

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ
І НАУКИ УКРАЇНИ

Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

MINISTRY OF EDUCATION
AND SCIENCE OF UKRAINE

National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

**Вісник Національного
технічного університету
«ХПІ». Серія: Нові рішення
в сучасних технологіях**

№ 2(4)' 2020

Збірник наукових праць

Видання засноване у 1961 р.

**Bulletin of the National
Technical University
"KhPI". Series: New solutions
in modern technology**

No. 2(4)' 2020

Collection of Scientific papers

The edition was founded in 1961

**Харків
НТУ «ХПІ», 2020**

**Kharkiv
NTU "KhPI", 2020**

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях = Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology : зб. наук. пр. / Нац. техн. ун-т «Харків. політехн. ін-т». — Харків : НТУ «ХПІ», 2020. — № 2(4). — 160 с. — ISSN 2079-5459.

Видання публікує наукові результати та досягнення мультидисциплінарних досліджень молодих науковців широкого профілю у сферах машинобудування, енергетики, технологій органічних і неорганічних речовин, екології, інформаційних технологій і систем управління, техніки та електрофізики високих напруг, а також з фундаментальних аспектів сучасних технологій.

The journal publishes scientific results and accomplishments of multidisciplinary researches of young scientists of a wide profile in the field of machine building, energy, technologies of organic and inorganic substances, ecology, information technologies and control systems, high voltage techniques and electrophysics, as well as on the fundamental aspects of modern technologies.

Свідцтво про державну реєстрацію друкованого засобу масової інформації України
КВ № 23776-13616 від 14 лютого 2019 року.

Мова статей – українська, російська, англійська.

***Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях** включено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук, кандидата наук та ступеня доктора філософії», затвердженого Наказом МОН України № 409 від 17.03.2020 р.*

Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях» включений до зовнішніх інформаційних систем, у тому числі в наукометричну базу даних Index Copernicus (Польща), бібліографічну базу даних OCLC WorldCat (США), індексується пошуковими системами Google Scholar і Crossref; зареєстрований у світовому каталозі періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).

Офіційний сайт видання: <http://vestnik2079-5459.khpi.edu.ua/>

Засновник
Національний технічний університет
«Харківський політехнічний інститут»

Founder
National Technical University
"Kharkiv Polytechnic Institute"

Редакційна колегія

Відповідальний редактор:

Сокол Є. І., д-р техн. наук, чл.-кор. НАН України, НТУ «ХПІ», Україна

Члени редколегії:

Авдієва О. П., НТУ «ХПІ», Україна

Брагіна Л. Л., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Буряковський С. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Вехов Є., Мерилендський університет, США

Гораш Є., проф., Університет Стратклайда, Великобританія

Демидов І. М., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Заковоротний О. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Клепиков В. Б., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Куліченко В. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Ларін О. О., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Львов Г. І., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Мележик Є., Інститут фізики напівпровідників імені В. Є.

Лашкарьова НАНУ, Україна

Меньшикова С. І., НТУ «ХПІ», Україна

Піментел С. Р., проф., Федеральний Університет Гояс,
Бразилія

Раскін Л. Г., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Томашевський Р. С., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Чжан К. Л., проф., Вроцлавський технологічний університет,
Польща

Шевченко С. Ю., проф., НТУ «ХПІ», Україна

Шестопалов О. В., доц., НТУ «ХПІ», Україна

Editorial staff

Associate editor:

Sokol E. I., dr. tech. sc., member-cor. of National Academy of Sciences of Ukraine, NTU "KhPI", Ukraine

Editorial staff members:

Avdieieva O. P., NTU "KhPI", Ukraine

Bragina L. L., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Buriakovskui S. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Vekhov Ye., University of Maryland, College Park, USA

Gorash Ye., prof., University of Strathclyde, UK

Demidov I. N., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Zakovorotniy A. Yu., prof., NTU "KPI", Ukraine

Klepikov V. B., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Kulichenko V. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Larin A. A., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Lvov G. I., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Melezhik Ye., V.E. Lashkaryov Institute of Semiconductor Physics

NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Menshikova S. I., NTU "KhPI", Ukraine

Pimentel S., prof., Federal University of Goias, Brazil

Raskin L. G., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Tomashevskiy R. S., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Chrzan K. L., prof., Wroclaw University of Technology, Poland

Shevchenko S. Yu., prof., NTU "KhPI", Ukraine

Shestopalov A. V., docent, NTU "KhPI", Ukraine

Рекомендовано до друку Вченою радою НТУ «ХПІ».
Протокол № 3 від 26 травня 2020 р.

УДК 621.9.06–233.1

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.01

ВИБРОДИАГНОСТИКА ШПИНДЕЛЬНЫХ УЗЛОВ НА ОПОРАХ КАЧЕНИЯ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЯ ВИБРАЦИЙ КОРПУСА

Ю. М. ДАНИЛЬЧЕНКО*, А. И. ПЕТРИШИН

Кафедра Прикладной гидроаэромеханики и механотроники, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», Киев, УКРАИНА

*e-mail: yumd@i.ua

АННОТАЦИЯ Проведен анализ современных методов оценки точности и технического состояния шпиндельных узлов на опорах качения и дана оценка перспективности проведения измерений в зонах резонансных колебаний. Для оценки точности и технического состояния шпиндельных узлов на опорах качения на стадиях изготовления и эксплуатации предложено использовать ранее разработанный авторами метод косвенного измерения резонансных колебаний шпинделя, в основе которого лежит измерение вибраций на корпусе шпиндельного узла с последующим расчетом колебаний шпинделя (закрепленной в шпинделе оправки) по теоретической функции соответствия. Для использования этого метода при решении задач оценки точности и диагностики дефектов изготовления и сборки шпиндельного узла дано теоретическое обоснование схем измерения, проведена адаптация динамической модели экспериментального стенда и разработаны соответствующие методики проведения исследований. Общая экспериментальная часть методик проведения исследований предусматривает: определение первой собственной частоты рамы стенда; определение частот вращения шпинделя, соответствующих условиям возникновения резонансных колебаний рамы в результате проявления дефектов изготовления и сборки шпиндельного узла; измерение вибраций корпуса на этих частотах вращения. Общая теоретическая часть методик предполагает: расчет динамических податливостей и функции соответствия, связывающей колебания подсистем оправки и корпуса; расчет спектров колебаний оправки по экспериментальным спектрам вибрациям корпуса и определение амплитуд относительных колебаний точки оправки на характерных частотах вынужденных колебаний. По полученным результатам, в зависимости от поставленной задачи, рассчитывается 3D спектр вибраций или диаграмма погрешности вращения шпинделя в заданном диапазоне частот вращения. Представлены результаты оценки точности и технического состояния шлифовальной головки на холостом ходу и под нагрузкой.

Ключевые слова: шпиндельный узел; подшипники качения; дефекты изготовления и сборки; погрешность вращения шпинделя, вибродиагностика; механическая колебательная система; динамическая податливость

DIAGNOSTIC OF SPINDLE UNITS ON ROLLING BEARINGS BASED ON MEASURING OF THE HOUSING VIBRATIONS

Yu. DANYLCHENKO*, A. PETRYSHYN

Applied Fluid Mechanics and Mechatronic Department, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The analysis of modern methods of accuracy and technical condition evaluation of spindle units on rolling bearings has been performed. The prospectivity of measurements in the resonant vibrations zones is assessed. To evaluate the accuracy and technical condition of spindle units on rolling bearings at the stages of manufacturing and maintenance, it is proposed to use the previously developed method for indirect measurement of resonance vibrations of the spindle, based on spindle quill vibration measurement of the spindle units with subsequent calculation of spindle vibrations (mandrel installed in the spindle) using theoretical compliance function. Usage of this method in accuracy and diagnosing defects identification in manufacturing and assembly of the spindle units, a theoretical justification of the measurement schemes is given, the dynamic model of the test rig is adapted, and the corresponding research methods are developed. The general experimental part of research methods provides for: determining the first natural frequency of the test rig frame; determination of spindle speeds corresponding to frame resonant vibrations as a result of manifestation of manufacturing and assembling defects of the spindle unit; spindle quill vibrations measurement at these rotational speeds. The general theoretical part of the methods assumes: the calculation of dynamic compliance and the compliance function which connects mandrel and spindle quill subsystems vibrations; mandrel vibration spectra calculation from the experimental spectra of the spindle quill and determination of the relative vibrations amplitudes of the mandrel at the forced vibrations characteristic frequencies. Based on the results, depending on the task, a 3D spectrum of vibrations or a spindle rotation error diagram in a given range of rotation frequencies is calculated. The results of evaluating the accuracy and technical condition of the grinding head at idle and under load are presented.

Key words: spindle unit; rolling bearings; manufacturing and assembly defects; spindle rotation error; vibration diagnostics; mechanical oscillatory system; dynamic compliance

Введение

Современные тенденции повышения производительности металлорежущих станков с

одновременным обеспечением их высокой точности и надежности требуют внедрения систем оценки технического состояния наиболее ответственных узлов станков, и прежде всего – шпиндельных.

В общем случае точность шпиндельных узлов (ШУ) характеризуется двумя параметрами [1]:

- радиальным биением шпинделя, то есть смещением геометрического центра шпинделя относительно центра его вращения в плоскости измерения;

- погрешностью вращения шпинделя, то есть смещением мгновенной оси поворота шпинделя.

Первый параметр характеризует эксцентриситет шпинделя, а второй – результат взаимодействия вращающихся и неподвижных поверхностей посредством несущих элементов (тела качения, масляная пленка, поток воздуха, магнитное поле).

Для ШУ на подшипниках качения первый параметр характеризует эксцентриситет рабочих и посадочных поверхностей подшипников и шпинделя, а второй – результат упругого взаимодействия дорожек и тел качения подшипников.

При спектральном анализе процесса смещения оси шпинделя, радиальное биение (Δr) – это удвоенная амплитуда спектральной составляющей на частоте вращения шпинделя, а погрешность вращения (Δ) – удвоенная векторная сумма амплитуд всех остальных спектральных составляющих.

Таким образом, оценку точности ШУ на опорах качения целесообразно проводить по результатам измерения вибраций с учетом особенностей влияния качества изготовления подшипников и их монтажа на шпиндель и в корпус [2].

Современные методы контроля погрешности вращения шпинделей построены на схемах бесконтактного измерения линейных смещений шпинделя по измерительным эталонным поверхностям шпинделя или оправки [3, 4]. Но при этом возникает необходимость выделения из результатов измерения составляющей, обусловленной погрешностью формы измерительной поверхности. А от способа решения этой проблемы зависит точность определения погрешности вращения шпинделя [4], что особенно это актуально для прецизионных ШУ, погрешность вращения которых соизмерима с погрешностью формы измерительной поверхности [5]. Такая процедура определения погрешности вращения шпинделя требует обеспечения специальных условий для проведения измерений. Это, в свою очередь, делает проблематичным ее применение для определения погрешности вращения закрепленной в шпинделе заготовки или инструмента в зоне резания во время работы станка. Альтернативой прямому измерению колебаний шпинделя может стать измерение колебаний на корпусе шпиндельного узла с последующей идентификацией этих колебаний по теоретически установленной функции соответствия [6].

Согласно [1], подшипники качения опор шпинделя непосредственно определяют точность ШУ. Но они же, при возникновении локальных повреждений поверхностей дорожек и тел качения в

процессе работы [7], определяют и изменение его технического состояния.

Сигнал вибрации дефектного подшипника качения включает в себя детерминированные сигналы, сигналы дефектов элементов подшипника и шум [8]. Детерминированные сигналы – это, как правило, низкочастотные сигналы, обусловленные погрешностями изготовления дорожек и тел качения подшипников. Сигналы дефектов элементов подшипника – это периодические резонансные колебания несущих элементов, возникающие в результате коротких импульсов, генерируемых каждый раз, когда дефект ударяется по его сопрягаемому элементу [9]. Именно это различие в сигналах позволяет выделять из общего сигнала сигналы дефектов элементов подшипника. Также это различие определяет эффективность методов мониторинга состояния и диагностики неисправностей подшипников качения [10].

Наиболее эффективными для диагностики отказов подшипников считаются методы высокочастотного возбуждения ударными импульсами с последующим анализом огибающей спектра вибраций [8, 9, 10]. Применение низкочастотного возбуждения для обнаружения дефектов элементов низкоскоростных подшипников считается практически невозможным. Основной причиной этого считается ограничения по уровню энергии, генерируемой дефектами элементов подшипника вне резонансных зон [11].

Таким образом, измерение вибраций в резонансных зонах позволяет значительно усилить полезный диагностический сигнал, что и определяет перспективность создание средств и методов проведения такой диагностики.

Цель исследования

Целью исследования является проверка перспективности применения метода косвенного измерения резонансных колебаний шпинделя [6] для оценки точности и технического состояния ШУ на опорах качения как на этапах их изготовления, так и эксплуатации.

Цель реализуется путем решения задач:

- теоретического обоснования схемы косвенного измерения вибраций ШУ на опорах качения для оценки их точности и технического состояния на стадиях изготовления и эксплуатации;
- адаптации динамической модели экспериментального стенда [12] для решения задач оценки точности и технического состояния ШУ на стадиях изготовления и эксплуатации;
- разработки методики проведения исследований при оценке точности и технического состояния ШУ на опорах качения на стадиях изготовления и эксплуатации;
- проведения исследований и анализа полученных результатов.

Основная идея метода косвенного измерения колебаний шпинделя

В основе косвенного метода измерения колебаний шпинделя лежит измерение вибраций на корпусе шпиндельного узла с последующим расчетом колебаний оси шпинделя (закрепленной в шпинделе оправки) по теоретической функции соответствия $W(\omega)$ [6]. Для представленных на рис. 1 схем измерения, функция соответствия $W(\omega)$ связывает колебания корпуса, в месте выполнения измерений (позиция 1) и оси инструментальной оправки (позиция 2).

В общем случае функция соответствия $W(\omega)$ определяется зависимостью:

$$W(\omega) = \frac{q_2(\omega)}{q_1(\omega)}, \quad (1)$$

где $q_2(\omega)$ и $q_1(\omega)$ - расчетные функции перемещения инструментальной оправки в точке 2 и корпуса в точке 1 под действием приложенной в точке 3 единичной гармонической силы (Рис. 1); ω - частота возбуждения.

Размещение точки 3 определяется поставленной задачей. При оценке погрешности изготовления и сборки ШУ на опорах качения точка 3 находится на оси шпинделя под первым передним подшипником (рис. 1,а) [12]. При оценке погрешности вращения шпинделя в процессе обработки, точка 3 находится на оси инструментальной оправки под зоной резания, то есть положения точек 2 и 3 совпадают (рис. 1,б).

Расчет спектра колебаний оси инструментальной оправки по измеренным вибрациям корпуса проводится по зависимости:

$$A_2(\omega_i) = A_1(\omega_i) \cdot W(\omega_i), \quad (2)$$

где $A_1(\omega_i)$ и $A_2(\omega_i)$ - амплитуды i -х спектральных составляющих колебаний экспериментального спектра вибраций корпуса и теоретического спектра колебаний оси оправки соответственно.

Данные спектры являются спектрами абсолютных колебаний. Спектр колебаний оси оправки относительно корпуса получается в результате векторного вычитания соответствующих спектров абсолютных колебаний с учетом фаз спектральных составляющих.

Предложенный теоретико-экспериментальный метод [6] позволяет упростить процедуру оценки и мониторинга состояния шпиндельного узла. Кроме того он не требует использования высокоточных

измерительных поверхностей при определении колебаний шпинделя.

