail: tvi_retem@main.tusur.ru

Khomyakov Artem Yu, an engineer, a senior lecturer at the Department of Radioelectronic Technologies and Environmental Monitoring, Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics. The main field of his scientific research is semiconductor lighting engineering. He has more than 20 printed works and manuals. E-mail: khomyakov.a.yu@gmail.com

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-91-100

Evaluation of the change in photosynthetic active radiation of the LED light source depending on the operating time *

V.S. SOLDATKIN[a], V.I. TUEV[b], A.YU. KHOMYAKOV[c]

Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics, 40 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

[a] *soldatkinvs@main.tusur.ru* [b] *vasilii.i.tuev@tusur.ru* [c] *khomyakov.a.yu@gmail.com*

Abstract

Modern LED light sources make it possible to create the necessary values of photosynthetic irradiance both for growing seedlings and for growing vegetable crops in greenhouse conditions. It is LED light sources that in the near future will replace sodium lamps, which are used in most greenhouses, The area of these greenhouses in the Russian Federation is more than three thousand hectares, with electricity consumption for lighting one hectare of the greenhouse being at least 1 MW per hour. The paper presents the results of experimental studies of the photonic characteristics of LED lamps. Lighting characteristics of LED lamps were measured; light values were recalculated into energy values in accordance with GOST R 58461-2019. Research tests of LED lamps were carried under normal climatic conditions for 10,000 hours, with an intermediate test running time of 5,000 hours. It was found that the arithmetic mean value of photosynthetic irradiance decreased by 1.9 times. In the process of operation, a spectral component in the blue region of the optical spectrum grows from 0.35 to 0.6 relative units, while the spectral component in the yellow-red region of the optical spectrum decreases with time of operation. The decrease in photosynthetic irradiance is caused with the degradation of the phosphor composition over time. The results of these studies can be used by developers of LED light sources in order to improve the preservation of photonic characteristics over time, and in particular, to improve the phosphor composition that provides photosynthetic irradiation of the light source over time.

Keywords: photosynthetic irradiance, LED light sources, greenhouses, closed ground, spectral characteristics of light sources, preservation of photonic characteristics during operation, luminous composition, reliability, service life

REFERENCES

1. GOST R 58461–2019. *Osveshchenie rastenii v sooruzheniyakh zashchishchennogo grunta. Terminy i opredeleniya* [State Standard R 58461–2019. Plants illumination in greenhouses. Terms and definitions]. Moscow, Standartinform Publ., 2020. 19 p.

2. SanPiN 2.3/2.4.3590-20. *Sanitarno-epidemiologicheskie trebovaniya k organizatsii obshchestvennogo pitaniya naseleniya* [SanPiN 2.3/2.4.3590-20. Sanitary and epidemiological requirements for the organization of public catering of the population]. 2020. 57 p.

3. Bagnenko O. *Teplichnaya otrasl' Rossii – 2022* [Greenhouse industry of Russia – 2022]. Available at: https://www.apk-news.ru/teplichnaya-otrasl-rossii-2022-3/ (accessed 07.03.2023).

4. Glushkov M. Teplichnoe stroitel'stvo: pochemu rossiiskie oligarkhi «podseli» na ovoshchi [Greenhouse construction: why the Russian oligarchs are "hooked" on vegetables]. Interviewer E. Matseiko. *Stroitel'stvo.ru*, 03.11.2016. (In Russian). Available at: https://rcmm.ru/ekonomika-i-biznes/31113-teplichnoe-stroitelstvo-pochemu- rossiyskie-oligarhi-podseli-na-ovoschi.html (accessed 07.03.2023).

5. Gnezdova O.E., Chugunkova E.S. Energoobespechenie teplichnykh khozyaistv s generatsiei elektricheskoi i teplovoi energii i vyrabotkoi CO2 [Thermal/electric energy generation and CO_2 production for greenhouse facilities]. *Silovoe i energeticheskoe oborudovanie. Avtonomnye sistemy = Power and Autonomous Equipment*, 2019, vol. 2, no. 3, pp. 141–151.

6. Information agency "AK&M". (In Russian). Available at: https://www.akm.ru/news/obem_elektricheskoy_generatsii_v_rossii_za_yanvar_iyul_2022_goda_vyros_na_1_5_/ (accessed 07.03.2023).

* *Received 08 February 2022.*

7. Official site of MIA "Russia Today". (In Russian). Available at: https://realty.ria.ru/20221111/usa-1830751971.html (accessed 07.03.2023).

8. Medvedeva A. *Real'nuyu ekonomiyu ot svetodiodov v teplitsakh podschitat' slozhno, no mozhno* [It is difficult to calculate the real savings from LEDs in greenhouses, but it is possible]. Available at: https://www.agroxxi.ru/zhurnal-agromir-xxi/novosti/realnuyu-yekonomiyu-ot-svetodiodov-v-teplicah-podschitat-slozhno-no-mozhno.html (accessed 07.03.2023).

9. Narukawa Y., Ichikawa M., Sanga D., Sano M., Mukai T. White light emitting diodes with super-high luminous efficacy. *Journal of Physics: Applied Physics*, 2010, vol. 43, p. 354002.

10. Andreeva M.V., Soldatkin V.S., Tuev V.I. Otsenka prostranstvennogo raspredeleniya spektrokolorimetricheskikh kharakteristik svetodiodnykh lamp v shagakh MakAdama [Estimation of spatial distribution of spectrocolorimetric characteristics of LED lamps in MacAdam steps]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2022, no. 3 (87), pp. 75–88. DOI: 10.17212/2782-2001-2022-3-75-88.

11. Samsung official website. Available at: https://www.samsung.com/led/lighting/mid-power-leds/3030-leds/lm301h-evo/ (accessed 07.03.2023).

12. GOST R 57671–2017. *Pribory obluchatel'nye so svetodiodnymi istochnikami sveta dlya teplits. Obshchie tekhnicheskie usloviya* [State Standard R 57671–2017. LED irradiators for greenhouses. General specifications]. Moscow, Standartinform Publ., 2017. Available at: https://docs.cntd.ru/document/1200147051 (accessed 07.03.2023).

13. McCree K.J. Action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agricultural Meteorology*, 1972, no. 9, pp. 191–216.

14. Soldatkin V.S., Afonin K.N., Kamenkova V.S., Ganskaya E.S., Tuev V.I. Opredelenie temperaturnoi zavisimosti elektricheskikh i svetovykh parametrov svetodiodnykh elementov v lampe obshchego naznacheniya [Determining temperature dependence of electrical and light parameters for led elements in a general purpose lamp]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 2017, vol. 20, no. 3, pp. 148–151.

15. Group of Companies "Lighting Business Consulting": website. (In Russian). Available at: https://www.lbconsulting.ru (accessed 07.03.2023).

16. Afonin K.N., Vilisov A.A., Soldatkin V.S., et.al. *Svetodiodnaya lampa* [Utility model]. Patent RF, no. 188947 U1, 2019.