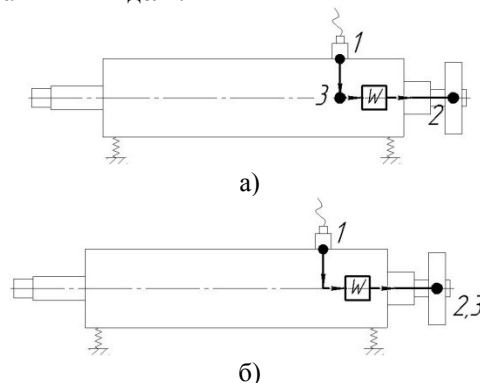


Рис. 1. – Схема измерения для оценки погрешности изготовления и сборки ШУ на опорах качения (а) и колебаний шпинделя (б): 1 – точка измерения вибраций корпуса; 2 – точка расчета колебаний оси шпинделя (оправки); 3 – точка приложения единичной гармонической силы

Конструкция экспериментального стенда

Для проведения исследований использовался разработанный авторами специальный стенд [13] с низкой частотой собственных колебаний.

Основной причиной разработки и использования этого стенда является выполнение поставленной задачи усиления сигнала при диагностировании дефектов подшипников качения опор низкооборотных ШУ.

В общем случае, для обнаружения таких дефектов желательно создать условия резонансного возбуждения вынужденных колебаний, обусловленных погрешностями изготовления рабочих поверхностей дорожек и тел качения подшипников, а также их повреждением (выбоины, сколы) в процессе работы. Для этого нужно обеспечить выполнение условия совпадения частот вынужденных колебаний с одной из частот собственных колебаний механической системы, что сложно реализовать исключительно механической системой ШУ. Так, согласно [14] для вертикально-фрезерного станка первая собственная частота шпиндельной бабки равна 315 Гц, а шпинделя – 1410 Гц. Такие значения собственных частот не позволяют создать условия, достаточные для диагностики дефектов, вызывающих низкочастотные вибрации.

Стенд (рис. 2) представляет собой раму 1, шарнирно закрепленную на массивной основе 2. На раме 1 закреплен ШУ 3 с оправкой 4. Рама 1 крепится к основе 2 пружиной или жестким стержнем 5, что дает ей возможность осуществления колебательного движения в вертикальной плоскости. Бесступенчатое вращение шпинделя обеспечивается двигателем 6 с частотным управлением 7.

В качестве исследуемого ШУ использовалась шлифовальная головка. Корпус головки выполнен в

форме гильзы с наружным диаметром 65 мм и длиной 250 мм. Вал шпинделя смонтирован на дуплексированных радиально-упорных шариковых подшипниках типа 7004, собранных по схеме "тандем-Х".

Низшая собственная частота станда зависит от выбора способа крепления и регулирования угловой жесткости рамы. Применение упругой или жесткой систем фиксации рамы позволяет изменять значение первой собственной частоты станда в диапазоне 5-37 Гц.

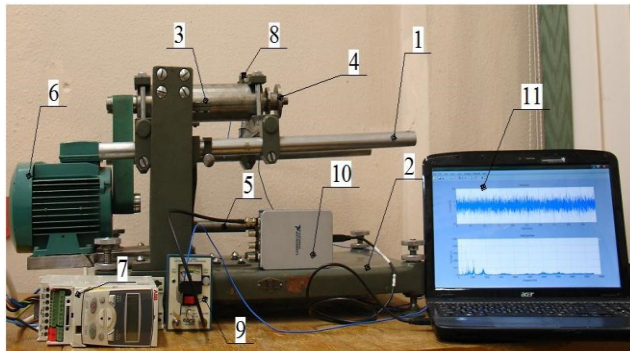


Рис. 2 – Конструкция станда: 1 – рама; 2 – основа; 3 – ШУ; 4 – оправка; 5 – пружина/стержень; 6 – двигатель; 7 – частотный преобразователь; 8 – вибродатчик; 9 – усилитель; 10 – аналого-цифровой преобразователь; 11 – ПК

Динамическая модель станда

Динамическая модель станда с закрепленным на нем ШУ (рис. 3, а) выполнена в виде механической колебательной системы, состоящей из 4-х подсистем: оправки (индекс $s=1$), шпинделя (индекс $s=2$), корпуса ШУ (индекс $s=3$) и рамы (индекс $s=4$). Все подсистемы представлены в виде стержней с распределенной массой и соединены между собой связями, обладающими упругими и диссипативными свойствами [6].

В зависимости от поставленной задачи диагностики в i -х точках подсистем оправки или шпинделя прикладываются единичные гармонические нагрузки $P_i^{(s)}(\omega) = 1 \cdot \sin \omega t$. Так, при оценке погрешности изготовления и сборки ШУ на опорах качения нагрузка $P_1^{(2)}(\omega)$ прикладывается в сечении $1^{(2)}$ шпинделя (схема 1, рис. 3, а), а при оценке погрешности вращения шпинделя – в сечении $0^{(1)}$ оправки (нагрузка $P_0^{(1)}(\omega)$, (схема 2, рис. 3, а).

Для разделения (декомпозиции) системы на более простые подсистемы используется метод динамических податливостей. При использовании этого метода, в направлении отброшенных связей прикладывают их гармонические реакции, которые затем определяют из условия совместности деформаций подсистем, то есть условий равенства

амплитуд обобщенных перемещений (линейных и угловых) в точках отделения подсистем [15, 16].

Последовательность разработки динамической модели механической колебательной системы, состоящей из нескольких подсистем подробно представлена в [17].

Расчетные схемы подсистем механической системы станда описаны в [6] и представлены на рис. 3, б.

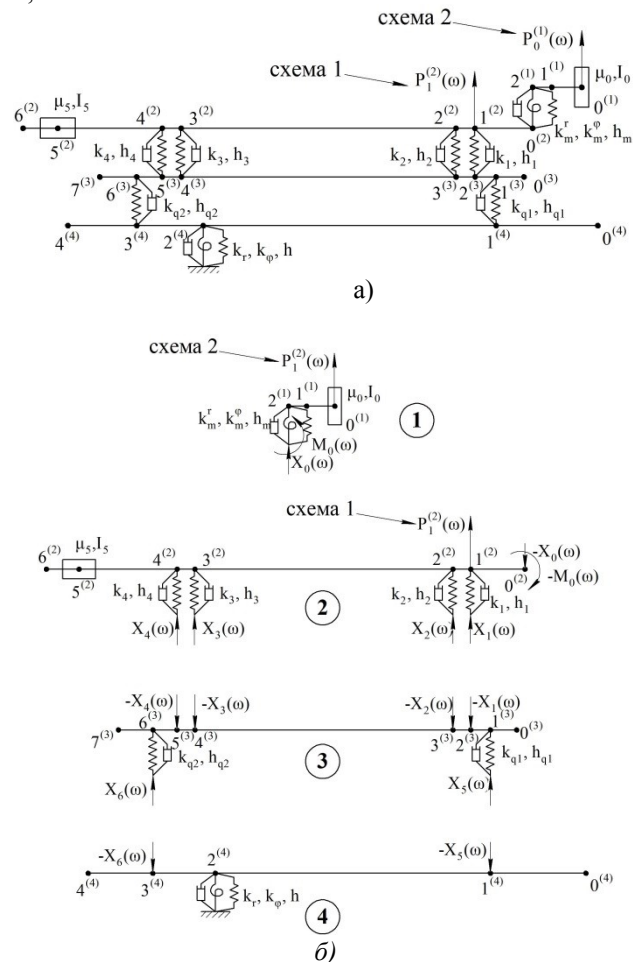


Рис. 3 – Динамическая модель станда (а) и расчетные схемы подсистем станда (б)

Первая подсистема (оправка, индекс $s=1$) рассматривается в виде стержня, состоящего из двух участков с распределенной массой. На переднем конце оправки (сечение $0^{(1)}$) размещен сосредоточенный груз (диск). В сечении $2^{(1)}$ оправка соединяется со шпинделем (сечение $0^{(2)}$ шпинделя), что учитывается упругой связью с радиальной k_m^r и угловой k_m^φ жесткостями.

Вторая подсистема (шпиндель, индекс $s=2$) рассматривается в виде стержня, состоящего из шести участков с распределенной массой. В сечениях $1^{(2)}$, $2^{(2)}$, $3^{(2)}$ и $4^{(2)}$ размещены подшипники опор, что учитывается упругими связями шпинделя с корпусом

с жесткостями k_1 , k_2 , k_3 и k_4 соответственно. В сечении $5^{(2)}$ размещен сосредоточенный груз (шкив).

Третья подсистема (корпус, индекс $s = 3$) рассматривается в виде полого стержня, состоящего из семи участков с распределенной массой. В сечениях $2^{(3)}$, $3^{(3)}$, $4^{(3)}$ и $5^{(3)}$ корпус соединяется со шпинделем. В сечениях $1^{(3)}$ и $6^{(3)}$ корпус соединяется с рамой, что учитывается упругими опорами с жесткостью k_{q1} и k_{q2} .

Четвертая подсистема (рама, индекс $s = 4$) рассматривается в виде эквивалентного стержня, состоящего из четырех участков с распределенной массой. В сечениях $1^{(4)}$, $3^{(4)}$ к раме присоединен ШУ, а в сечении $2^{(4)}$ рама крепится к основе стенда поворотным шарниром с возможностью угловых и вертикальных линейных перемещений, что учитывается угловой k_ϕ и радиальной k_r жесткостями.

Связями подсистем являются: соединение оправки со шпинделем для подсистем 1 и 2; подшипники опор шпинделя для подсистем 2 и 3; крепеж для подсистем 3 и 4 и поворотный шарнир.

Функции $W(\omega)$ (1) соответствия колебаний различных элементов системы для разных задач диагностики будут отличаться, но для их определения используется одинаковый подход [6]. Поэтому для их вывода будем записывать условия совместности деформаций в точках размыкания подсистем в обобщенном виде с выделением составляющих, зависящих от места приложения единичных гармонических нагрузок $P_i^{(s)}(\omega) = 1 \cdot \sin \omega t$.

Принимаем, что в соответствии со схемами измерения (рис. 1), схеме 1 (рис. 1, а) соответствует приложение нагрузки $P_1^{(2)}(\omega)$ на схеме декомпозиции (рис. 3, б), а схеме 2 (рис. 1, б) - приложение нагрузки $P_0^{(1)}(\omega)$.

Тогда, в соответствии со схемой декомпозиции (рис. 3, б), условия совместности деформаций в точках размыкания подсистем будут такими:

— для подсистем 1 и 2:

—

$$\begin{cases} \alpha_{00}^{12} \cdot X_0 + \gamma_{00}^{12} \cdot M_0 - \sum_{j=1}^4 \alpha_{0j}^{(2)} \cdot X_j = \alpha_p^{12} \\ \beta_{00}^{12} \cdot X_0 + \phi_{00}^{12} \cdot M_0 - \sum_{j=1}^4 \beta_{0j}^{(2)} \cdot X_j = \beta_p^{12} \end{cases}, \quad (3)$$

где

$$\alpha_p^{12} = \begin{cases} \alpha_p^{(2)} = \alpha_{01}^{(2)} \cdot P_1^{(2)} & \text{для схемы 1} \\ -\alpha_p^{(1)} = -\alpha_{20}^{(1)} \cdot P_0^{(1)} & \text{для схемы 2} \end{cases}$$

$$\beta_p^{12} = \begin{cases} \beta_p^{(2)} = \beta_{01}^{(2)} \cdot P_1^{(2)} & \text{для схемы 1} \\ -\beta_p^{(1)} = -\beta_{20}^{(1)} \cdot P_0^{(1)} & \text{для схемы 2} \end{cases}$$

— для подсистем 2 и 3:

$$\begin{cases} -\alpha_{10}^{(2)} \cdot X_0 - \gamma_{10}^{(2)} \cdot M_0 + \sum_{j=1}^4 \alpha_{1j}^{23} \cdot X_j - \alpha_{21}^{(3)} \cdot X_5 - \alpha_{26}^{(3)} \cdot X_6 = -\alpha_{1p}^{23} \\ -\alpha_{20}^{(2)} \cdot X_0 - \gamma_{20}^{(2)} \cdot M_0 + \sum_{j=1}^4 \alpha_{2j}^{23} \cdot X_j - \alpha_{31}^{(3)} \cdot X_5 - \alpha_{36}^{(3)} \cdot X_6 = -\alpha_{2p}^{23} \\ -\alpha_{30}^{(2)} \cdot X_0 - \gamma_{30}^{(2)} \cdot M_0 + \sum_{j=1}^4 \alpha_{3j}^{23} \cdot X_j - \alpha_{41}^{(3)} \cdot X_5 - \alpha_{46}^{(3)} \cdot X_6 = -\alpha_{3p}^{23} \\ -\alpha_{40}^{(2)} \cdot X_0 - \gamma_{40}^{(2)} \cdot M_0 + \sum_{j=1}^4 \alpha_{4j}^{23} \cdot X_j - \alpha_{51}^{(3)} \cdot X_5 - \alpha_{56}^{(3)} \cdot X_6 = -\alpha_{4p}^{23} \end{cases} \quad (4)$$

где

$$\alpha_{ip}^{23} = \begin{cases} \alpha_{ip}^{(2)} = \alpha_{i1}^{(2)} \cdot P_1^{(2)} & \text{для схемы 1} \\ 0 & \text{для схемы 2} \end{cases}$$

— для подсистем 3 и 4:

$$\begin{cases} -\sum_{j=1}^4 \alpha_{1(j+1)}^{(3)} \cdot X_j + \alpha_{11}^{34} \cdot X_5 + \alpha_{16}^{34} \cdot X_6 = 0 \\ -\sum_{j=1}^4 \alpha_{6(j+1)}^{(3)} \cdot X_j + \alpha_{61}^{34} \cdot X_5 + \alpha_{66}^{34} \cdot X_6 = 0 \end{cases} \quad (5)$$

или в матричной форме:

$$[D(\omega)] \cdot P = \Delta_p \quad (6)$$

где $[D(\omega)]$ — матрица гармонических коэффициентов влияния, состоящая из динамических податливостей в точках размыкания подсистем s $\alpha_{ij}^{(s)}$, $\beta_{ij}^{(s)}$, $\gamma_{ij}^{(s)}$, $\phi_{ij}^{(s)}$ и обобщенных коэффициентов влияния смежных подсистем $\alpha_{ij}^{s(s+1)}$, $\beta_{ij}^{s(s+1)}$, $\gamma_{ij}^{s(s+1)}$, $\phi_{ij}^{s(s+1)}$, определяемых по зависимостям [6]; P — вектор амплитуд гармонических реакций отброшенных связей, $P = (X_0, M_0, X_1, X_2, X_3, X_4, X_5, X_6)^T$; Δ_p — вектор обобщенных амплитуд перемещений, $\Delta_p = (\alpha_p^{12}, \beta_p^{12}, -\alpha_{1p}^{23}, -\alpha_{2p}^{23}, -\alpha_{3p}^{23}, -\alpha_{4p}^{23}, 0, 0)^T$.

Из системы уравнений (6) определяются реакции отброшенных связей, а затем — амплитуды $q_i^{(s)}$ ($i = 0 \div u$) поперечных (радиальных) перемещений характерных точек подсистем:

— оправки ($s = 1$, $i = 0 \div 2$):

$$q_i^{(1)} = \alpha_{i2}^{(1)} \cdot X_0 + \gamma_{i2}^{(1)} \cdot M_0 + \alpha_{ip}^{(1)} \quad (7)$$

где

$$\alpha_{ip}^{(1)} = \begin{cases} 0 & \text{для схемы 1} \\ \alpha_{i0}^{(1)} \cdot P_0^{(1)} & \text{для схемы 2} \end{cases}$$

— шпинделя ($s = 2$, $i = 0 \div 6$)

$$q_i^{(2)} = -\alpha_{i0}^{(2)} \cdot X_0 - \gamma_{i0}^{(2)} \cdot M_0 + \sum_{j=1}^4 \alpha_{ij}^{(2)} \cdot X_j + \alpha_{iP}^{(2)} \quad (8)$$

где

$$\alpha_{iP}^{(2)} = \begin{cases} \alpha_{i1}^{(2)} \cdot P_1^{(2)} & \text{для схемы 1} \\ 0 & \text{для схемы 2} \end{cases}$$

– корпуса ($s=3, i=0 \div 7$)

$$q_i^{(3)} = -\sum_{j=1}^4 \alpha_{i,(j+1)}^{(3)} \cdot X_j + \alpha_{i5}^{(3)} \cdot X_5 + \alpha_{i6}^{(3)} \cdot X_6 \quad (9)$$

– рамы ($s=4, i=0 \div 4$)

$$q_i^{(4)} = -\alpha_{i1}^{(4)} \cdot X_5 - \alpha_{i3}^{(4)} \cdot X_6 \quad (10)$$

Функция соответствия $W(\omega)_{13}$, связывающие колебания точки $0^{(1)}$ подсистемы оправки ($s=1$) с вибрациями корпуса ($s=3$) в точке $2^{(3)}$ под действием единичных гармонических сил (рис. 3) определяются зависимостью:

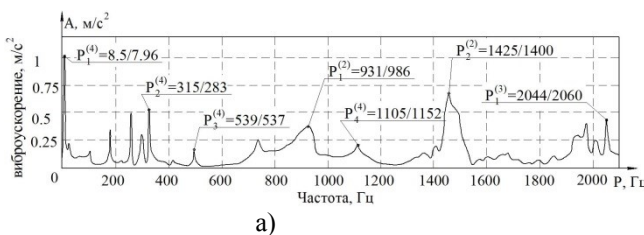
$$W(\omega)_{13} = \frac{q_0^{(1)}(\omega)}{q_2^{(3)}(\omega)} = \frac{\alpha_{02}^{(1)} \cdot X_0 + \gamma_{02}^{(1)} \cdot M_0 + \alpha_{0P}^{(1)}}{-\sum_{j=1}^4 \alpha_{2,(j+1)}^{(3)} \cdot X_j + \alpha_{25}^{(3)} \cdot X_5 + \alpha_{26}^{(3)} \cdot X_6} \quad (11)$$

Где

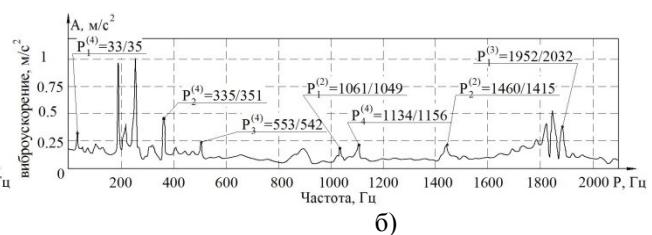
$$\alpha_{iP}^{(1)} = \begin{cases} 0 & \text{для схемы 1} \\ \alpha_{00}^{(1)} \cdot P_0^{(1)} & \text{для схемы 2} \end{cases}$$

Экспериментальное определение динамических характеристик стэнда

Динамические характеристики стэнда определяются путем измерения и спектрального анализа гармонического отклика системы на импульсную ударную нагрузку (рис. 4).



а)



б)

Рис. 5 – Спектры собственных частот стэнда для разных способов крепления рамы: а) – с пружиной; б) – со стержнем

Порядок проведения исследований при оценке точности и технического состояния ШУ на опорах качения

Использование метода косвенного измерения предусматривает проведение экспериментальных и теоретических исследований динамического

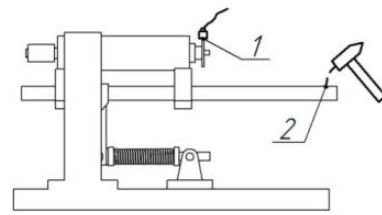


Рис. 4 – Схема установки датчика и приложения импульсной нагрузки при получении спектров собственных частот системы: 1 – датчик; 2 – место приложения нагрузки

Для определения максимальной чувствительности стэнда были проведены измерения для разных способов крепления рамы: 1) угловая жесткость стэнда создается пружиной растяжения; 2) угловая жесткость стэнда задается жестким стержнем, установленным вместо пружины.

Измерялись колебания конца оправки (рис. 4). Импульсная нагрузка прикладывалась к раме. Для измерения использовался пьезоэлектрический датчик мод. PCB 353B15 с предусилителем PCB 480E09. Сигнал регистрировался с помощью АЦП NI USB-9215 и обрабатывался в Matlab.

Экспериментальные спектры собственных частот стэнда приведены на рис. 5. Значения собственных частот $P_i^{(s)}$, указанных слева соответствуют экспериментальным значениям, справа – расчетным, полученным из условия $\det[D(\omega)] = 0$. Верхний индекс собственной частоты указывает на принадлежность определенной подсистеме s , а нижний – на ее номер.

Для дальнейших исследований выбрана схема крепления рамы стержнем с ярко выраженной частотой собственных колебаний рамы $P_1^{(4)} = 33 \text{ Гц}$ (рис. 5, б)

поведения ШУ, закрепленного на экспериментальном стэнде [6].

Методики оценки точности и технического состояния ШУ на опорах качения имеют общую экспериментальную и теоретическую части.

Общая экспериментальная часть исследования (рис. 1) предусматривает [12]:

1. Определение первой собственной частоты $P_1^{(4)}$ рамы станда.

2. Определение частот вращения шпинделя, соответствующих условиям возникновения резонансных колебаний рамы в результате проявления дефектов изготовления и сборки ШУ включительно с дефектами самих подшипников опор шпинделя.

3. Измерение вибраций корпуса на этих частотах вращения.

Частоты вращения шпинделя, при которых возникают резонансные колебания рамы, определяются условием совмещения первой собственной частоты рамы с частотами вынужденных колебаний, вызванных дефектами изготовления и сборки ШУ на опорах качения. Характерные частоты вынужденных колебаний [1, 18] и частоты вращения шпинделя, соответствующие условиям возникновения резонансных колебаний рамы [12] приведены в таблице 1.

Общая теоретическая часть исследования предусматривает [12]:

1. Расчет функций $q_0^{(1)}(\omega)$ и $q_2^{(3)}(\omega)$ амплитуд перемещения точки $0^{(1)}$ (оправки) и точки $2^{(3)}$ (корпуса) от действия единичных гармонических нагрузок. Эти функции, по сути, являются динамическими податливостями подсистем оправки и корпуса и рассчитываются по зависимостям (7) и (8).

2. Расчет функции соответствия $W(\omega)_{13}$, связывающей колебания точек $0^{(1)}$ оправки и точки $2^{(3)}$ корпуса (11).

3. Расчет по зависимости (2) спектров колебаний оси оправки на характерных частотах вращения шпинделя (табл. 1) по экспериментальным спектрам вибрациям корпуса.

4. Расчет спектров относительных колебаний оправки и корпуса и определение амплитуд относительных колебаний точки $0^{(1)}$ оправки на характерных частотах вынужденных колебаний.

Специальная часть методики предусматривает расчет и построение 3D спектр вибраций для оценки наличия и уровня дефектов ШУ и диаграммы погрешности вращения шпинделя в заданном диапазоне частот вращения для оценки точности ШУ.

Таблица 1 – Основные частоты вынужденных колебаний, вызванных дефектами изготовления и сборки шпиндельных узлов на опорах качения и расчетные частоты вращения шпинделя шлифовальной головки, соответствующая резонансным колебаниям рамы

№ п/п	Частота вынужденных колебаний	Расчетная формула	Частота вращения шпинделя f_o , соответствующая резонансным колебаниям рамы, Гц
1	Частота вращения шпинделя	$f_o = n / 60$	$f_o = 33$
2	Вторая гармоника частоты вращения шпинделя	$2f_o$	$f_o = 16.5$
3	Третья гармоника частоты вращения шпинделя	$3f_o$	$f_o = 11$
2	Частота вращения сепаратора	$f_c = \frac{1}{2} \cdot f_o \cdot \left(1 - \frac{d_{ш}}{d_c} \cdot \cos \alpha \right)$	$f_o = 85.77$
3	Частота перекачивания тел качения по наружному кольцу	$f_{c/n} = f_c \cdot z$	$f_o = 9.55$
4	Частота перекачивания тел качения по внутреннему кольцу	$f_{c/o} = (f_o - f_c) \cdot z$	$f_o = 5.96$
5	Частота вращения шариков относительно собственной оси	$f_{ш} = \frac{1}{2} \cdot f_o \cdot \frac{d_c}{d_{ш}} \cdot \left(1 - \frac{d_{ш}^2}{d_c^2} \cdot \cos^2 \alpha \right)$	$f_o = 16.1$
Примечание: n – частота вращения шпинделя, об/мин; $d_{ш}$ – диаметр шариков, мм; z – количество шариков; d_c – средний диаметр подшипника, мм; α – угол контакта подшипника; P_1 – первая собственная частота рамы станда; подшипники – радиально-упорные шариковые типа 7004			

Расчет погрешности вращения шпинделя Δ от частоты вращения n производится по расчетным данным действительных резонансных амплитуд a_{oi}^p

по условию независимости действия различных источников возмущения.

Для этого по значениям резонансных амплитуд a_{oi}^p колебаний на частотах вращения шпинделя f_0 , соответствующих условиям резонансных колебаний рамы (табл. 1) рассчитываются амплитуды a_{fi} вынужденных затухающих колебаний на частотах f_i , нормированных относительно частоты вращения шпинделя f_0 , а потом и погрешность вращения шпинделя Δ_{fi} на этой частоте вращения:

$$a_{fN_i} = \frac{a_{oi}^p \cdot \sigma}{\pi \cdot \sqrt{\left(1 - \left(\frac{N_i \cdot f_0}{p}\right)^2\right)^2 + \left(\frac{\sigma}{\pi}\right)^2 \cdot \left(\frac{N_i \cdot f_0}{p}\right)^2}}; \quad (12)$$

$$\Delta_{fi} = 2 \cdot \sqrt{\sum_{N_i=0,1}^m a_{fN_i}^2}, \quad (13)$$

где $N_i = \frac{f_i}{f_0}$ - номер гармоники частоты вращения шпинделя f_0 , $N_i = 0,1 \div 10$ с шагом $\Delta N_i = 0,1$; p - частота собственных колебаний рамы; σ - логарифмический декремент затухания колебаний.

По результатам расчета погрешностей вращения шпинделя Δ_{fi} для всего диапазона частот

вращения, строится кривая зависимости погрешности вращения шпинделя Δ от частоты вращения n .

Результаты исследований

Расчетные 3D спектры относительных колебаний оправки для частот вращения шпинделя, соответствующих резонансам рамы на характерных частотах вынужденных колебаний представлены на рис. 6.

3D спектр на рис. 6, а построен для условий холостого хода шпинделя, когда возбуждение колебаний происходит только за счет наличия дефектов изготовления и сборки шлифовальной головки.

3D спектр на рис. 6, б построен для условий работы под нагрузкой. Источником нагрузки являлась центробежная сила от эксцентрично закрепленного на оправке диска.

Расчетные зависимости погрешности вращения шпинделя Δ от частоты вращения n для тех же условий представлены на рис. 7. Пиковые значения погрешности вращения шпинделя Δ формируются амплитудами резонансных колебаний на характерных частотах возмущения (на диаграмме указаны в нормированном относительно частоты вращения шпинделя f_0 виде).

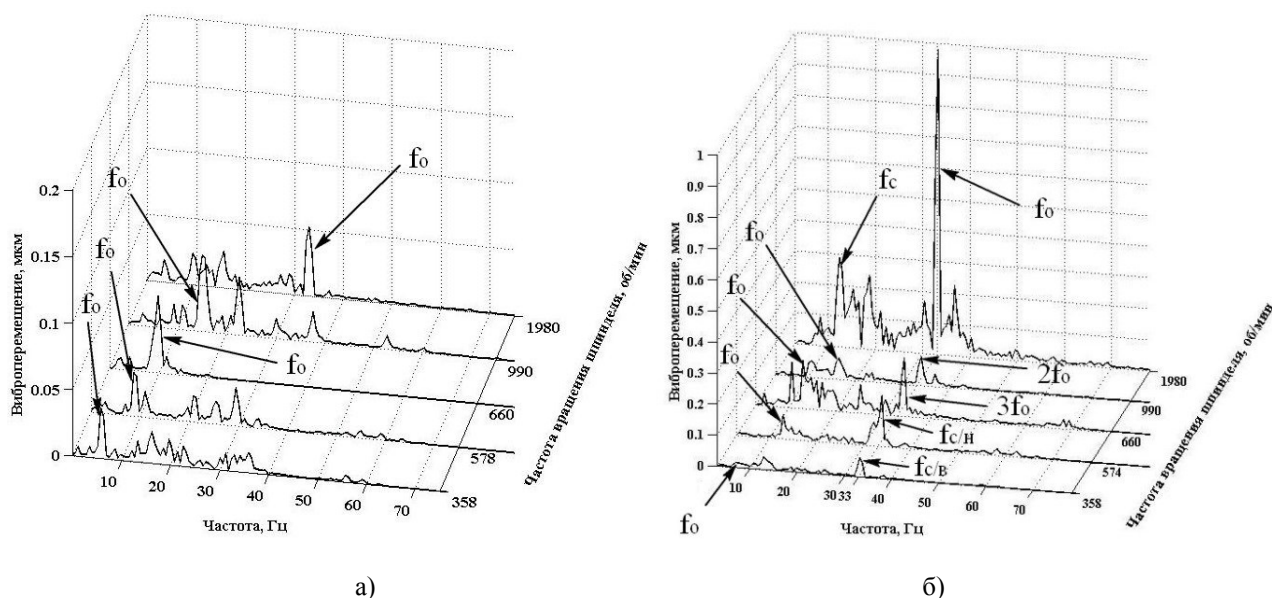


Рис. 6 – Расчетные спектры относительных колебаний оправки для частот вращения шпинделя, соответствующих резонансам рамы на характерных частотах вынужденных колебаний: а) на холостом ходу; б) под нагрузкой

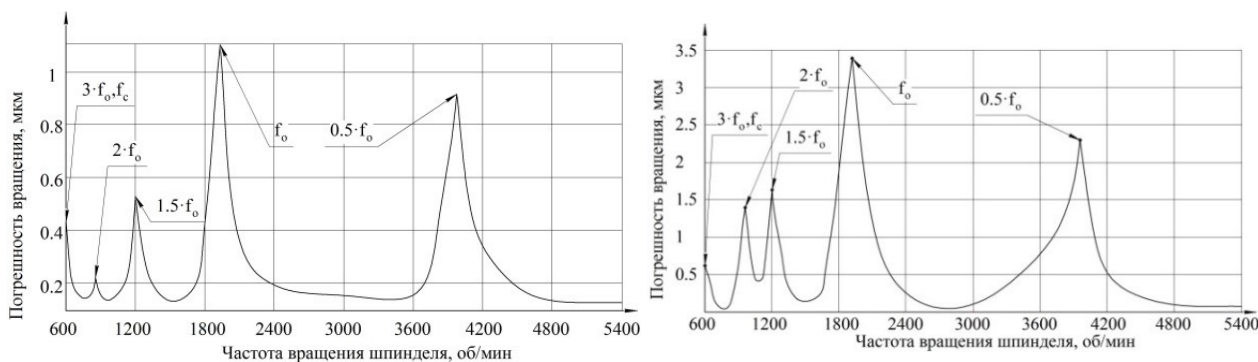


Рис. 7 – Расчетные зависимости погрешности вращения шпинделя Δ от частоты вращения n : а) на холостом ходу; б) под нагрузкой

Обсуждение результатов

Как видно из рис. 6, а, энергии, генерируемой на холостом ходу дефектами изготовления и сборки шлифовальной головки недостаточно для развития значительных колебаний станда, хотя наличие на частоте вращения шпинделя $f_0 = P_1^{(4)} = 33$ Гц резонансных колебаний на характерных частотах возмущения все же наблюдается.