17. RD-APK 1.10.09.01-14. *Metodicheskie rekomendatsii po tekhnologicheskomu proektirovaniyu teplits i teplichnykh kombinatov dlya vyrashchivaniya ovoshchei i rassady* [Regulating document AIC 1.10.09.01-14. Guidelines for the technological design of greenhouses and greenhouse plants for growing vegetables and seedlings]. Moscow, 2014. 109 p.

18. OSRAM GmbH: website. Available at: https://www.osram.com/ecat/ (accessed 07.03.2023).

19. Poltoratskii D.A., Bylkov D.V, Il'chuk A.V. [LED lamp for vegetable growing in industrial greenhouses]. *Sbornik izbrannykh statei nauchnoi sessii TUSUR* [Collection of selected articles of the TUSUR scientific session], Tomsk, May 18–20, 2022, pt. 1, pp. 270–275. (In Russian). Available at: https://storage.tusur.ru/files/154431/2022-izb-1.pdf (accessed 07.03.2023).

20. Spectrocolorimeter "TKA-VD". (In Russian). Available at: http://www.spectrocolorimeter.ru/modif/tka_vd.html (accessed 07.03.2023).

Для цитирования:

Солдаткин В.С., Туев В.И., Хомяков А.Ю. Оценка изменения фотосинтетической активной радиации светодиодного источника света в зависимости от времени эксплуатации // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 1 (89). – С. 91–100. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-91-100.

For citation:

Soldatkin V.S., Tuev V.I., Khomyakov A.Yu. Otsenka izmeneniya fotosinteticheskoi aktivnoi radiatsii svetodiodnogo istochnika sveta v zavisimosti ot vremeni ekspluatatsii [Evaluation of the change in photosynthetic active radiation of the LED light source depending on the operating time]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 91–100. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-91-100.

ISSN 2782-2001
Системы анализа
и обработки данных
том 89, № 1, 2023, с. 101–113

http://journals.nstu.ru/vestnik
Analysis and data
processing systems
Vol. 89, No. 1, 2023, pp. 101–113

ЭЛЕКТРОНИКА, ФОТОНИКА, ПРИБОРОСТРОЕНИЕ И СВЯЗЬ

ELECTRONICS, PHOTONICS, INSTRUMENT MAKING AND COMMUNICATIONS

УДК 004.89

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-101-113

Разработка системы сбора, обработки, анализа, идентификации корреляции событий информационной инфраструктуры предприятия*

А.С. СТРЕЛЬЦОВ[1,a], Г.А. ФРАНЦУЗОВА[1,b], Е.А. БАСЫНЯ[1,2,c]

[1] *630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет*
[2] *115409, РФ, г. Москва, Каширское шоссе, 31, Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»*

[a] *andreystreltsov@bk.ru* [b] *frants@ac.cs.nstu.ru* [c] *basinya@mail.ru*

К рассмотрению предлагается система сбора, обработки, анализа, идентификации корреляции событий информационной инфраструктуры предприятия.

По мере развития корпоративных информационных систем число угроз, связанных с нарушением доступности, целостности и конфиденциальности в них, возросло в десятки раз. Обеспечение информационной безопасности является комплексной задачей по реагированию, расследованию и устранению последствий инцидентов информационной безопасности.

В работе предлагается формализованное описание данных, используемых предлагаемой системой. Помимо этого, выделены общая архитектура и принципы функционирования. Особое внимание уделено подробному описанию одной из основных частей системы (агентам сбора данных).

Подсистема сбора информации характеризуется типом собираемой информации: данными о работе приложения, хоста, сети или о межсетевых взаимодействиях. Подсистема подобного класса аккумулирует разнородные данные о системе или сети для того, чтобы в дальнейшем провести их анализ на наличие признаков реализации компьютерных атак. Для сбора данных используются специальные модули – сенсоры и агенты. Первые обычно используются для мониторинга сетевой активности, а вторые – для контроля и анализа действий в определенной системе.

Практическое применение усовершенствованной модели возможно как в рамках исследовательских работ, так и в системах автоматизированного контроля информационной безопасности. Полученные результаты будут использоваться при дальнейшем проектировании комплексной системы непрерывного мониторинга информационной инфраструктуры предприятия: планируется рассмотрение подсистемы хранения данных. Последующая работа над темой позволит детализировать архитектуру и алгоритм функционирования.

* *Статья получена 17 ноября 2022 г.*

Ключевые слова: системы обработки журналов, системы обнаружения атак, системы обнаружения и реагирования, системы сбора информации о безопасности и управления событиями, IDS, IPS, SIEM, администрирование, информационная безопасность

ВВЕДЕНИЕ

В текущих условиях проблематика возникновения атак, связанных с нарушением доступности, целостности и конфиденциальности в информационных системах, возросла в десятки раз, а задача по защите от подобного рода атак становится всё более сложной и особенно актуальной.

Среди множества атак можно выделить несколько явных векторов, которые находятся на стыке защищенности данных и автоматизации систем предприятий. При этом следует принимать во внимание тот факт, что, как правило, система защиты информации реагирует недостаточно быстро и эффективно. Отделы информационной безопасности, которые имеют соответствующие программно-технические средства, такие как системы обнаружения и предотвращения вторжений (англ. IDS/IPS, Intrusion Detection System / Intrusion Prevention System), антивирусные программы, журналы событий, сканеры уязвимостей и т. д., выявляют инциденты информационной безопасности, которые чреваты крупными потерями. В связи с этим в последнее время всё чаще используются процессы мониторинга событий информационной безопасности для обнаружения и обработки выявленных инцидентов информационной безопасности в кратчайшие сроки.

В настоящей работе рассматривается реализация предложенного подхода, который позволит управлять событиями безопасности и осуществлять проактивное (действующее до того, как ситуация станет критической) управление инцидентами и событиями безопасности. Как следствие, появится возможность проводить корректное реагирование на возникающие угрозы ИБ в разнородных информационных системах. Подобного класса решения именуются системами управления информацией о безопасности и событиями безопасности (англ. SIEM, Security information and event management). SIEM должна быть спроектирована таким образом, чтобы обеспечить надлежащую степень защищенности сети.

Основной проблемой при проектировании такой системы является разработка ее общей архитектуры. Важно четко понимать, какие подсистемы и модули должны входить в состав системы, иначе в будущем при разработке может возникнуть необходимость добавлять или удалять некоторые части.

Система сбора, обработки, анализа, идентификации корреляции событий основана на следующей архитектуре: «агенты» – «хранилище данных» – «сервер приложений», которая развертывается поверх защищенной информационной инфраструктуры. Агенты отвечают за сбор событий безопасности, их первоначальную обработку и фильтрацию. Собранная и отфильтрованная информация затем направляется в хранилище данных или так называемый репозиторий, где она хранится во внутреннем формате для последующего использования и анализа сервером приложений. Сервер приложений выполняет основные функции защиты безопасности и анализа собранных данных, а также генерирует отчеты и уведомления.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Необходимо разработать эффективную систему сбора, обработки, анализа, идентификации корреляции событий для привнесения глобальной наблюдаемости в информационную инфраструктуру предприятия, в том числе посредством сбора данных от различных источников (журналов системы, хранилищ информации о событиях безопасности и т. д.) с их дальнейшим распарсиванием и нормализацией.

К системе предъявляются следующие требования:

- визуализация извлекаемых данных;
- наличие программного интерфейса приложения (англ. API, Application Programming Interface);
- функциональность фильтрации или разделения извлекаемых записей по типу;
- реализация многопоточной обработки данных;
- подробное описание выходных данных.

Схематично проектируемая SIEM представлена на рис. 1.

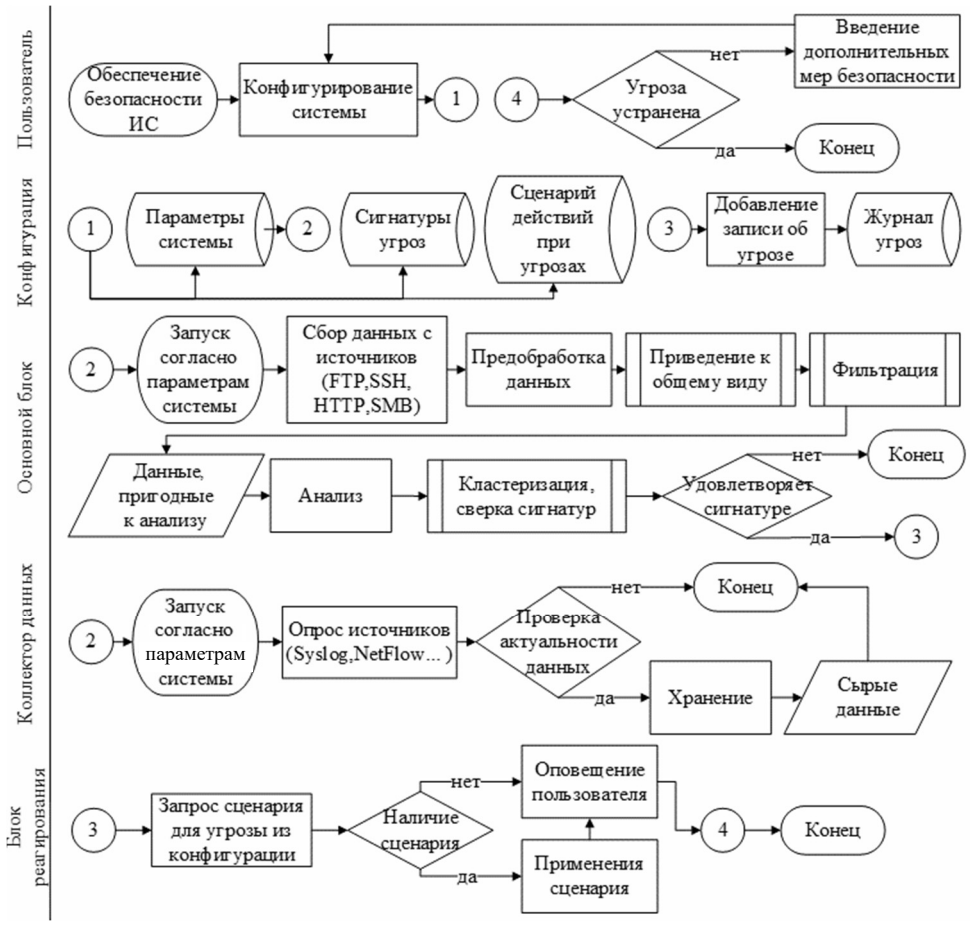


Рис. 1. Структурная блок-схема функционирования проектируемой SIEM

Fig. 1. Structural block diagram of the functioning of the designed SIEM

Для достижения поставленной цели с учетом предъявляемых требований предлагается общую задачу разделить на подзадачи:

1) определение входных данных и их структуризация;
2) определение ресурсов собранных данных;
3) определение выходных данных.

В свою очередь, каждой из подзадач соответствуют свои требования из общего перечня. Так, для определения входных данных и структуризации необходимо иметь их четкое описание. Для второй подзадачи следует ограничить количество собранных данных с целью получения приемлемых результатов и преобразовать их к виду, пригодному для анализа. Решение третьей подзадачи предполагает определение количества результатов и четкое описание выходных данных.

Кроме того, система спроектирована таким образом, чтобы быть масштабируемой и гибкой, поэтому она может адаптироваться к меняющимся потребностям в области безопасности и к потенциальным угрозам. Это достигается путем регулярного обновления системы новыми алгоритмами и протоколами, а также путем мониторинга производительности системы и внесения корректировок по мере необходимости. Другим важным аспектом системы является ее способность интегрироваться с другими системами и инструментами безопасности, такими как брандмауэры, системы обнаружения вторжений и системы информации о безопасности и управления событиями. Это позволяет получить всестороннее представление об общем состоянии безопасности инфраструктуры и обеспечивает быстрое реагирование на любые инциденты безопасности. В целом, проектирование и внедрение системы требует глубокого понимания различных задействованных компонентов и технологий, а также способности предвидеть и адаптироваться к меняющимся потребностям в области безопасности.

Другим важным аспектом системы является ее способность обнаруживать потенциальные угрозы безопасности и реагировать на них в режиме реального времени. Это достигается за счет использования передовых алгоритмов и методов машинного обучения, которые позволяют системе анализировать большие объемы данных и выявлять закономерности и аномалии, которые могут указывать на угрозу безопасности. Система также имеет возможность автоматически реагировать на выявленные угрозы, например, путем блокирования подозрительного трафика или изолирования зараженных систем. Кроме того, система также может быть настроена на отправку оповещений сотрудникам службы безопасности в случае обнаруженной угрозы, что позволяет им принимать немедленные меры.

Однако важно учитывать аспект конфиденциальности данных и безопасности системы. Данные, собранные системой, должны быть зашифрованы во время транспортировки и в состоянии покоя, чтобы предотвратить несанкционированный доступ или нарушения. Также важно иметь надлежащий контроль доступа, чтобы гарантировать, что только авторизованный персонал имеет доступ к данным. Проведение регулярных аудитов безопасности и тестирование на проникновение необходимо для выявления любых уязвимостей или слабых мест в системе и принятия необходимых мер по их устранению.

Таким образом, можно сказать, что разработка системы сбора, обработки, анализа, идентификации корреляции событий требует всестороннего понимания различных задействованных компонентов и технологий, а также способ-

ности прогнозировать и адаптироваться к меняющимся потребностям в области безопасности. Система должна быть способна обнаруживать потенциальные угрозы безопасности и реагировать на них в режиме реального времени, обеспечивая при этом конфиденциальность и безопасность данных.