При работе под нагрузкой (рис. 6, б) наблюдается значительный рост амплитуд колебаний на характерных частотах возмущения, что свидетельствует о перспективности применения разработанного метода косвенного измерения колебаний шпинделя именно для условий эксплуатации ШУ.

Расчетные зависимости погрешности вращения шпинделя Δ от частоты вращения n (рис. 7) являются дополнительным подтверждением этого вывода.

Выводы

Альтернативой прямому измерению колебаний шпинделя (или оправки) может стать их идентификация по результатам измерения резонансных колебаний корпуса ШУ с использованием расчетной функции соответствия, характеризующей соотношения колебаний в точках измерения и идентификации.

Проведенные исследования подтвердили перспективность применения такого метода измерения колебаний для оценки точности и технического состояния низкооборотных ШУ на опорах качения как на этапах их изготовления, так и эксплуатации.

Список литературы

1. *Axes of rotation, methods for specifying and testing*. An American National Standard, ASME B89.3.4-2010.
2. *Vibration Diagnostic Guide*. URL: www.skfreliability.com.
3. Graham T. Smith. *Machine Tool Metrology. An Industrial Handbook*. Springer International Publishing Switzerland. 2016, 700 p. doi: 10.1007/978-3-319-25109-7.

4. Anandan K. P., Ozdoganlar O. B. Analysis of error motions of ultra-high-speed (UHS) micromachining spindles. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, V. 70, 2013. p. 1-14. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.02.005.
5. Nahata S., Anandan K. P., Ozdoganlar O. B. LDV-based spindle metrology for ultra-high-speed micromachining spindles. *Proceedings of NAMRI/SME*. 2013. V. 41.
6. Данильченко Ю. М., Петришин А. И. Идентификация колебаний шпинделя по результатам измерения вибраций корпуса шпиндельного узла. *Вісник НТУУ «КПІ». Серія машинобудування*. – Київ: НТУУ «КПІ». 2014. №2 (71). 147-152.
7. Shakya P., Darpe A. K., Kulkarni M. S. Vibration based fault diagnosis in rolling element bearings: ranking of various time, frequency and time-frequency domain data based damage identification parameters. *International Journal of Condition Monitoring*. 2013. V.3. № 2. p. 53–62. doi:10.1784/204764213808146626.
8. Barszcz T., Sawalhi N. Fault detection enhancement in rolling element bearings using the minimum entropy deconvolution. *Archives of Acoustics*. 2012. V. 37. № 2. p. 131-141. doi: 10.2478/v10168-012-0019-2.
9. Trivedi P., Bharti P. K. Study Of Bearing Rolling Element Defect Using Emperical Mode Decomposition Technique. *International Journal of Engineering Development and Research (IJEDR)*. 2017. V. 5. № 2. p.553-565.
10. Barzdaitis V., Zemaitis V., Zebelys K., Pocius Z., and Mazeika P. Condition monitoring of roller bearings using different diagnostic methods. *Diagnostyka*. 2004. V. 30. № 1. p. 53–60.
11. Jamaludin, N., Mba, D., Bannister, R. H. Condition monitoring of slow-speed rolling element bearings using stress waves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*. 2001. V. 215. № 4. P. 245 - 271. doi:10.1177/095440890121500401.
12. Данильченко Ю. М., Петришин А. И. Диагностика дефектов изготовления и сборки шпиндельных узлов на опорах качения. *Вісник НТУУ «КПІ», сер. Машинобудування*. 2015. № (3) 75. С.159-164.
13. Патент на корисну модель № 112210 UA, МПК В23В 25/06 (2006.01) Стенд для діагностики похибок виготовлення і збирання шпиндельних вузлів гільзового виконання / Ю. М. Данильченко, А. І. Петришин, М. А. Данильченко. - № u201605411; заявл. 19.05.2016; опубл. 12.12.2016. Бюл. №23.
14. Jui P. Hung, Yuan L. Lai, Tzuo L. Luo and Hsi H. Hsiao. Prediction of the Dynamic Characteristics of a Milling

- Machine Using the Integrated Model of Machine Frame and Spindle Unit. *World Academy of Science, Engineering and Technology*. 2012. V. 6. p. 626-632. doi: 10.5281/zenodo.1074309.
15. Banakh, L. Y., Kempner, M. L. *Vibrations of Mechanical Systems with Regular Structure*. Springer, 2010. 250 p. doi: 10.1007/978-3-642-03126-7.
 16. Бидерман В. Л. *Прикладная теория механических колебаний: Учеб. пособие для вузов*. М.: Машиностроение, 1972. 416 с.
 17. Данильченко Ю. М., Дорошко А. О., Петришин А. И. Исследование динамических характеристик механической системы «шпиндельный узел». *Вестник МГТУ «Станкин»*. 2014. С. 81–91.
 18. Балицкий Ф. А., Барков А. В., Баркова Н. А., Васильева Р. В., Гольдин А. С., Зусман А. В., Соколова А. Г., Ширман А. Р., Якубович В. А. *Неразрушающий контроль. Справочник в 7 томах под редакцией чл.-корр. РАН В. В. Клюева. Том 7. Книга 2. Вибродиагностика*. М.: Машиностроение, 2005. 830 с.
 8. Barszcz T., Sawalhi N. Fault detection enhancement in rolling element bearings using the minimum entropy deconvolution. *Archives of Acoustics*, 2012, V. 37, № 2, p. 131-141, doi: 10.2478/v10168-012-0019-2.
 9. Trivedi P., Bharti P. K. Study Of Bearing Rolling Element Defect Using Emperical Mode Decomposition Technique. *International Journal of Engineering Development and Research (IJEDR)*, 2017, V. 5, № 2, p. 553-565.
 10. Barzdaitis V., Zemaitis V., Zebelys K., Pocius Z., and Mazeika P. Condition monitoring of roller bearings using different diagnostic methods. *Diagnostyka*, 2004, V. 30, № 1, p. 53–60.
 11. Jamaludin, N., Mba, D., Bannister, R. H. Condition monitoring of slow-speed rolling element bearings using stress waves. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, 2001, VI. 215, № 4, p. 245 – 271, doi:10.1177/095440890121500401.
 12. Danil'chenko Yu. M., Petrishin A. I. Diagnostika defektov izgotovleniya i sborki shpindel'nykh uzlov na oporakh kacheniya. *Visnik NTUU «KPI»*, *Mashinobuduvannya*, 2015, № 3 (75), p. 159-164.
 13. Patent na korisnu model' № 112210 UA, MPK B23B 25/06 (2006.01) Stend dlya diagnostiki pokhibok vigotvleniya i zbirannya shpindel'nykh vuzliv gil'zovogo vikonannya / Yu.M. Danil'chenko, A.I. Petrishin, M.A. Danil'chenko. - № u201605411; zayavl. 19.05.2016; opubl. 12.12.2016. Byul. №23.
 14. Jui P. Hung, Yuan L. Lai, Tzuo L. Luo and Hsi H. Hsiao. Prediction of the Dynamic Characteristics of a Milling Machine Using the Integrated Model of Machine Frame and Spindle Unit. *World Academy of Science, Engineering and Technology*, 2012, V. 6, p. 626-632, doi: 10.5281/zenodo.1074309.
 15. Banakh, L. Y., Kempner, M. L. *Vibrations of Mechanical Systems with Regular Structure*. Springer, 2010, 250 p., doi: 10.1007/978-3-642-03126-7.
 16. Бидерман В. Л. *Прикладная теория механических колебаний: Учеб. пособие для вузов*. М., Mashinostroenie, 1972. 416 с.
 17. Danil'chenko Yu. M., Dorozhko A. O., Petrishin A. I. Issledovanie dinamicheskikh kharakteristik mekhanicheskoi sistemy «shpindel'nyi uzel». *Vestnik MGTU «Stankin»*, 2014, P. 81–91.
 18. Balitskii F. A., Barkov A. V., Barkova N. A., Vasil'eva R. V., Gol'din A. S., Zusan A. V., Sokolova A. G., Shirman A. R., Yakubovich V. A. *Nerazrushayushchii kontrol'. Spravochnik v 7 tomakh pod redaktsiei chl. -korr RAN V. V. Klyueva. Tom 7. Книга 2. Вибродиагностика*. М., Mashinostroenie, 2005. 830 p.
 1. *Axes of rotation, methods for specifying and testing*. An American National Standard, ASME B89.3.4, 2010.
 2. Vibration Diagnostic Guide. Available at: www.skfreliability.com.
 3. Graham T. Smith. *Machine Tool Metrology. An Industrial Handbook*. Springer International Publishing Switzerland. 2016, 700 p., doi: 10.1007/978-3-319-25109-7.
 4. Anandan K.P., Ozdoganlar O.B., Analysis of error motions of ultra-high-speed (UHS) micromachining spindles. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2013, V. 70, p. 1-14, doi: 10.1016/j.ijmachtools.2013.02.005.
 5. Nahata S., Anandan K. P., Ozdoganlar O. B. LDV-based spindle metrology for ultra-high-speed micromachining spindles. *Proceedings of NAMRI/SME*, 2013, V. 41.
 6. Danil'chenko Yu. M., Petrishin A. I. Identifikatsiya kolebanii shpindelya po rezul'tatam izmereniya vibratsii korpusa shpindel'nogo uzla. *Visnik NTUU «KPI»*. *Seriya mashinobuduvannya*. – Kiïv: NTUU «KPI», 2014, №2 (71), P. 147-152.
 7. Shakya P., Darpe A.K., Kulkarni M. S. Vibration based fault diagnosis in rolling element bearings: ranking of various time, frequency and time-frequency domain data based damage identification parameters. *International Journal of Condition Monitoring*, 2013, V. 3, №2, p. 53–62, doi:10.1784/204764213808146626.

Сведения об авторах (About authors)

Данильченко Юрий Михайлович - доктор технических наук, профессор, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», профессор кафедры прикладной гидроаэромеханики и механотроники; г. Киев, Украина; ORCID: 0000-0002-5375-950X; e-mail: yumd@i.ua

Yuriy Danylchenko – Dr. habil. of Eng. S., professor, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, professor of Applied Fluid Mechanics and Mechatronic Department; Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5375-950X; e-mail: yumd@i.ua

Петришин Андрей Игоревич – кандидат технических наук, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского», старший преподаватель кафедры прикладной гидроаэромеханики и механотроники; г. Киев, Украина; ORCID: 0000-0002-5993-8779; e-mail: m.p3shka.a.i@gmail.com

Andrii Petryshyn – PhD in Eng. S., National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, professor of Applied Fluid Mechanics and Mechatronic Department; Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5993-8779; e-mail: m.p3shka.a.i@gmail.com

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Данильченко Ю. М., Петришин А. И. Вибродиагностика шпиндельных узлов на опорах качения по результатам измерения вибраций корпуса. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 3- 3. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.01.

Please cite this article as:

Danylchenko Yu., Petryshyn A. Diagnostic of spindle units on rolling bearings based on measuring of the housing vibrations. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 3- 3, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.01.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Данильченко Ю. М., Петришин А. І. Вібродіагностика шпиндельних вузлів на опорах кочення по результатах вимірювань вібрацій корпусу. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 3- 3. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.01.

АНОТАЦІЯ Проведено аналіз сучасних методів оцінки точності і технічного стану шпиндельних вузлів на опорах кочення і дана оцінка перспективності проведення вимірювань в зонах резонансних коливань. Для оцінки точності і технічного стану шпиндельних вузлів на опорах кочення на стадіях виготовлення і експлуатації запропоновано використовувати раніше розроблений авторами метод непрямого вимірювання резонансних коливань шпинделя, в основі якого лежить вимірювання вібрацій на корпусі шпиндельного вузла з наступним обчисленням коливань шпинделя (закріпленої в шпинделі оправки) за теоретичною функцією відповідності. Для використання цього методу при розв'язку задач оцінки точності і діагностики дефектів виготовлення і збирання шпиндельного вузла дано теоретичне обґрунтування схем вимірювання, проведена адаптація динамічної моделі експериментального стенду і розроблені відповідні методики проведення досліджень. Загальна експериментальна частина методик проведення досліджень передбачає: визначення першої власної частоти рами стенду; визначення частот обертання шпинделя, що відповідають умовам виникнення резонансних коливань рами в результаті прояву дефектів виготовлення і збирання шпиндельного вузла; вимірювання вібрацій корпусу на цих частотах обертання. Загальна теоретична частина методик передбачає: розрахунок динамічних податливостей і функції відповідності, що пов'язує коливання підсистем оправки і корпусу; обчислення спектрів коливань оправки за експериментальними спектрами вібрацій корпусу і визначення амплітуд відносних коливань кінця оправки на характерних частотах вимушених коливань. За отриманими результатами, залежно від поставленого завдання, обчислюється 3D спектр вібрацій або діаграма похибки обертання шпинделя в заданому діапазоні частот обертання. Подані результати оцінки точності і технічного стану шліфувальної головки на холостому ході і під навантаженням.

Ключові слова: шпиндельний вузол; підшипники кочення; дефекти виготовлення і збирання; похибка обертання шпинделя, вібродіагностика; механічна коливальна система; динамічна податливість

Поступила (received) 24.05.2020

УДК 621.757:621.7.08

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.02

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ВИКІНЧУВАЛЬНИХ ОПЕРАЦІЙ НА ФОРМУВАННЯ ПАРАМЕТРІВ ЯКОСТІ ПОВЕРХНІ ВТУЛОК БУРОВИХ ПОМП

Я. М. КУСІЙ

кафедра технології машинобудування, Національний університет "Львівська політехніка", Львів, УКРАЇНА
e-mail: jarkym@ukr.net

АНОТАЦІЯ Розроблення оптимального технологічного процесу виготовлення відповідальних деталей машин, зокрема циліндрових втулок бурових pomp деталей газо- та нафтовидобувного обладнання є найефективним при застосуванні системного підходу стосовно дослідження взаємозв'язків із технологічним середовищем: верстат-пристрій-інструмент-заготовка. Рациональний вибір фінішних і викінчувально-зміцнювальних операцій технологічних процесів виготовлення деталей машин забезпечує формування необхідних параметрів точності, якості поверхневого шару та експлуатаційних характеристик. Традиційні технологічні методи фінішного оброблення деталей машин - методи хіміко-термічного оброблення та нанесення покриттів є недостатньо ефективними для забезпечення експлуатаційних характеристик циліндрових втулок бурових pomp. Вібратійні технології як група методів поверхневого пластичного деформування застосовуються на викінчувально-зміцнювальних операціях виготовлення виробів у різних галузях промисловості. Мета дослідження даної статті - аналіз впливу технологічних параметрів вібраторного зміцнення, зокрема вібраторно-відцентрового зміцнення, на формування параметрів якості поверхні циліндрових втулок бурових pomp НБ32. Вибрано матеріали для проведення досліджень та приведено ескіз дослідного зразка. Приведено принципову схему вібромашини об'ємного оброблення та технологічного оснащення для реалізації вібраторної технології, описано їх будову та принцип роботи. Приведена методика реалізації експериментальних досліджень. Описано методику визначення геометричних параметрів якості поверхневого шару матеріалу виробу, приведено комплекс для вимірювання геометричних параметрів якості поверхні виробів. Подано та проаналізовано зміну параметрів рельєфу поверхні виробів після вібраторно-відцентрового оброблення. Встановлено, що вібраторно-відцентрове зміцнення внутрішніх поверхонь втулок кульками $\varnothing 10$ і $\varnothing 12$ мм сприяє покращенню параметрів мікрорельєфу їх профілю за рахунок зменшення висотних параметрів мікропрофілю поверхні у 9,5-36,9 разів та підвищенню крокових параметрів у 289-399 разів порівняно з поверхнею після точіння. Подальші дослідження у цьому напрямку стосуватимуться оптимізації режимів оброблення та розроблення практичних рекомендацій стосовно використанню вібраторно-відцентрових зміцнювачів з дебалансним приводом для покращання експлуатаційних характеристик деталей типу «втулка».