2. ОПИСАНИЕ СИСТЕМЫ И ФОРМАЛЬНОЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ДАННЫХ

Разрабатываемая SIEM-система имеет преимущество перед рядом средств IDS в том, что она может представлять всесторонний обзор проблем и использовать накопленную статистику для отслеживания отклонений от нормального состояния информационных систем компании. Кроме того, SIEM позволяет сопоставлять события из нескольких источников, обеспечивая более полную картину потенциальных угроз безопасности [1]. Это может помочь в выявлении закономерностей и тенденций, которые могут быть не сразу очевидны с помощью одних только данных IDS. Проектируемая SIEM также имеет возможность реагирования на инциденты, предоставляя компании инструменты, необходимые для расследования инцидентов безопасности и реагирования на них.

Выделим следующие главные механизмы функционирования SIEM-системы, иерархическая модель которой показана на рис. 2:

1) сбор данных: системы SIEM собирают и объединяют данные из различных источников, таких как сетевые устройства, серверы и приложения;

2) нормализация данных: собранные данные нормализуются и сопоставляются для создания согласованного и унифицированного представления о состоянии безопасности организации;

3) корреляция событий: нормализованные данные анализируются для выявления закономерностей и взаимосвязей, а также для обнаружения потенциальных угроз безопасности;

4) генерация оповещений: если обнаружена потенциальная угроза, система SIEM создает оповещение, которое группа безопасности должна исследовать;

5) отчетность и анализ: системы SIEM предоставляют различные отчеты и инструменты анализа, которые помогают командам безопасности понять состояние безопасности своей организации и определить области для улучшения;

6) автоматическое реагирование: некоторые системы SIEM также могут включать в себя функции автоматического реагирования, которые позволяют им выполнять предварительно заданные действия в ответ на определенные типы событий, такие как блокировка IP-адреса или завершение работы скомпрометированной системы;

7) управление соответствием: системы SIEM можно настроить для мониторинга и составления отчетов о соответствии различным стандартам и нормам безопасности, таким как стандарт безопасности индустрии платежных карт (англ. PCI-DSS, Payment Card Industry Data Security Standard) и акт о передаче и защите данных учреждений здравоохранения (англ. HIPAA, Health Insurance Portability and Accountability Act);

8) криминалистическая экспертиза: системы SIEM также можно использовать для сбора и анализа криминалистических данных, таких как файлы журналов, сетевой трафик и образы системы, чтобы помочь в реагировании на инциденты и их расследовании;

9) аналитика угроз: некоторые системы SIEM также могут включать каналы аналитики угроз, чтобы улучшить обнаружение и реагирование на известные угрозы;

10) интеграция: системы SIEM можно интегрировать с другими инструментами безопасности, такими как брандмауэры, системы обнаружения вторжений и сканеры уязвимостей, чтобы обеспечить комплексное решение для обеспечения безопасности.

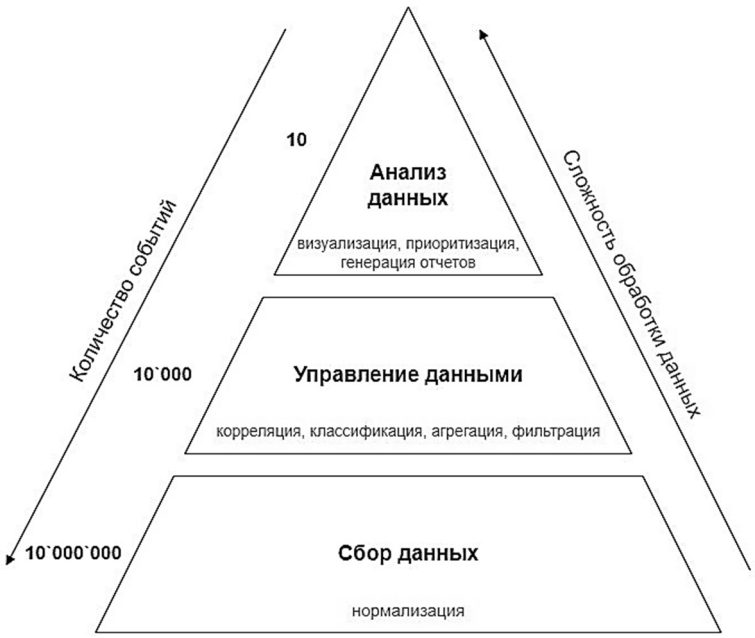


Рис. 2. Обобщенная иерархическая модель данных в SIEM

Fig. 2. A generalized hierarchical data model in SIEM

Следует иметь в виду, что с уменьшением количества обрабатываемых событий возрастает сложность их обработки (рис. 2), т. е. можно предположить, что повышается эффективность всей системы. Взаимосвязь между рабочими механизмами в системе SIEM нового поколения показана функциональной моделью на рис. 3.

Таким образом, в SIEM-системе можно выделить основные функциональные подсистемы:

1) сбора данных;
2) обработки;
3) хранения;
4) анализа;
5) идентификации корреляции;
6) представления.

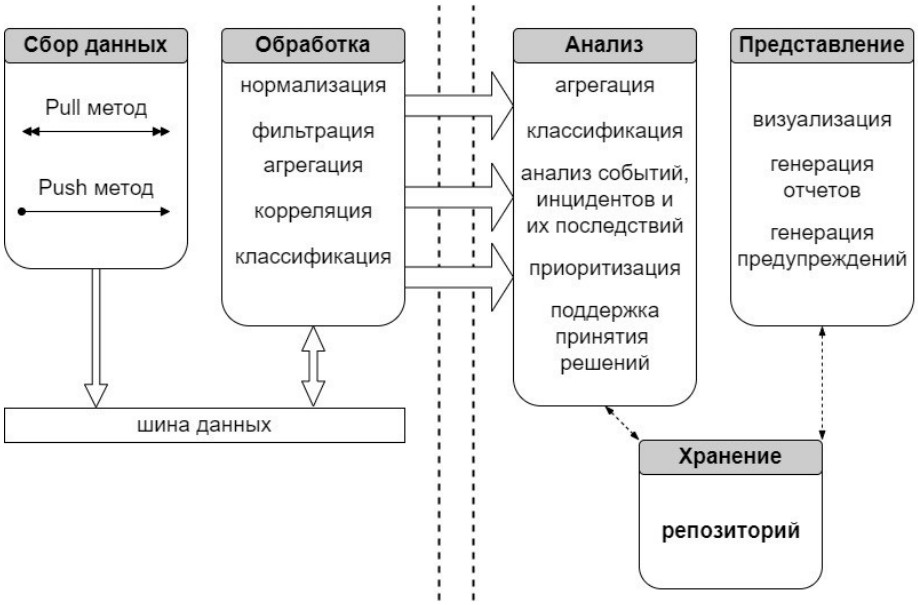


Рис. 3. Функциональная модель SIEM

Fig. 3. The SIEM functional model

Отметим, что первые две подсистемы функционируют в режиме online, а остальные близки к нему.

При этом стоит учитывать, что данные, обрабатываемые защищаемой системой, представляют собой конфиденциальную информацию, составляющую коммерческую тайну. В соответствии с Федеральным законом «О коммерческой тайне» такой информацией могут являться любые сведения, которые имеют коммерческую ценность, обусловленную их неизвестностью третьими лицами. Обладатель таких сведений может на законном основании ограничить доступ к ней путем ввода режима коммерческой тайны на предприятии [2].

Тестовый сегмент информационной структуры (ИС), рассматриваемый в рамках настоящей работы, является обобщенной типовой информационной системой обработки конфиденциальной информации, составляющей коммерческую тайну. Данная ИС включает некоторые популярные корпоративные ресурсы, например, сервер веб-сайта, хранилище данных и автоматизированные рабочие места (АРМ) сотрудников. Информационная структура схематично представлена на рис. 4.

3. КОРРЕЛЯЦИЯ ДАННЫХ В SIEM-СИСТЕМАХ

На этапе корреляции взаимосвязи между разнородными событиями SIEM-система позволяет выявить следующие угрозы:

- нарушения соответствия: системы SIEM могут обнаруживать и предупреждать о действиях, которые нарушают политики безопасности или нормативные требования [4];
- внутренние угрозы: системы SIEM могут обнаруживать и предупреждать о подозрительных действиях внутренних сотрудников, таких как доступ сотрудников к конфиденциальным данным или системам без авторизации или попытки сотрудников эксфильтровать данные;

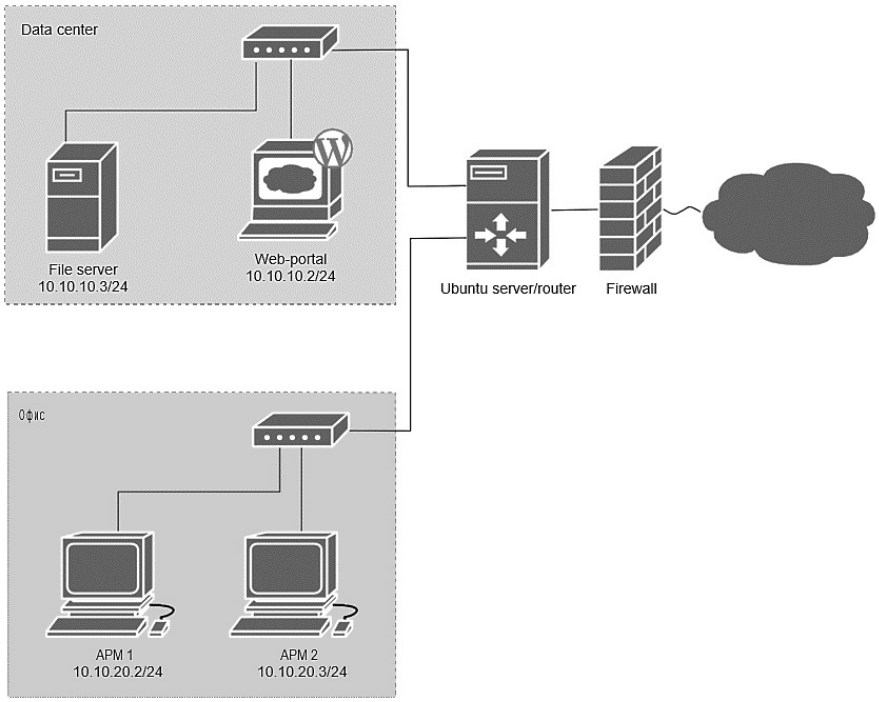


Рис. 4. Схема сегмента информационной структуры

Fig. 4. The information structure segment diagram

- эксфильтрация данных: системы SIEM могут обнаруживать и предупреждать о подозрительной передаче данных, например, о передаче больших объемов данных на подозрительный IP-адрес или передаче данных с использованием неожиданного протокола [3];
- усовершенствованная постоянная угроза (англ. APT, advanced packaging tool), или атаки, обычно организуемые организованными преступными группами: системы SIEM могут обнаруживать изощренные и длительные кибератаки и предупреждать о них;
- атаки типа «отказ в обслуживании» (англ. DoS, Denial of Service)) и «распределенный отказ в обслуживании» (англ. DDoS, Distributed Denial of Service): системы SIEM могут обнаруживать и предупреждать о попытках перегрузить сеть или систему трафиком, что фактически делает ее недоступной для законных пользователей [5];
- фишинг и социальная инженерия: системы SIEM могут обнаруживать и предупреждать о попытках обманом заставить пользователей выдать конфиденциальную информацию, такую как учетные данные для входа или финансовую информацию [9].

Стоит отметить, что SIEM-системы не могут обнаруживать все типы угроз, и возможности обнаружения системы варьируются в зависимости от качества и количества данных, правил, возможностей корреляции и анализа SIEM-системы. Разрабатываемая система мониторинга способна в автоматическом режиме обнаруживать все типы описанных выше инцидентов и в реальном времени классифицировать их по уровню опасности для всей инфраструктуры предприятия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предъявляемые к системе требования распределены по подзадачам, совокупное решение которых позволит спроектировать эффективную систему мониторинга инфраструктуры предприятия. Представлена общая архитектура системы и алгоритм ее функционирования.

При выполнении предварительного тестирования подсистема сбора информации соответствует заявленным ожиданиям: происходит корректный сбор информации из разнородных источников данных (журналов системы, хранилищ информации о событиях безопасности и т. д.), выполняется логирование запускаемых процессов и выявляются вредоносные файлы, обнаруженные антивирусной системой.

В дальнейшем планируется проектирование и разработка комплексной системы непрерывного мониторинга инфраструктуры предприятия. Это позволит представить архитектуру системы и алгоритм функционирования в более детальном виде.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Басыня Е.А.* Распределенная система сбора, обработки и анализа событий информационной безопасности сетевой инфраструктуры предприятия // Безопасность информационных технологий. – 2018. – Т. 25, № 4. – С. 42–51.

2. *Рыболовлев Д.А., Карасёв С.В., Поляков С.А.* Классификация современных систем управления инцидентами безопасности // Вопросы кибербезопасности. – 2018. – № 3 (27). – С. 47–53.

3. *Худайназаров Ю.К., Пермяков А.С., Лепешкин Е.О.* Задачи системы интеллектуального мониторинга информационной безопасности инфотелекоммуникационной сети // XVIII Всероссийская научная конференция «Нейрокомпьютеры и их применение»: тезисы докладов. – М., 2020. – С. 198–200.

4. *Королев И.Д., Попов В.И., Ларионов В.А.* Анализ проблематики системы управления информацией и событиями безопасности в информационных системах // Инновации в науке. – 2018. – № 12 (88). – С. 19–26.

5. *Cinque M., Cotroneo D., Pecchia A.* Challenges and directions in security information and event management (SIEM) // 2018 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW). – IEEE, 2018. – P. 95–99.

6. *Мельник Э.В., Клименко А.Б.* Применение концепции «туманных» вычислений при проектировании высоконадежных информационно-управляющих систем // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 2. – С. 273–283.