Ключові слова: технологічний процес; циліндрова втулка; якість поверхні; викінчувально-зміцнювальна операція; вібраторні технології; вібраторно-відцентрове зміцнення

INVESTIGATION OF THE INFLUENCE OF FINISHING OPERATIONS ON THE FORMATION OF SURFACE QUALITY PARAMETERS OF BUSHINGS OF DRILLING PUMPS

Ya. KUSYI

Mechanical Engineering Department, Lviv Polytechnic National University, Lviv, UKRAINE

ABSTRACT The optimal technological process planning of responsible machine parts manufacturing, in particular cylinder bushings of drilling pumps for gas and oil production equipment, is most effective using a system approach for the investigation of relationships with the technological environment: machine-fixture-tool-blank. A rational choice of finishing, finishing and strengthening operations of technological processes for the manufacturing of machine parts provides the formation of the necessary parameters of accuracy, quality of the surface layer and operational characteristics. Traditional technological methods for finishing treatment of machine parts and methods of chemical-thermal treatment and coating enough are not effective to provide the operational characteristics of the cylinder bushings of drilling pumps. Vibration technologies as a group of the surface plastic deformation methods are used for finishing and strengthening operations of technological processes of parts manufacturing in different industries. The purpose of the investigations of this paper is to analyze the influence of technological parameters of vibration processing methods, in particular vibration-centrifugal strengthening, on the formation of surface quality parameters of cylinder bushings of NB32 drilling pumps. Materials for researches are selected. Drawings of the exploratory prototype are shown. A schematic diagram of a volumetric vibrating machine and technological equipment for the implementation of vibration technology is given. Their structure and operating principle are described. The methodology for the implementation of experimental researches is given. The methodology for determining the geometric parameters of the surface layer quality of the part material is described. A complex for measuring the geometric parameters of the part surface quality is given. The results of change the surface topography of the parts after vibration-centrifugal treatment are presented and analyzed. It has been established that vibration-centrifugal strengthening of the inner surfaces of the bushings with balls of $\varnothing 10$ and $\varnothing 12$ mm improves the parameters of the microrelief of their profiles by reducing the height parameters of the surface microprofile by 9.49-36.9 times and increasing the step parameters by 288.79-399, 49 times compared to the surface after lathe machining. Further researches in this field will concern the optimization of processing regimes and the development of practical recommendations for using vibration-centrifugal strengtheners with unbalance drive for improving the operational characteristics of bushings.

Keywords: technological process; cylinder bushing; surface quality; finishing and strengthening operation; vibration technologies; vibration-centrifugal strengthening

Вступ

Підвищена трудомісткість виготовлення пустотілих циліндричних виробів типу «втулка»,

«гільза», «циліндр» тощо, які поширені у конструкціях машин і виконують різноманітне функціональне призначення, визначається,

переважно, специфікою їх конструктивної будови - як правило, це велика маса при незначній поперечній жорсткості та значних лінійних розмірах. Різноманітність технічних вимог стосовно таких деталей тієї чи іншої конструктивної форми, тип і організаційна форма виробництва вимагають системного підходу при розробленні раціонального технологічного процесу їх виготовлення й вибору викінчувально-зміцнювальних і фінішних операцій, які забезпечують експлуатаційні характеристики виробів [1-6].

Огляд літературних джерел

Деталі типу «циліндр», «гільза» нафто- та газовидобувного обладнання є елементами систем для транспортування рідин, газів та сумішей із значних глибин та під високими тисками [7].

Забезпечення конструктивних технічних параметрів, формування експлуатаційних характеристик і показників надійності таких виробів визначаються, в першу чергу, фізико-механічними та технологічними властивостями матеріалу, з якого їх виготовляють (переважно, це вуглецеві, низько- та високолеговані сталі) [1,2,7].

Однак, збільшення статичної міцності масивних довгомірних стрижневих та трубчастих виробів при використанні дорогих легованих сталей не завжди рівнозначне підвищенню показників довговічності, оскільки із зростанням границі міцності підвищується імовірність появи втомного та крихкого руйнування матеріалу за рахунок масштабного фактору. Застосування високоміцних металів і сплавів обмежується їх чутливістю до концентраторів напружень і поверхневих дефектів [7].

Вичерпання чисто ресурсів статичної міцності матеріалів призводить до необхідності забезпечення експлуатаційних характеристик (і показників надійності) деталей типу «циліндр», «гільза» газо- та нафтовидобувного обладнання шляхом покращення конструкції деталі, та за рахунок вибору раціональних технологічних методів оброблення зазначених виробів [1,2,7].

Раціональний вибір викінчувально-зміцнювальних і фінішних операцій у технологічних процесах виготовлення довгомірних стрижневих і трубчастих виробів газо- та нафтовидобувного обладнання має критично важливе значення при формуванні їх параметрів якості. Забезпечення параметрів точності заданої форми деталі, якості її поверхонь, експлуатаційних характеристик і показників надійності деталей машин технологічними методами визначається рівнем технології виготовлення [7].

Традиційні технологічні методи фінішного оброблення суцільних і пустотілих циліндричних виробів забезпечують розмірну та геометричну точність форми деталей у межах 6÷7 класів точності і шорсткість поверхні $Ra=0,08-1,25$ мкм. Зокрема, позитивно зарекомендували себе методи хіміко-

термічного оброблення та нанесення відповідних покриттів для забезпечення експлуатаційних характеристик і показників надійності деталей в умовах статичних навантажень. Проте, оброблені таким чином деталі не завжди демонструють достатню надійність при роботі в умовах динамічних та знакозмінних навантажень. До того ж, методи хіміко-термічного оброблення та нанесення покриттів є найбільш енергоємною технологією, споживаючи від 20 до 120 кВт/год на 1 кг зміцнених виробів [1,7].

Методи поверхневого пластичного деформування (ППД), зокрема вібраційні, впродовж останніх десятиліть набули широкого розповсюдження у машинобудуванні для забезпечення підвищених експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів. Їх характерною ознакою є, незначна, в порівнянні з іншими технологічними методами, енергоємність процесу зміцнення та висока якість поверхні. Головною відмінністю більшості методів вібраційної обробки від традиційних фінішних операцій механічного оброблення чи методів статичного ППД є можливість утворення за їх допомогою регулярних мікрорельєфів, що дозволяє загалом вирішити проблему технологічного забезпечення геометричних і фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару деталей [1,2].

Вібраційні технології є найефективнішими серед відомих фінішних і викінчувально-зміцнювальних технологічних операцій виготовлення виробів завдяки достатньо широким технологічним можливостям і здатності якісного зміцнювального оброблення внутрішніх поверхонь довгомірних пустотілих деталей. Проте, все ще невирішеною залишається проблема створення прогресивних зміцнювальних технологій, які базуючись на використанні вібрацій, як досконалого джерела накопичення енергії деформування, забезпечували б широкий діапазон заданих конструктивних параметрів і суттєвого підвищення експлуатаційних характеристик та надійності роботи деталей типу «втулка», «циліндр», «гільза» [1,2].

Мета дослідження

Мета дослідження полягає в аналізі впливу технологічних параметрів вібраційно-відцентрового зміцнення на формування топології поверхневого шару оброблених виробів типу «втулка», «циліндр», «гільза».

Основна частина

Матеріали та експериментальні зразки

З огляду на те, що більшість деталей типу «втулка», «циліндр», «гільза» нафтогазовидобувного обладнання виготовляють з конструкційних вуглецевих сталей, у якості дослідного матеріалу вибрано сталь 45 ДСТУ 7809:2015. Креслення дослідного зразка наведено на рис. 1 [1,2,7].

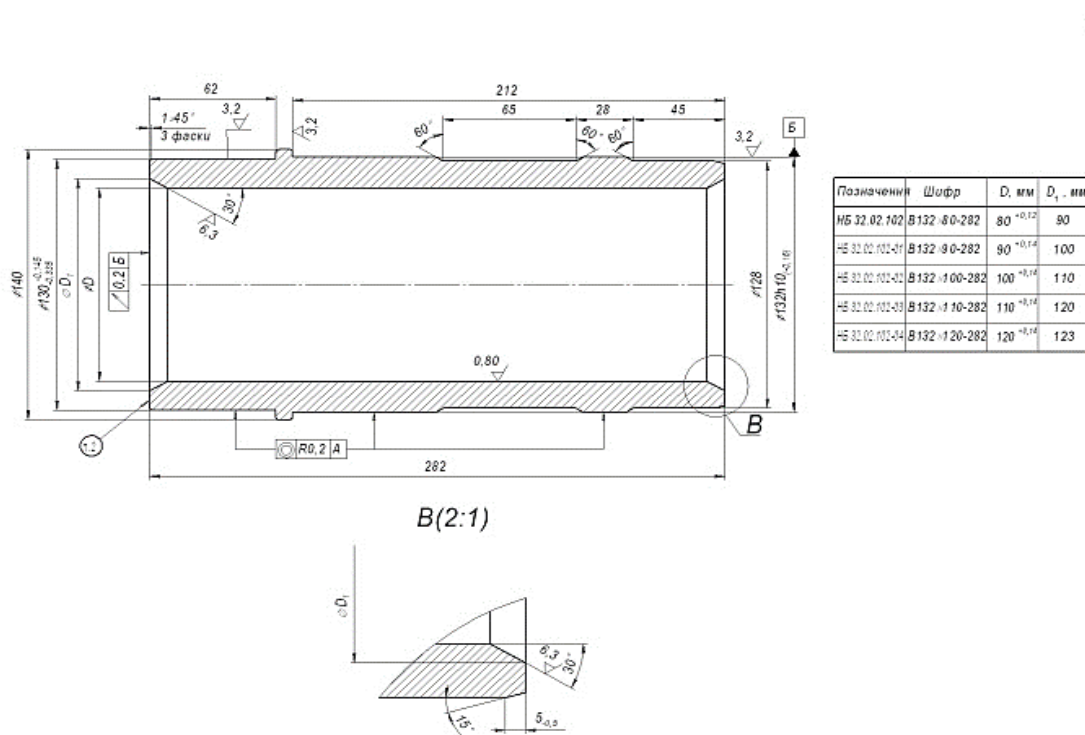


Рис. 1– Ескіз дослідного зразка

Технологічне оснащення для реалізації вібраційно-відцентрового зміцнення при використанні пристроїв з дебалансним приводом

У Національному університеті «Львівська політехніка» адаптовано обладнання об'ємного вібраційного оброблення (вібромашини об'ємного оброблення) для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь циліндричних виробів, зокрема циліндрових втулок бурової помпи НБ32 діаметром 100 мм, довжиною 282 мм. Для цього спроектовано та виготовлено лабораторно-дослідний зразок технологічного оснащення (рис. 2) та технологічного обладнання (рис. 3) для реалізації вібраційно-відцентрового зміцнення та дослідження впливу його основних технологічних параметрів на формування топологічних та фізико-механічних параметрів якості поверхневого шару оброблених виробів і їх експлуатаційних характеристик [1,2].



Рис. 2 – Технологічне оснащення для вібраційно-відцентрового зміцнення внутрішніх поверхонь циліндричних виробів із застосуванням вібромашини об'ємного оброблення

У порожнину оброблюваної втулки 6 (рис. 3) вільно встановлюють армований поліуретаном обкатник 7 і засипають деформівні тіла 8. Деформівними елементами служать сталеві загартовані кульки, як елементи, що забезпечують найбільші контактні напруження завдяки точковому контакту із оброблюваною поверхнею. Об'єм (діаметр) деформівних тіл встановлюють експериментально або на підставі відомих практичних результатів. З обох торців втулку закривають кришками 10, 11 із компенсаційними втулками 12, 13 та скріплюють гвинтами 24, шайбами 26 і гайками 25 (рис. 3). На посадні шийки обкатника 7 з обох сторін встановлюють фланці 16, 17. Гайки 18, 19 із шайбами 20, 21 обмежують осьове переміщення фланців 16, 17. Масу обкатників розраховують, виходячи з умови забезпечення зусилля оброблення поверхонь виробу, необхідного для якісного поверхневого пластичного деформування. Після цього оброблювану втулку 6 із описаним вище технологічним оснащенням розміщують по зовнішній циліндричній поверхні на опорі 9. Опора 9 представляє собою приварений до плити швелера, який встановлюється за допомогою фаски на внутрішній обгумованій поверхні віброконтейнера 4. Закріплення втулки 6 здійснюється прихватом 10 у вигляді привареного до плити швелера та планки 14. Прихват 10 та планка 14 розпираються двома під'ятниками 15. Планка 14 опирається фаскою на внутрішню обгумовану поверхню віброконтейнера 4. Для запобігання пошкодження різи під час вібрацій контейнера і для надійного закріплення технологічного оснащення (рис.2) служать гайки 22 [1,2].