7. *Sievierinov O., Ovcharenko M.* Analysis of correlation rules in Security information and event management systems // Computer and Information Systems and Technologies, April 22–23, 2020. – Kharkiv, 2020. – P. 24–25.

8. *Сизов В.А., Киров А.Д.* Проблемы внедрения SIEM-систем в практику управления информационной безопасностью субъектов экономической деятельности // Открытое образование. – 2020. – Т. 24, № 1. – С. 69–79.

9. *Sadowski G., Kavanagh K., Bussa T.* Critical capabilities for security information and event management. – Gartner Group Research Note, 2020.

10. Система идентификации информационных угроз на основе открытых данных сети интернет / Д.О. Маркин, С.М. Макеев, Н.В. Изотов, А.Ю. Андросов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2020. – № 9. – С. 86–94.

11. *Котенко И., Хмыров С.С.* Анализ моделей и методик, используемых для атрибуции нарушителей кибербезопасности при реализации целевых атак // Вопросы кибербезопасности. – 2022. – № 4 (50). – С. 52–79.

12. *González-Granadillo G., González-Zarzosa S., Diaz R.* Security information and event management (SIEM): analysis, trends, and usage in critical infrastructures // Sensors. – 2021. – Vol. 21, N 14. – P. 4759.

13. *Гутников И.В., Гутников К.В.* Организация подсистемы защиты персональных данных на предприятии // Научно-практические исследования. – 2019. – № 8-3. – С. 55–57.

14. *Штеренберг С.И., Данилова Ю.С.* Разработка методики внедрения и выявления эффективности SIEM-системы // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета технологии и дизайна. Серия 1, Естественные и технические науки. – 2020. – № 3. – С. 40–45.

15. *Файзулин Р.Ф., Демичев М.С.* Роль SIEM-системы в обеспечении информационной безопасности // Решетневские чтения. – Красноярск, 2021. – Ч. 2. – С. 452–453.

16. *Абденов А., Дронова Г., Трушин В.* Современные системы управления информационной безопасностью. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2017. – 48 с.

17. *Попков Г.В.* Применение SIEM решений на мультисервисных сетях связи // Интерэкспо Гео-Сибирь. – 2019. – Т. 9. – С. 61–65.

18. *Давдян Т.А.* Современные корпоративные решения по защите информации и выявлению инцидентов информационной безопасности // Вестник науки. – 2022. – Т. 4, № 11 (56). – С. 232–237.

Андрей Сергеевич Стрельцов, аспирант кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований: разработка и исследование систем сбора и анализа данных. E-mail: andreystreltsov@bk.ru

Галина Александровна Французова, доктор технических наук, профессор кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований: анализ и синтез нелинейных систем автоматического регулирования. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru

Евгений Александрович Басыня, кандидат технических наук, доцент кафедры криптологии и кибербезопасности Национального исследовательского ядерного университета «МИФИ» и кафедры автоматики Новосибирского государственного технического университета. Основное направление научных исследований: разработка автоматизированных систем сбора и обработки результатов. E-mail: basinya@mail.ru

Andrey Sergeevich Streltsov, a post-graduate student at the Department of Automation, Novosibirsk Technical University. The main field of his scientific research is development and research of data collection and analysis systems. E-mail: andreystreltsov@bk.ru

Galina Aleksandrovna Frantsuzova, D.Sc. (Eng.), professor, Department of Automation, NSTU. The main field of her scientific research is analysis and synthesis of nonlinear automatic control systems. E-mail: frants@ac.cs.nstu.ru

Evgeniy Aleksandrovich Basinya, Ph.D., an associate professor of the Department of Cryptology and Cybersecurity, MEPhI and Department of Automation NSTU. The main field of scientific his research is development of automated systems for collecting and processing results. E-mail: basinya@corp.nstu.ru

DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-101-113

Development of a system for collecting, processing, analyzing, identifying and correlating events in the information infrastructure of the enterprise[*]

A.S. STRELTSOV[1,a], *G.A. FRANTSUZOVA*[1,b], *E.A. BASINYA*[1,2,c]

[1] *Novosibirsk State Technical University, 20 K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation*
[2] *National Research Nuclear University "MEPhI", 31 Kashirskoye hwy., Moscow, 115409, Russian Federation*

[a] *andreystreltsov@bk.ru* [b] *frants@ac.cs.nstu.ru* [c] *basinya@mail.ru*

Abstract

A system for collecting, processing, analyzing, and identifying correlation of events of the enterprise information infrastructure known as SIEM, is proposed for consideration.

With the development of corporate information systems, the number of threats related to the violation of accessibility, integrity, and confidentiality in them has increased tenfold. Ensuring information security is a complex task of responding, investigating, and eliminating the consequences of information security incidents (IS).

The paper proposes a formalized description of the data that the proposed system uses. In addition, the general architecture and algorithm of functioning are highlighted. Special attention is paid to a detailed description of one of the main parts of the system (data collection agents).

The information collection subsystem is characterized by the type of information collected: data on the operation of the application, host, and network or on inter-network interactions. A subsystem of this class accumulates heterogeneous data on a system or network to further analyze them for signs of computer attacks. To collect data, special modules -sensors and agents -are used, Tthe former are usually used to monitor network activity, and the latter are used to monitor and analyze actions in a particular system.

The practical application of the improved model is possible both in the framework of research work and in automated information security control systems. The results obtained will be used in the further design of a complex system of continuous monitoring of the enterprise infrastructure. It is planned to consider the data storage subsystem. Subsequent work on the topic will allow us to specify the architecture and algorithm of functioning.

Keywords: log processing systems, intrusion detection systems, detection and response systems, security information collection and event management systems, IDS, IPS, SIEM, administration, information security

REFERENCES

1. Basinya E.A. Raspredelennaya sistema sbora, obrabotki i analiza sobytii informatsionnoi bezopasnosti setevoi infrastruktury predpriyatiya [Distributed system of collecting, processing, and analysis of security information events of the enterprise network infrastructure]. *Bezopasnost' informatsionnykh tekhnologii = IT Security*, 2018, vol. 25, no. 4, pp. 42–51.

2. Rybolovlev D.A., Karasev S.V., Polyakov S.A. Klassifikatsiya sovremennykh sistem upravleniya intsidentami bezopasnosti [Classification of modern security incident management systems]. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity Issues*, 2018, no. 3 (27), pp. 47–53.

3. Khudainazarov Yu.K., Permyakov A.S., Lepeshkin E.O. [Tasks of the intelligent monitoring system for the information security of the infotelecommunication network]. *XVIII Vserossiiskaya*

[*] *Received 17 November 2022.*

nauchnaya konferentsiya «Neirokomp'yutery i ikh primenenie» [Neurocomputers and their application]. Moscow, 2020, pp. 198–200. (In Russian).