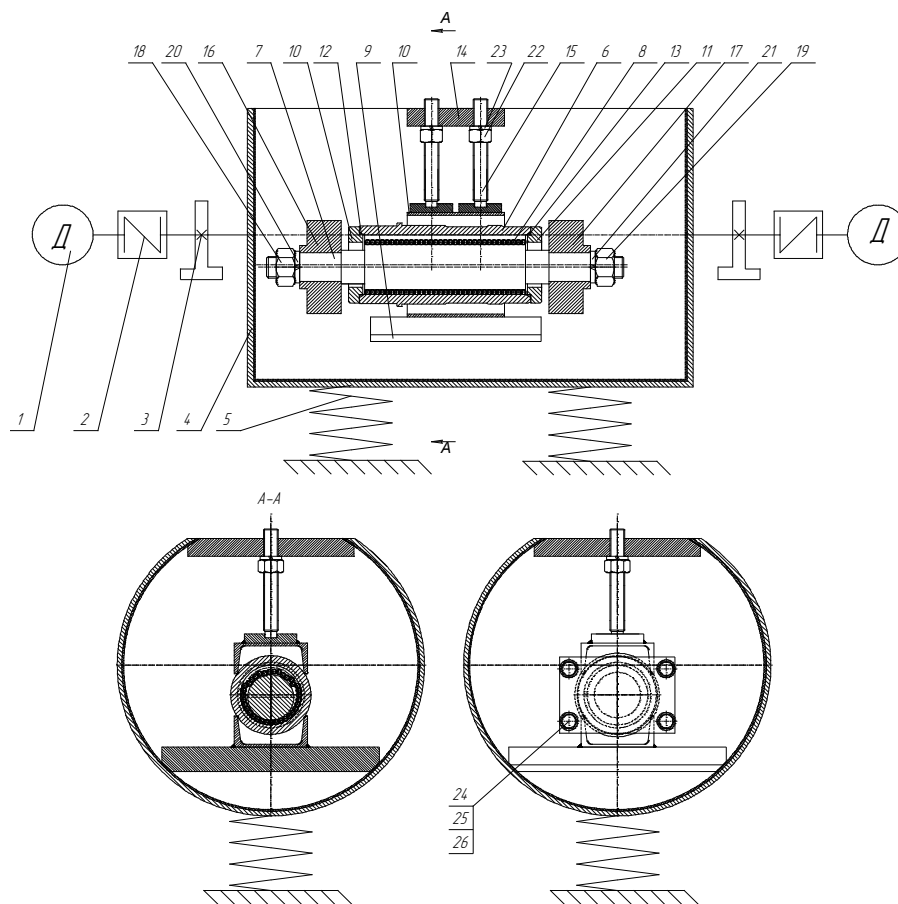


Рис. 3 – Принципова схема технологічного обладнання для вібраційного оброблення

Особливістю роботи зміцнювальних пристроїв дебалансних типів, що реалізують метод вібраційно-відцентрового зміцнення, є використання явища вібраційного підтримання обертання обкатного елемента при наданні гармонічних коливань його осі. У даному випадку відбувається процес перетворення енергії: електрична енергія електродвигунів перетворюється в енергію обертання дебалансів, яка переходить у коливні рухи приводного елемента - оброблюваної деталі. Коливання приводного елемента забезпечують поштовх до необхідного переміщення робочого органу – рух обкочування обкатника. При подачі живлення на обмотки обох двигунів 1 обертний рух через пелюсткові муфти 2 передається дебалансам 3. Обертання дебалансів 3 спричиняє коливання із заданою амплітудою віброконтейнера 4, за рахунок чого вільно встановлений у втулці 6 обкатник 7 самовтягується у режим вібраційного підтримання обертання. Обертання обкатника 7 супроводжується обкочуванням по внутрішній поверхні циліндрової втулки 6. Обкочування обкатника 7 відбувається по вільно розміщених між ним і оброблюваною внутрішньою поверхнею деформівних тілах 8. Протягом малого проміжку часу контактування оброблюваної поверхні циліндрової втулки 6 із обкатником 7 відбувається через незначну кількість деформівних тіл 8, розташованих вздовж твірних оброблюваної поверхні деталі. Контакт

втулки 6 з черговою групою деформівних тіл 8 відбувається з ударом, причому контактуючими через кульки 8 виробами є масивні обкатник 7 і втулка 6. Наявність співударянь обкатника 7 із втулкою 6 при їх локальному контакті через незначну кількість деформівних тіл 8 приводить до розвитку значних контактних напружень у матеріалі оброблюваної деталі в місцях контакту. У результаті оброблюваний матеріал пластично деформується та зміцнюється. Товщину зміцненого шару, ступінь наклепу та рівномірність зміцнення регулюють за допомогою зміни часу оброблення, типорозмірів деформівних тіл, маси обкатника тощо [1,2].

Методика реалізації експериментальних досліджень

Оброблення внутрішніх поверхонь циліндрових втулок бурових pomp $\varnothing 100$ мм складається із попереднього точіння та віброоброблення кульками $\varnothing 12$ мм і $\varnothing 10$ мм. Експерименти виконано на машині об'ємного вібраційного оброблення (рис. 3); до проведення віброзміцнення визначено шорсткість поверхні дослідного зразка після токарної обробки. Перед обробленням деформівні тіла були змочені водою для зменшення тертя і покращання умов обкочування. Поза зоною оброблення складали вузол із

оброблюваною деталлю, деформівними тілами і обкатником, після чого закріплювали його на установці.

Основними технологічними параметрами вібраційної обробки є: - діаметр обкатника $d_{обк.}$; - діаметр деформівних тіл $d_{д.т.}$; - осьовий проміжок між торцем обкатника і кришками, які закривають робочий об'єм $\Delta_{ос.}$; - заповнення робочого об'єму кульками $\Delta V/V$, (де V повний об'єм простору між зовнішньою поверхнею обкатника і внутрішньою поверхнею втулки обмежений кришками з боків а ΔV об'єм деформівних тіл між зовнішньою поверхнею обкатника і внутрішньою поверхнею втулки); амплітуда віброобточування $A=(D_{вт.}-d_{обк.}-2d_{д.т.})/2$, ($D_{вт.}$ – внутрішній діаметр оброблюваної втулки); тривалість оброблення T .

Однією з особливостей вібраційно-відцентрового зміцнення виробів є можливість оброблення виробів з використанням двох діапазонів $\Delta V/V$. При реалізації технології зміцнення з $\Delta V/V=0,30\dots0,35$ різко зростає частота обертання обкатника, що забезпечує ефективність обробки при відносно незначній кількості деформівних елементів. Використання діапазону $\Delta V/V=0,8\dots0,9$ приводить до невеликої частоти обертання обкатника а ефективність обробки забезпечується збільшенням кількості деформівних тіл.

Після обробки деталі технологічне оснащення розбирали та вимірювали параметри шорсткості за допомогою вимірювального комплексу.

Методика визначення топологічних параметрів якості поверхневого шару матеріалу виробу

Як свідчать результати теоретичних і експериментальних досліджень [8-11], значний вплив на формування експлуатаційних властивостей виробів (міцності з'єднання, зносостійкості, втомної міцності, опірності корозії) має шорсткість поверхні – сукупність мікронерівностей з відносно малими кроками (рис. 4). Основними характеристиками шорсткості поверхні згідно ISO 4287 є середнє арифметичне відхилення профілю R_a , середнє квадратичне відхилення профілю R_q , висота нерівностей профілю по десяти точках R_z , висота згладжування R_p , найбільша висота нерівностей профілю R_{max} , середній крок нерівностей профілю S_m , середній крок нерівностей по вершинах S , радіус кривизни виступу профілю r тощо (рис. 4).

Розподіл матеріалу в шорсткому шарі твердого тіла характеризує опорна крива профілю поверхні, яку будують в безрозмірних величинах [8].

Вимірювання геометричних параметрів якості поверхні, зокрема шорсткості проводили за допомогою вимірного комплексу, принципова схема якого приведена на рис. 5, а фотографія - на рис. 6.

Опрацювання отриманих профілограм та розрахунки топографічних характеристик мікрогеометрії поверхні виконували за допомогою середовища *Roughness Plot Analyzer* (рис. 7, 8) [1,2].

Оброблення результатів експериментальних досліджень проводили згідно методики [1,2].

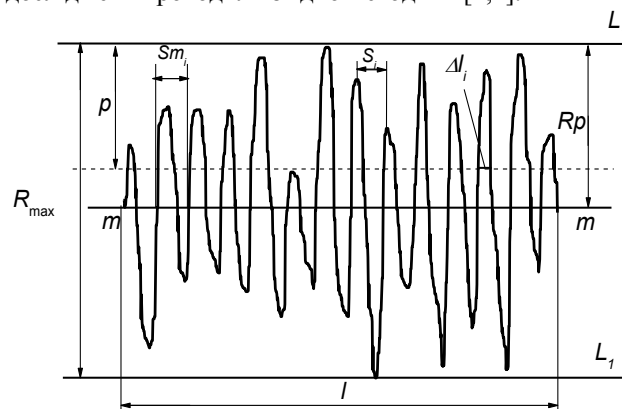


Рис. 4 – Основні характеристики профілю поверхні

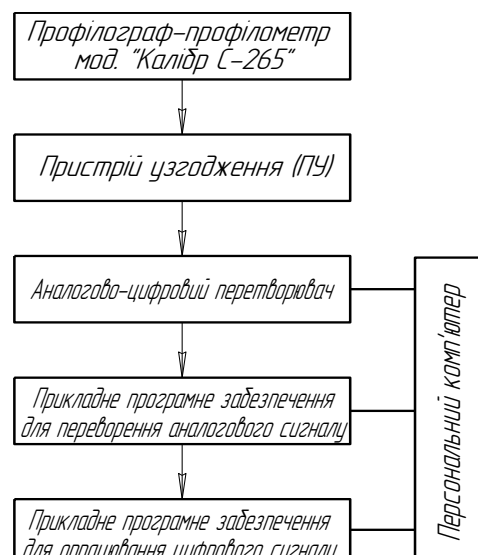


Рис. 5 – Принципова схема вимірного комплексу для проведення експериментальних досліджень



Рис. 6 – Комплекс для вимірювання геометричних параметрів якості поверхні виробів

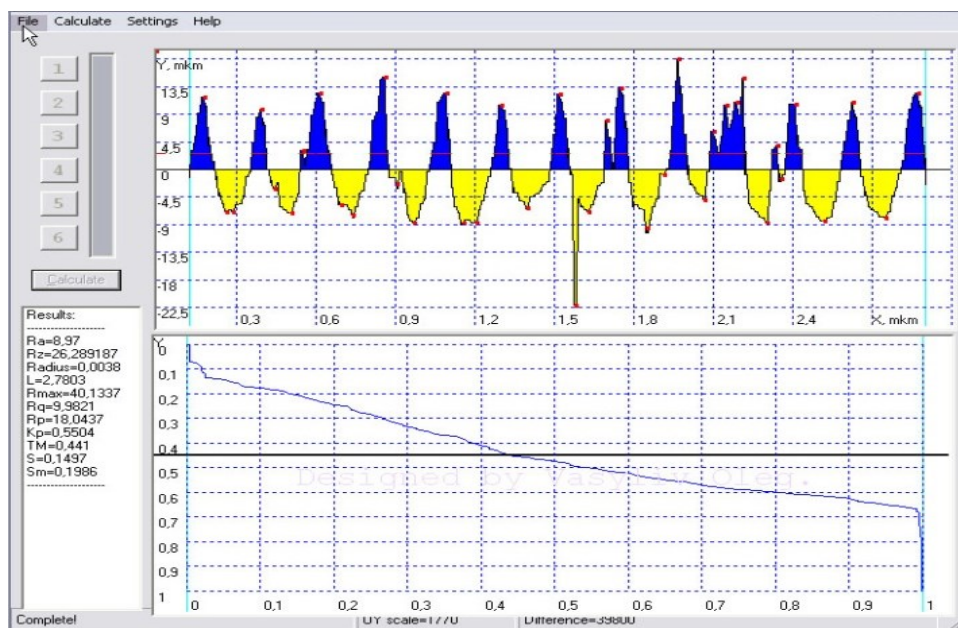


Рис. 7 – Отримані результати розрахунку топографічних характеристик мікрогеометрії відправної поверхні (після точіння) для верхньої твірної

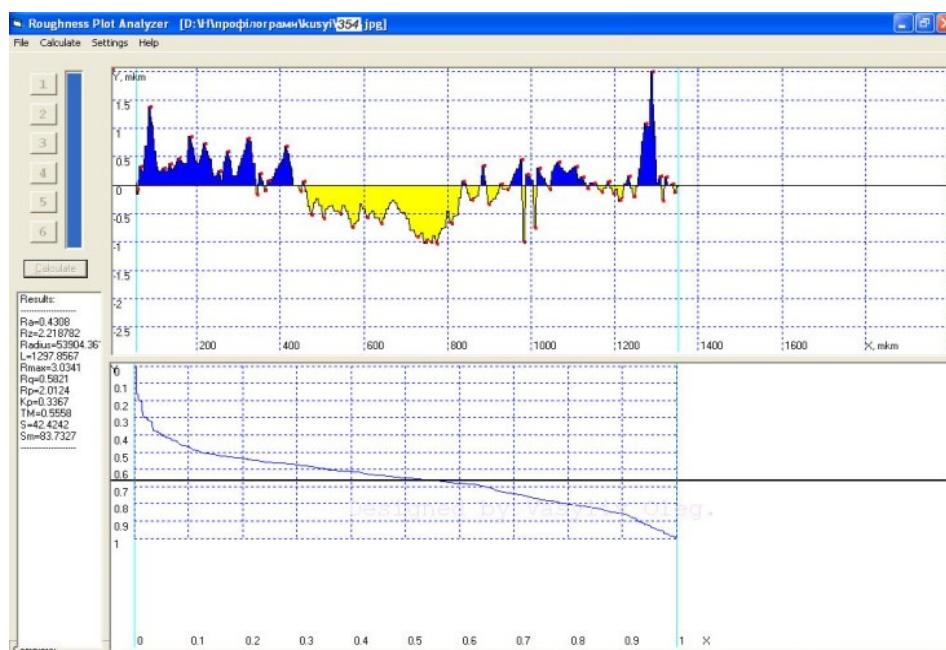


Рис. 8 – Отримані результати розрахунку топографічних характеристик мікрогеометрії відправної поверхні (після вібраційно-відцентрового зміщення кульками $\varnothing 10$ мм) для нижньої твірної

Статистичне опрацювання та обговорення результатів досліджень

Технологічні параметри вібраційно-відцентрового зміщення приведено у табл. 1. Контроль геометричних параметрів якості віброоброблених втулок бурових pomp здійснювався по верхній і нижній кривій для аналізу ефективності вібраційно-відцентрового зміщення на викінчуально-зміцнювальних технологічних операціях.

Таблиця 1 – Технологічні параметри вібраційно-відцентрового зміщення

Маршрут вібро-обробки	$d_{обк.}$, мм	$d_{д.т.}$, мм	$\Delta_{ос.}$, мм	$\Delta V/V$	A, мм	T, хв
обробка кульками $\varnothing 12$ мм	70	12	5,5	0,8	3,0	15,0
обробка кульками $\varnothing 10$ мм	70	10	4,5	0,8	5,0	15,0

Вібраційно-відцентрове зміцнення проводили при $\Delta V/V=0,8$. Результати експериментальних досліджень приведено у табл. 2.

Таблиця 2 – Зміна параметрів рельєфу поверхні у процесі оброблення ВВЗ

Маршрут віброобробки	Параметри рельєфу поверхні, мкм					
	R_a	R_z	R_{max}	S	S_m	r
відправна поверхня						
верхня	8,970	26,2891	40,1337	0,1497	0,1986	0,0038
твірна						
нижня	9,518	25,4244	28,7805	0,2134	0,2096	0,0016
твірна						
обробка кульками $\varnothing 12$ мм						
верхня	1,820	6,7246	8,6396	0,1463	0,4768	0,1879
твірна						
нижня	2,178	7,7495	16,0749	0,1557	0,4827	0,1014
твірна						
обробка кульками $\varnothing 10$ мм						
верхня	0,243	0,9127	1,6409	34,7376	57,3540	14300,96
твірна						
нижня	0,431	2,2187	3,0341	42,4242	83,7327	53904,37
твірна						

Результати експериментальних досліджень показали покращення параметрів якості поверхні після вібраційно-відцентрового зміцнення. Вже після першого оброблення деталі ВВЗ кульками $\varnothing 12$ мм зменшуються параметри R_a , R_z , R_{max} від 1,8 до 4,9 разів. Наступна обробка кульками $\varnothing 10$ мм забезпечує зменшення R_a , R_z , R_{max} поверхні втулки порівняно з попередньою зміцнювальною обробкою у 5,1-7,5 разів, а по відношенню до відправної поверхні у 9,5-36,9 разів. Стосовно крокових параметрів - після першого оброблення деталі ВВЗ кульками $\varnothing 12$ мм крок нерівностей по вершинах S зменшується в 1,02-1,4 рази, а середній крок нерівностей профілю S_m збільшується 2,3-2,4 рази. Однак після оброблення кульками $\varnothing 10$ мм крокові параметри суттєво підвищуються: крок нерівностей по вершинах S – у 198,8-232,1 разів а середній крок нерівностей профілю S_m – у 288,8-399,5 разів порівняно із аналогічними параметрами для відправної поверхні. Крім цього слід відмітити збільшення радіусу кривизни виступу профілю r - з 0,0016-0,0038 мкм для поверхні після токарного оброблення до 0,1014-0,1879 для поверхні після оброблення кульками $\varnothing 12$ мм та 14301-53904 мкм – після оброблення кульками $\varnothing 10$ мм. Збільшення радіусу кривизни сприяє формуванню раціональних «оливних» кишень, що призводить до підвищення тримкої здатності та інших експлуатаційних характеристик оброблених втулок.