4. Korolev I.D., Popov V.I., Larionov V.A. Analiz problematiki sistemy upravleniya informatsiei i sobytiyami bezopasnosti v informatsionnykh sistemakh [Analysis of the problems of information management and security events in information systems]. *Innovatsii v nauke = Innovations in Science*, 2018, no. 12 (88), pp. 19–26.

5. Cinque M., Cotroneo D., Pecchia A. Challenges and directions in security information and event management (SIEM). *2018 IEEE International Symposium on Software Reliability Engineering Workshops (ISSREW)*. IEEE, 2018, pp. 95–99.

6. Melnik E.V., Klimenko A.B. Primenenie kontseptsii «tumannykh» vychislenii pri proektirovanii vysokonadezhnykh informatsionno-upravlyayushchikh sistem [A fog-computing concept applying for high-reliable management information system design]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2020, no. 2, pp. 273–283.

7. Sievierinov O., Ovcharenko M. Analysis of correlation rules in Security information and event management systems. *Computer and Information Systems and Technologies*, April 22–23, 2020. Kharkiv, 2020, pp. 24–25.

8. Sizov V.A., Kirov A.D. Problemy vnedreniya SIEM-sistem v praktiku upravleniya informatsionnoi bezopasnost'yu sub"ektov ekonomicheskoi deyatel'nosti [Problems of implementing SIEM systems in the practice of managing information security of economic entities]. *Otkrytoe obrazovanie = Open Education*, 2020, vol. 24, no. 1, pp. 69–79.

9. Sadowski G., Kavanagh K., Bussa T. *Critical capabilities for security information and event management*. Gartner Group Research Note, 2020.

10. Markin D.O., Makeev S.M., Izotov N.V., Androsov A.Yu. Sistema identifikatsii informatsionnykh ugroz na osnove otkrytykh dannykh seti internet [The system for identifying information threats based on open data from the Internet]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki = News of the Tula state university. Technical sciences*, 2020, no. 9, pp. 86–94.

11. Kotenko I., Khmyrov S.S. Analiz modelei i metodik, ispol'zuemykh dlya atributsii narushitelei kiberbezopasnosti pri realizatsii tselevykh atak [Analysis of models and techniques used for attribution of cybersecurity violators in the implementation of targeted attacks]. *Voprosy kiberbezopasnosti = Cybersecurity Issues*, 2022, no. 4 (50), pp. 52–79.

12. González-Granadillo G., González-Zarzosa S., Dias R. Security information and event management (SIEM): analysis, trends, and usage in critical infrastructures. *Sensors*, 2021, vol. 21, no. 14, p. 4759.

13. Gutnikov I.V., Gutnikov K.V. Organizatsiya podsistemy zashchity personal'nykh dannykh na predpriyatii [Organization of personal data protection subsystem at the enterprise]. *Nauchno-prakticheskie issledovaniya = Scientific and practical research*, 2019, no. 8-3, pp. 55–57.

14. Shterenberg S.I., Danilova Yu.S. Razrabotka metodiki vnedreniya i vyyavleniya effektivnosti SIEM-sistemy [Implementation methodology and calculation of the efficiency of a SIEM-system]. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo universiteta tekhnologii i dizaina. Seriya 1, Estestvennye i tekhnicheskie nauki = Vestnik of St. Petersburg State University of Technology and Design. Series 1. Natural and Technical Sciences*, 2020, no. 3, pp. 40–45.

15. Faizulin R.F., Demichev M.S. [Role of the SIEM system in providing information security]. *Reshetnevskie chteniya* [Reshetnev Readings], Krasnoyarsk, 2021, pt. 2, pp. 452–453. (In Russian).

16. Abdenov A., Dronova G., Trushin V. *Sovremennye sistemy upravleniya informatsionnoi bezopasnost'yu* [Modern information security management systems]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2017. 48 p.

17. Popkov G.V. Primenenie SIEM reshenii na mul'tiservisnykh setyakh svyazi [Application of SIEM solutions on multi-service communication networks]. *Interekspo Geo-Sibir' = Interexpo Geo-Siberia*, 2019, vol. 9, pp. 61–65.

18. Davdyan T.A. Sovremennye korporativnye resheniya po zashchite informatsii i vyyavleniyu intsidentov informatsionnoi bezopasnosti [Modern corporate solutions for information protection and identification of information security incidents]. *Vestnik nauki*, 2022, vol. 4, no. 11 (56), pp. 232–237. (In Russian).

Для цитирования:

Стрельцов А.С., Французова Г.А., Басыня Е.А. Разработка системы сбора, обработки, анализа, идентификации корреляции событий информационной инфраструктуры предприятия // Системы анализа и обработки данных. – 2023. – № 1 (89). – С. 101–113. – DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-101-113.

For citation:

Streltsov A.S., Frantsuzova G.A., Basinya E.A. Razrabotka sistemy sbora, obrabotki, analiza, identifikatsii korrelyatsii sobytii informatsionnoi infrastruktury predpriyatiya [Development of a system for collecting, processing, analyzing, identifying and correlating events in the information infrastructure of the enterprise]. *Sistemy analiza i obrabotki dannykh = Analysis and Data Processing Systems*, 2023, no. 1 (89), pp. 101–113. DOI: 10.17212/2782-2001-2023-1-101-113.

Правила для авторов

Журнал «Научный вестник НГТУ» основан в 1995 году на базе Новосибирского государственного технического университета. Печатная версия журнала зарегистрирована в Министерстве РФ по делам печати, телевещания и средств массовых коммуникаций в 2000 году. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-1599 от 10.02.2000. Периодичность выхода издания – один раз в три месяца (четыре номера в год). В 2021 году был переименован в «Системы анализа и обработки данных». Научно-технические статьи, направленные в адрес журнала, проходят рецензирование и редактирование.

В журнале «Системы анализа и обработки данных» публикуются оригинальные статьи по следующим группам специальностей:

1.2.2 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (технические науки), *ранее* 05.13.18;

2.2.6 – Оптические и оптико-электронные приборы и комплексы (технические науки), *ранее* 05.11.07;

2.2.11 – Информационно-измерительные и управляющие системы (технические науки), *ранее* 05.11.16;

2.2.12 – Приборы, системы и изделия медицинского назначения (технические науки), *ранее* 05.11.17;

2.3.1 – Системный анализ, управление и обработка информации, статистика (технические науки), *ранее* 05.13.01;

2.3.5 – Математическое и программное обеспечение вычислительных систем, комплексов и компьютерных сетей (технические науки), *ранее* 05.13.11.

Разделы журнала: информационные технологии и телекоммуникации; компьютерные науки и информатика; электроника, фотоника, приборостроение и связь.

Рекомендуемый объем статьи 10–16 страниц. Статьи объемом, не превышающим 8 страниц, могут быть размещены в разделе «Краткие сообщения». Возможна публикация дискуссионного материала в разделе «Дискуссии». В информационном разделе возможно размещение сообщений о состоявшихся и планируемых конференциях, семинарах и симпозиумах, сведений о факультетах и специальностях, научных разработках и научных школах. Статьи обзорного характера, как правило, не публикуются.