Висновки та перспектива подальших досліджень

Формування параметрів якості оброблення виробів, їх експлуатаційних характеристик і показників надійності виробів у значній мірі здійснюється на фінішних і викінчувально-зміцнювальних операціях технологічних процесів виготовлення деталей машин. Викінчувально-зміцнювальні технологічні операції мають перевагу щодо одночасного підвищення точності та забезпечення необхідних значень геометричних і фізико-механічних параметрів поверхневого шару. Вибір методу викінчувально-зміцнювального оброблення обґрунтовується, окрім забезпечення параметрів якості виробу, також технологічною собівартістю, продуктивністю та універсальністю використовуваного обладнання. Розроблений у Національному університеті «Львівська політехніка» метод вібраційно-відцентрового зміцнення є ефективним для викінчувально-зміцнювальної обробки внутрішніх поверхонь трубчастих виробів, зокрема циліндрових втулок бурових pomp. Основними технологічними параметрами методу ВВЗ служать діаметр обкатника $d_{обк.}$, діаметр деформівних тіл $d_{д.т.}$, осьовий проміжок між торцем обкатника і кришками $\Delta_{ос.}$, заповнення робочого об'єму кульками $\Delta V/V$, амплітуда віброобкочування A , тривалість оброблення T . Експериментальні дослідження впливу обробки методом вібраційно-відцентрового зміцнення на параметри якості поверхонь втулок показали суттєве покращення параметрів мікрорельєфу профілю зміцнених втулок, зокрема зменшення висотних параметрів мікропрофілю поверхні (R_a , R_z , R_{max}) у 9,5-36,9 разів та підвищення крокових параметрів (S , S_m) у 288,8-399,5 разів порівняно з відправною поверхнею після токарного оброблення. Подальші дослідження у цьому напрямку здійснюватимуться для оптимізації режимів оброблення та розроблення практичних рекомендацій по використанню вібраційно-відцентрових зміцнювачів з дебалансним приводом для покращення експлуатаційних характеристик поверхонь деталей типу «втулка».

Список літератури

1. Кусий Я. М., Кук А. М. Розроблення методу вібраційно-відцентрового зміцнення для технологічного забезпечення безвідмовності деталей машин. *Східно-Європейський журнал передових технологій*. 2015. Т. 1, № 7 (73). С. 41-51. doi: 10.15587/1729-4061.2015.36336.
2. Kusyj J., Kuk A., Topilnytsky V. Vibratory-centrifugal strengthening's influence on failure-free parameters of drilling pumps bushings. *Technology audit and production reserves*. 2018. Vol. 1, № 1 (39). P. 4-12. doi: 10.15587/2312-8372.2018.123838.
3. Blumenstein V., Rakhimyanov K., Heifetz M., Kleptzov A. Problem of technological inheritance in machine engineering. *AIP Conference Proceedings*. 2016. V. 1698 (1). P. 2-7.

4. Denkena B., Mörke T., Krüger M., Schmidt J., Boujnah H., Meyer J., Gottwald P., Spitschan B., Winkens M. Development and first Applications of Gentelligent Components over their Life-Cycle. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. 2014. Vol. 7(2). P. 139-150.
5. Gubaydulina R. H., Gruby S. V. and Davlatov G. D. Analysis of the Lifecycle of Mechanical Engineering Products. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016. Vol. 142 (1), P. 012060.
6. Winkens M., Goerke M., Nyhuis P. Use of Life Cycle Data for Condition-Oriented Maintenance. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*. 2015. V. 9 (4). P. 1178-1181.
7. Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strutynska L. R., Strogan O. I. Vibrational-centrifugal surface strengthening of drill and casing pipes. *Scientific Bulletin of National Mining University*. 2018. Issue 5. P. 88-97.
8. Григорьев А. Я. *Физика и микрогеометрия технических поверхностей*. Белорусская наука. Минск, 2016. 247 с.
9. Gontarz A. M., Hampl D., Weiss L., Wegener K. Resource Consumption Monitoring in Manufacturing Environments. *Procedia CIRP*. 2014. V. 26(1). P. 264-269.
10. Skoog A., Pereva T., Johansson B. Input data management in simulation-industrial practices and future trends. *Simulation Modelling Practices and Theory*. 2012. V. 29. P. 181-192. doi:10.1016/j.simpat.2012.07.009.
11. Wang L. *Data representation of machine models. Dynamic thermal analysis of machines in running state*. London: Springer-Verlag. 2014. P. 11-29. doi: 10.1007/978-1-4471-5273-6_2.
2. Kusyj J., Kuk A., Topilnytsky V. Vibratory-centrifugal strengthening's influence on failure-free parameters of drilling pumps bushings. *Technology audit and production reserves*, 2018, 1/1 (39), 4-12, doi: 10.15587/2312-8372.2018.123838.
3. Blumenstein V., Rakhimyanov K., Heifetz M., Kleptzov A. Problem of technological inheritance in machine engineering. *AIP Conference Proceedings*, 2016, 1698 (1), 2-7.
4. Denkena B., Mörke T., Krüger M., Schmidt J., Boujnah H., Meyer J., Gottwald P., Spitschan B., Winkens M. Development and first Applications of Gentelligent Components over their Life-Cycle. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 2014, 7(2), 139-150.
5. Gubaydulina R. H., Gruby S. V., Davlatov G. D. Analysis of the Lifecycle of Mechanical Engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2016, 142 (1), 012060.
6. Winkens M., Goerke M., Nyhuis P. Use of Life Cycle Data for Condition-Oriented Maintenance. *International Journal of Mechanical, Aerospace, Industrial and Mechatronics Engineering*, 2015, 9 (4), 1178-1181.
7. Aftanaziv I. S., Shevchuk L. I., Strutynska L. R., Strogan O. I. Vibrational-centrifugal surface strengthening of drill and casing pipes. *Scientific Bulletin of National Mining University*, 2018, 5, 88-97.
8. Grigorjev A. J. *Fizika i mikrogeometrija tehničkih povrhnosti* [The technical surfaces physics and microgeometry]. Белорусская наука. Минск, 2016. 247.
9. Gontarz A. M., Hampl D., Weiss L., Wegener K. Resource Consumption Monitoring in Manufacturing Environments. *Procedia CIRP*, 2014, 26(1), 264-269.
10. Skoogh A., Perera T., Johansson B. Input data management in simulation-industrial practices and future trends. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 2012, 29, 181-192, doi:10.1016/j.simpat.2012.07.009.
11. Wang L. *Data Representation of Machine Models. Dynamic Thermal Analysis of Machines in Running Stat*. London: Springer-Verlag, 2014. 11-29, doi:10.1007/978-1-4471-5273-6_2.

References (transliterated)

About authors (відомості про авторів)

Кусий Ярослав Маркіянович – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет «Львівська політехніка», кафедра технології машинобудування, м. Львів, Україна; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5741-486X>; e-mail: jarkym@ukr.net; biodarkym@ukr.net.

Yaroslav Kusi – PhD, Docent, Lviv Polytechnic National University, Docent of Mechanical Engineering Department, Lviv, Ukraine; ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-5741-486X>; e-mail: jarkym@ukr.net; biodarkym@ukr.net.

Будь-ласка, робіть посилання на цю статтю таким чином

Кусий Я. М. Дослідження впливу викінчувальних операцій на формування параметрів якості поверхні втулок бурових помп. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. - . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.02.

Please cite this article as:

Kusyj Ya. Investigation of the influence of finishing operations on the formation of surface quality parameters of bushings of drilling pumps. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. - , doi:10.20998/2413-4295.2020.02.02.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Кусый Я. М. Исследование влияния отделочных операций на формирование параметров качества поверхности втулок буровых насосов. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. - . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.02.

АННОТАЦИЯ Разработка оптимального технологического процесса изготовления ответственных деталей машин, в частности цилиндрических втулок буровых насосов деталей газо- и нефтедобывающего оборудования, является самым эффективным при применении системного подхода применительно к исследованию взаимосвязей с технологической средой: станок-приспособление-инструмент-заготовка. Рациональный выбор финишных и отделочно-упрочняющих операций технологических процессов изготовления деталей машин обеспечивает формирование необходимых параметров точности, качества поверхностного слоя и эксплуатационных характеристик. Традиционные технологические методы финишной обработки деталей машин, методы химико-термической обработки и нанесения покрытий являются недостаточно эффективными для обеспечения эксплуатационных характеристик цилиндрических втулок буровых насосов. Вибрационные технологии как группа методов поверхностного пластического деформирования применяются на отделочно-упрочняющих операциях изготовления изделий в различных отраслях промышленности. Цель исследования данной статьи – анализ влияния технологических параметров вибрационного упрочнения, в частности вибрационно-центробежного упрочнения, на формирование параметров качества поверхности цилиндрических втулок буровых насосов НБЗ2. Выбраны материалы для проведения исследований и приведен эскиз опытного образца. Приведены принципиальная схема вибромашины объемной обработки и технологического оснащения для реализации вибрационной технологии, описано их строение и принцип работы. Приведена методика реализации экспериментальных исследований. Описана методика определения геометрических параметров качества поверхностного слоя материала изделия, приведен комплекс для измерения геометрических параметров качества поверхности изделий. Представлено и проанализировано изменение параметров рельефа поверхности изделий после вибрационно-центробежной обработки. Установлено, что вибрационно-центробежная упрочнения внутренних поверхностей втулок шариками $\varnothing 10$ и $\varnothing 12$ мм способствует улучшению параметров микрорельефа их профиля за счет уменьшения высотных параметров микропрофиля поверхности в 9,5-36,9 раз и повышению шаговых параметров в 289-399 раз по сравнению с поверхностью после токарной обработки. Дальнейшие исследования в этом направлении будут касаться оптимизации режимов обработки и разработке практических рекомендаций по использованию вибрационно-центробежных упрочнителей с дебалансным приводом для улучшения эксплуатационных характеристик деталей типа «втулка».

Ключевые слова: технологический процесс; цилиндрическая втулка; качество поверхности; отделочно-упрочняющая операция; вибрационные технологии; вибрационно-центробежное упрочнение

Надійшла (received) 02.05.2020

УДК 621.3

doi: 10.20998/2413-4295.2020.02.03

ВЕНТИЛЬНО-ІНДУКТОРНИЙ ДВИГУН З ПОКРАЩЕНИМИ ТЯГОВИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ

М. О. ЛУК'ЯНОВ

кафедра електронних пристроїв та систем, факультет електроніки, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського» Київ, УКРАЇНА
e-mail: zebrahead097@gmail.com

АНОТАЦІЯ Вентильно-індукторний двигун завдяки своїм перевагам може використовуватися у транспортних засобах низької та середньої потужності. Проте, через значні пульсації обертового моменту, складність електричного драйвера й недостатню питому потужність він не є розповсюдженим. У даній статті розглядається структура і характеристики вентильно-індукторного двигуна з С-подібними полюсами і електричний драйвер для його контролю для мінімізації недоліків двигуна. В результаті аналізу, запропоновано критерій ефективності, який базується на порівнянні прискорюючої і гальмівної сили, що створюється полюсом статора. Для забезпечення ефективної роботи двигуна гальмівна сила повинна бути мінімальною, а її вплив компенсовано певною формою струму, за рахунок чого сумарна сила і момент залишаються постійними в кожен момент часу. За рахунок вибору оптимального відношення між полюсами статора й ротора забезпечується мінімальне значення гальмівної сили, а вибір оптимальної кількості полюсів дозволяє досягти максимальної сили. За рахунок високочастотного методу формування струму обмотки статора із запропонованою формою, вплив гальмівної сили і, відповідно, пульсації обертового моменту мінімізовано. При цьому, для підвищення ефективності роботи двигуна запропоновано двоохсекційну структуру полюсів із використанням додаткових обмоток для модуляції амплітуди струму, що додатково дозволяє розподілити потужність між секціями. Формування струму керування обмотками здійснюється розповсюдженим резонансним перетворювачем з м'яким перемиканням ключів. Модульна структура електричного драйвера дозволяє використовувати лише чотири резонансні перетворювачі для всього драйвера при одночасній роботі одного полюса статора. У результаті було виявлено, що оптимальною структурою двигуна є $n+1/n$, так як розміщення полюсів у корпусі ротора дає можливість досягти максимальної сили. Розрахунок вентильно-індукторного двигуна для даної структури й $n=7$ показав зменшення об'єму двигуна в 2,75 разів і підвищення потужності в 6 разів у порівнянні з популярним тяговим асинхронним двигуном. Моделювання електричного драйвера в середовищі Matlab Simulink показало, що пульсації обертового моменту при даному методі формування струму обмотки статора складають близько 3,25% і можуть варіюватись в залежності від кількості періодів модулюючого сигналу.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигун; модульний електричний драйвер; постійний момент; високочастотне керування; резонансний перетворювач.

SWITCHED-RELUCTANCE MOTOR WITH IMPROVED TRACTION CHARACTERISTICS

M. LUKIANOV

Department of Industrial Electronics, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Due to its advantages, the switched-reluctance motor can be used in low and medium power vehicles. However, due to the significant torque ripples, the complexity of the electric driver and the insufficient power density, it is not common. This article discusses the structure and characteristics of a switched-reluctance motor with C-shaped poles and an electric driver to control it to minimize the shortcomings of the motor. As a result of the analysis, the criterion of efficiency which is based on comparison of the accelerating and braking force created by a stator pole is offered. To ensure efficient operation of the motor, the braking force must be minimal, and its influence is compensated by a certain form of current, due to which the total force and torque remain constant at all times. Due to the choice of the optimal ratio between the poles of the stator and the rotor, the minimum value of the braking force is provided, and the choice of the optimal number of poles allows achieving the maximum force. Due to the high-frequency method of forming the stator winding current with the proposed shape, the effect of braking force and, accordingly, the torque ripple is minimized. In this case, to increase the efficiency of the motor, a two-section pole structure is proposed using additional windings to modulate the current amplitude, which additionally allows distributing power between sections. The winding control current is generated by a common resonant converter with soft key switching. The modular structure of the electric driver allows using only four resonant converters for all drivers at simultaneous work of one pole of the stator. As a result, it was found that the optimal structure of the motor is $n+1/n$, as the arrangement of the poles in the rotor housing makes it possible to achieve maximum power. The calculation of switched-reluctance motor for this structure and $n=7$ showed a reduction in engine volume of 2.75 times and an increase in power of 6 times compared to the popular traction asynchronous motor. Simulation of the electric driver in the Matlab Simulink environment showed that the torque ripple with this method of forming the stator winding current is about 3.25% and can vary depending on the number of periods of the modulating signal.

Keywords: switched-reluctance motor; modular electric driver; constant moment; high frequency control; resonant converter.