Website: http://journals.nstu.ru/vestnik

Условия приема статей

В редакцию журнала представляются следующие материалы.

1. Статья, подготовленная в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, два экземпляра, подписанных авторами.

2. Контактная информация (телефоны рабочий и сотовый, адреса электронной почты, место работы, адрес места работы, должность, ученая степень, ученое звание автора, ORCID) – печатная версия, два экземпляра.

3. Описание статьи для базы данных «Российский индекс научного цитирования (РИНЦ)», подготовленное в соответствии с правилами оформления, – печатная версия, один экземпляр.

4. Лицензионный договор, заполненный и подписанный, отправляется со всем пакетом документов; сканированный заполненный договор записывается на диск.

5. Электронная версия статьи, контактной информации, описания статьи для базы данных РИНЦ и сканированный лицензионный договор – в отдельных файлах на CD.

6. Экспертное заключение о возможности опубликования.

Плата за публикацию рукописей не взимается.

Требования к оформлению статьи

Формат оригинала **– А4**. Шрифт **– Times New Roman**. Текст набирается в русифицированном редакторе **Microsoft Word**. Параметры страницы (см):

левое поле – 3,3 верхнее поле – 4,0

правое поле – 3,3 нижнее поле – 3,9.

текстовое поле 22 × 14,4

Межстрочные интервалы одинарные. Перед УДК оставляется четыре пустые строки размером 12. УДК набирается прописными буквами кеглем 8. После УДК перед заголовком оставляется пустая строка размером 8. Название статьи набирается кеглем 14 полужирным строчным шрифтом с отступом слева 1,8 см, без переносов слов, с выравниванием влево. После заголовка оставляется пустая строка размером 12. Фамилии автора – прописным шрифтом кеглем 8. После фамилий оставляется пустая строка размером 7. Указатель сноски * после названия статьи устанавливается в верхнем индексе. В сноске дата поступления статьи указывается курсивным шрифтом кеглем 8. После ФИО авторов статьи набирается аннотация кеглем 8 с отступом первой строки на 0,8 см, межстрочный интервал с множителем 1,1. После аннотации оставляется пустая строка размером 4. **Ключевые слова** – кеглем 8.

Заголовки разделов обязательны (например, **Введение**, **Постановка задачи**, **Методы анализа**, **Основной результат**, **Выводы** или **Заключение**), набираются прописным полужирным прямым шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними оставляется пустая строка размером 20, после них – пустая строка размером 10. Основной текст – кеглем 10.

Подзаголовки – прописным полужирным шрифтом кеглем 8 с отступом 1,8 см. Перед ними и после них – пустая строка размером 10.

Рисунки представляются в **Corel Draw 11** или **Microsoft Word (RUS)**. Рисунки в других редакторах не принимаются. Слово *Рис*. и его номер выделяются курсивом. Рисунки должны быть черно-белыми, в описании не должно быть ссылок на цвет.

Рисунки и таблицы нумеруются арабскими цифрами по порядку упоминания их в тексте. После номера должно следовать название **на русском и английском языках**. Подрисуночные подписи и названия таблиц – кеглем 9.

Все графы в таблицах должны иметь заголовки и разделяться вертикальными линиями. В головке таблицы по возможности указываются буквенные обозначения параметров и их единицы измерения.

Переменные в тексте набираются курсивным шрифтом кеглем 10. При написании формул использовать MathType версии не выше 6.0C. Формулы набирать по центру кеглем 11, надстрочные и подстрочные индексы – кеглем 9, знаки – кеглем 14 (латинские буквы – курсивным шрифтом, русские и греческие – прямым, цифры – прямым).

Например:

$$A(s) = \sum_{i=0}^{n^2+3} A_i s \lambda^{(i+1)^2} + \alpha .$$

Между текстом и формулами, а также между формулами оставляются пустые строки размером 4. Формулы не сжимать. Нумерацию формул указывать справа кеглем 10. Например:

$$D_f = D_c D + N_c N. \qquad (1)$$

Нумерация страниц осуществляется следующим образом: Вставка / Номера страниц...; установить **положение** «вверху страницы», **выравнивание** – «снаружи», без нумерации первой страницы.

Колонтитулы устанавливаются вверху (с отступом от верхнего края страницы 3 см). Чтобы колонтитулы на четной, нечетной и первой страницах отличались, нужно установить: Файл / Параметры страницы / Разметка; установить **разные четные и нечетные** и **первая отличается**.

Колонтитулы на четных страницах. Вид / Колонтитулы; набираются курсивным прописным шрифтом кеглем 8. Фамилия автора с инициалами впереди у правого края без отступа. Если авторов несколько, то указываются только два первых, далее «и др.».

Колонтитулы на нечетных страницах. Названия статьи с прописной буквы курсивным шрифтом кеглем 8, номера страниц – кеглем 10.

Перед списком литературы пустая строка размером 20. Заголовок «Список литературы» – кеглем 8 прописным полужирным шрифтом с отступом 1,8 см. После списка литературы пустая строка размером 10. Порядковый номер с красной строки кеглем 8 с интервалом 1,1. Фамилии и инициалы – кеглем 8 полужирным строчным шрифтом, название статьи (книги) – светлым тем же шрифтом. Оформление библиографического списка по ГОСТ Р.7.0.5–2008. Библиографическая ссылка. Общие требования и правила составления. – М.: Стандартинформ, 2008. – 19 с.

После списка литературы идет пустая строка размером 24. Далее приводятся краткие сведения об авторах кеглем 8 с интервалом 1,1 и отступом от левого края 1 см. Фамилия, имя, отчество – с красной строки курсивом. Последующий текст (ученая степень, ученое звание, членство в академиях и т. д.; основное направление научных исследований; количество имеющихся публикаций, в том числе монографий, учебных пособий; e-mail, рабочий телефон) – прямым шрифтом. **Информация предоставляется на русском и английском языках**.

Далее дается перевод на английский язык фамилии, имени, отчества автора и названия статьи, а также реферата и ключевых слов (обязательно).

Исправления, вносимые автором, при доработке статьи **выделять** желтым цветом.

Требования к оформлению РИНЦ

В описании статьи должна быть указана следующая информация.

1. Номера страниц, на которых размещена статья в сборнике.
2. Коды: УДК, и / или ББК, и / или DOI, и / или других классификационных индексов или систем регистрации.
3. Название статьи.
4. Фамилия, имя, отчество авторов.
5. Место работы каждого автора в именительном падеже. Указать должность автора по основному месту работы.
6. Контактная информация (почтовый адрес места работы, номер телефона, адрес электронной почты – обязательно).
7. Аннотация (не менее 320 и не более 640 знаков).
8. Ключевые слова: каждое слово или словосочетание отделяется от другого запятой (10–20 слов).
9. Пункты 3–8 на английском языке.
10. Список литературы.

Образец оформления приведен на сайте http://journal.nstu.ru/vestnik.