Вступ

На даний час у електричних транспортних засобах популярності набули асинхронні двигуни, а

також двигуни з постійними магнітами через їх відносно просту конструкцію, високий обертовий момент і стабільність роботи [1,2]. Проте, через

складність драйвера асинхронних двигунів і зростання цін на неодимові магніти, актуальним є пошук альтернативних двигунів із дешевших матеріалів і з простішою системою керування [3,4]. Однією з перспективних альтернатив є вентильно-індукторний двигун (ВІД), який може бути сконструйований із феритових осердь або електротехнічної сталі [5,6]. Незважаючи на просту конструкцію, низьку виробничу вартість, високі динамічні характеристики, простий розподіл потужності між секціями двигуна, високу експлуатаційну надійність, він широко не використовується через значні пульсації обертового моменту, недостатній обертовий момент і малу щільність потужності [7].

Стаття розглядає розробку структури вентильно-індукторного двигуна та його драйвера для забезпечення мінімальних пульсацій обертового моменту і покращенню масогабаритних показників.

Мета роботи

У роботі пропонується структура вентильно-індукторного двигуна із С-подібними полюсами ротора й статора з покращеними масогабаритними показниками. Описується форма струму обмоток для забезпечення постійного обертового моменту, а також методика формування заданого струму для забезпечення мінімальних пульсацій.

На основі порівняння характеристик розроблюваного двигуна з популярним асинхронним двигуном ДТА-1У, а також моделюванням перетворювача показуються переваги розробленого двигуна.

Опис вентильно-індукторного двигуна

Найпопулярнішою на даний момент є структура ВІД, зображена на рис. 1(а). Статор і ротор виконані із м'якого магнітного матеріалу, з розташованими по колу полюсами у вигляді зубців. Недоліком такої структури є використання статора й ротора у вигляді суцільного кільцевого сердечника, що призводить до значних втрат на перемагнічення у магнітному контурі, а також великої питомої маси на одиницю потужності.

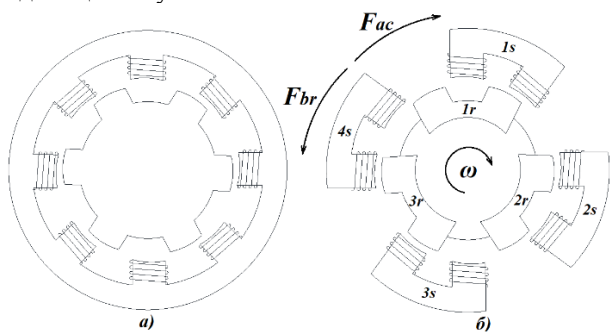


Рис. 1 – Загальна структура ВІД

На рис. 1(б) зображено запропоновану структуру ВІД, полюси ротора й статора якого мають С-подібну форму з зубцями. Це дозволяє зменшити довжину магнітного контуру і в результаті зменшити втрати, використання магнітного матеріалу, а також покращити масогабаритні показники [8].

Загалом, ВІД складається з n полюсів ротора й k полюсів статора. Кожен полюс статора містить обмотку, яка індукуює магнітний потік, що приводить в рух ротор в певному напрямку з деякою кутовою частотою ω й обертовим моментом M , що визначається силою прискорення F_{ac} . Обмотка для індукції магнітного поля, залежить від відносного розташування полюсів статора і ротора. Для структури, показаної на Рис. 1(б), обмотка на полюсі статора $1s$ підходить для індукції магнітного поля за рахунок найкоротшої відстані до полюса ротора $1r$ у напрямку руху. В результаті магнітного потоку, що індукуюється в магнітному ланцюзі, створеному цими двома полюсами, з'являється прискорююча сила F_{ac} . Ключовим є те, що магнітний потік полюса $1s$ одночасно створює гальмівну силу F_{br} з полюсом ротора $2r$. Тому сумарна сила F_{Σ} – це сума всіх прискорювальних і гальмівних сил. Але на практиці враховуються лише сили, створені двома найближчими полюсами ротора:

$$F_{\Sigma} = F_{ac} - F_{br}, \quad (1)$$

де сили F_{ac} і F_{br} обчислюються однаково:

$$F = \frac{1}{2\mu_0 S_g} \cdot \left(\frac{IL}{N} \right)^2, \quad (2)$$

де S_g – площа зазору, I – струм обмотки, N – кількість витків обмотки, L – індуктивність обмотки:

$$L = \frac{N^2 \mu_0 S_g \mu}{l_{mag} + l_g \mu}, \quad (3)$$

де l_{mag} – довжина магнітної лінії, l_g – довжина зазору.

Загальний обертовий момент T_{Σ} , обчислюється як добуток загальної сили і радіуса ротора R :

$$T_{\Sigma} = F_{\Sigma} R, \quad (4)$$

Загальний обертовий момент T_{Σ} забезпечується сумарним струмом обмотки I_{Σ} полюса статора:

$$I_{\Sigma} = I_{ac} + I_{br} + I_{leak}, \quad (5)$$

де I_{ac} – струм, що створює силу F_{ac} ; I_{br} – струм, що створює силу F_{br} ; I_{leak} – струм потоку розсіювання.

Структура ВІД та його алгоритм управління повинні бути розроблені таким чином, щоб забезпечити регулювання обертового моменту з мінімальними пульсаціями та мінімальним загальним струмом I_{Σ} , наскільки це можливо.

Вибір оптимальної структури двигуна

Забезпечити високу ефективність роботи ВІД, мінімальні пульсації моменту й мінімальний сумарний струм можливо, коли гальмівна сила F_{br} прямує до нуля, тобто коли робочий полюс статора поблизу робочого полюса ротора. Така умова повинна досягатися постійно під час обертання ротора. Конфігурація ВІД при цьому відіграє вирішальну роль. Були проаналізовані комбінації $(n+1)/n$, $(2n+1)/n$, $(2n+2)/n$, де у чисельнику – кількість полюсів статора, а в знаменнику – статора, n – ціле число. Після аналізу вказаних структур, було виявлено, що ефективність роботи ВІД – $k_{ef}=1-F_{br}/F_{ac}$, що визначається відношенням гальмівної сили до прискорюючої, найкраща у конфігурації $2n+1/n$. Однак, структура $n+1/n$ має найкращу щільність розміщення полюсів на роторі відносно полюсів статора і дозволяє забезпечити найбільшу силу, тому її найкраще використовувати на практиці.

При цьому, при використанні лише одного полюса ротора одночасно досягається максимальна ефективність, так як перемикавання полюсів при цьому відбувається в моменти максимальної близькості робочих полюсів для обраної комбінації. При використанні ж декількох полюсів одночасно вдається досягти більшого значення сили, але полюси перемикаються в моменти меншої ефективності.

Залежність k_{ef} від кількості полюсів для комбінації $n+1/n$ приведено на рис. 2. Як можна побачити, при збільшенні кількості полюсів коефіцієнт ефективності значно зростає і вже при $n=10$ досягає значення близького до 1. При використанні ж $[n/2]$ полюсів коефіцієнт ефективності падає з ростом кількості полюсів, що пояснюється зменшенням різниці в відстані між полюсом що прискорює й полюсом що гальмує. Варто відмітити, що при використанні $[n/2]$ полюсів одночасно, непарна кількість полюсів має більшу ефективність, через меншу відстань в моменти перемикавання.

З врахуванням коефіцієнту ефективності було визначено максимальні значення сили, які можуть бути досягнуті в заданих габаритах двигуна ДТА-1У (довжина $L=860$ мм, діаметр $D=520$ мм) рис.3.

При цьому, при збільшенні кількості полюсів і одночасному використанні одного полюса максимальне значення сили зменшується і обмежується величиною одного полюса. При використанні ж $[n/2]$ полюсів, максимальна сила, в більшій мірі обмежується коефіцієнтом ефективності.

На основі проведеного дослідження для структури $n+1/n$ було розроблено й розраховано ВІД з $n=7$ при одночасній роботі трьох полюсів для розміщення в корпусі двигуна ДТА-1У. Як матеріал магнітопроводу використовувався «Альсифер» через високу індукцію насичення й хороші частотні характеристики. У результаті розрахунку, вдалося досягти зменшення об'єму у 2,75 разів і збільшенню потужності в 6 разів. Тобто, розроблений двигун, при

габаритах ($L=313$ мм, $D=520$ мм) забезпечує момент $M=1150$ Н/м і має максимальну частоту обертання $n=9375$ об/хв. При цьому, втрати на перемагнічення магнітопроводу, при максимальній частоті роботи складають 8%.

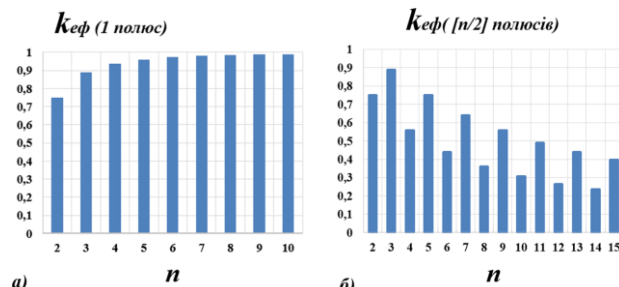


Рис.2 – Залежність ефективності конфігурації від кількості полюсів: а) при роботі 1 полюса; б) при роботі $[n/2]$ полюсів

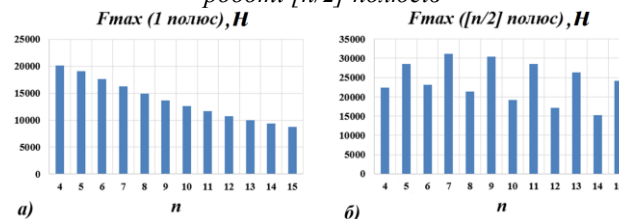


Рис.3 – Залежність максимальної сили від кількості полюсів при використанні одночасно: а) одного полюса; б) $[n/2]$ полюсів;

Принцип ефективного контролю ВІД

Найпростішим методом контролю ВІД є генерування струму обмоток прямокутної форми, що призводить до значних пульсацій обертового моменту. Більш складні методи, наприклад пряме управління обертовим моментом [9], функція розподілу обертового моменту [10], зменшують пульсації обертового моменту, але призводять до накладання струму різних фаз, що знижує ефективність ВІД, рис.4.

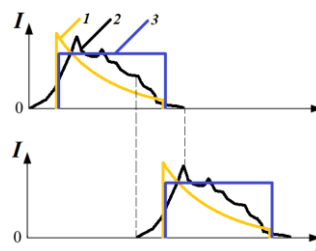


Рис. 4 – Форма струму обмотки: 1 - запропонована форма струму; 2 – прямий контроль моменту; 3 – прямокутна форма струму

Запропонований алгоритм управління дозволяє одночасно забезпечити постійний обертовий момент і усунути накладання струму в обмотках полюсів статора ВІД.

При цьому, для ефективної роботи ВІД, генерувати струм потрібно в тих обмотках статора, до яких полюс ротора, що забезпечує рух у позитивному

напрямку, найближче. При цьому, сумарний струм обмотки статора I_{Σ} повинен мати таку форму, щоб для будь-якої координати полюса ротора створювалась постійна загальна сила $F_{\Sigma} = \text{const}$. Для забезпечення цієї умови загальний струм обмотки зменшується, коли полюс ротора наближається до полюса статора в напрямку руху, як на рис.4(1).

Як наслідок, проблема формування струму обмотки потребує відповідної структури перетворювача з такими вимогами: регульована форма вихідного струму; можливість формування крутого фронту; висока ефективність.

Методика формування струму обмотки

Зазвичай ВІД живиться асиметричними напівмостовими перетворювачами [11]. Також для більш ефективного використання комутаторів використовуються спільні топології [12, 13]. Для підвищення ефективності застосовують м'яку комутацію та повномостові перетворювачі з синхронним випрямленням струму [14].

Більш привабливе рішення, особливо для високих потужностей, може бути реалізовано в модульному ВІД, що складається з рівної кількості секцій ротора та статора.

Припустимо, ВІД має дві секції. Загальна сила F_{Σ} - сума сил секцій $F_{\Sigma 1}$ і $F_{\Sigma 2}$:

$$F_{\Sigma} = F_{\Sigma 1} + F_{\Sigma 2}. \quad (6)$$

Відповідно до формули (2) сила F пропорційна квадрату струму I , $F \sim I^2$. Отже, якщо визначити струм секцій статора I_{SW1} та I_{SW2} наступним чином:

$$I_{SW1}(t) = I_{\Sigma}(t) \cos(\omega t); \quad (7)$$

$$I_{SW2}(t) = I_{\Sigma}(t) \sin(\omega t). \quad (8)$$

Тоді сумарна сила F_{Σ} пропорційна:

$$F_{\Sigma} \sim I_{SW1}(t)^2 + I_{SW2}(t)^2 = I_{\Sigma}(t)^2, \quad (9)$$

і тому не має пульсації, як показано на Рис.5.

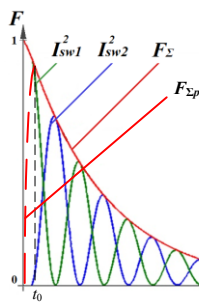


Рис. 5 – Сумарна сила F_{Σ} як сума сил двох секцій

Регулювання амплітуди струму за гармонічним законом у широкому діапазоні, як показано у формулах (7) та (8), потребує більш складних рішень, наприклад двоступеневих перетворювачів [15]. Доцільніше регулювати магнітний потік додатковою обмоткою статора та більш ефективними

одноступеневими перетворювачами. У цьому випадку загальний магнітний потік $\Phi_{SW(i)}$ утворюється двома струмами обмотки $I_{SW(i)1}$ та $I_{SW(i)2}$.

Якщо струм $I_{SW(i)1}$ дорівнює $I_{SW(i)1} = A \sin(\omega t)$, а струм $I_{SW(i)2}$ має однакову амплітуду A і зміщений на кут φ , $I_{SW(i)2} = A \sin(\omega t + \varphi)$ загальний потік секції $\Phi_{SW(i)}$ обчислюється таким чином:

$$\begin{aligned} \Phi_{SW(i)}(t) &\sim 2A \sin(\omega t + \varphi / 2) \cos(\varphi / 2) = \\ &= A^* \sin(\omega t + \varphi / 2). \end{aligned} \quad (10)$$

Отже, змінюючи зсув фаз між обмотками секції можна регулювати амплітуду A^* в діапазоні $[0; 2A]$.

Слід зауважити, що на практиці неможливо досягти ідеально різкого піку струму обмотки статора через її індуктивний характер, що призводить до виникнення похибки формування струму t_0 , яка може бути знижена шляхом збільшення частоти формування струму.

Одним із можливих рішень усунення похибки є компенсація сумарної сили в момент $[0; t_0]$ силою попереднього полюса. Це можливо зробити, коли діючий полюс статора вимикається до того, як вирівнявся з робочим полюсом ротора. І, так як струм індуктивності розімкнутого полюса не може спасти миттєво, розімкнутий полюс буде забезпечувати значення сили, яке компенсує провал сили наступного полюса.

Запропонований метод регулювання має такі переваги:

- можливість створення різко наростаючого фронту загальної сили, що визначається кутовою частотою струмів обмотки секції ω , формулами (7) та (8);
- підвищити ефективність приводу двигуна за рахунок м'якого перемикання транзисторів на інтервалах перетину нуля.

Топологія перетворювача

В якості основної топології для формування квазі-гармонічної форми струму, наведеної у формулах (7) та (8), може бути використаний резонансний мостовий перетворювач [16], показаний на рис. 6.

Резонансний контур перетворювача складається з резонансного конденсатора C і змінної індуктивності обмотки статора ВІД L . Транзистори при цьому перемикаються при нульовому струмі.

Електропривод для одного полюса статора при мінімальній конфігурації з двома секціями складається з чотирьох подібних резонансних перетворювачів, як показано на рис. 7.

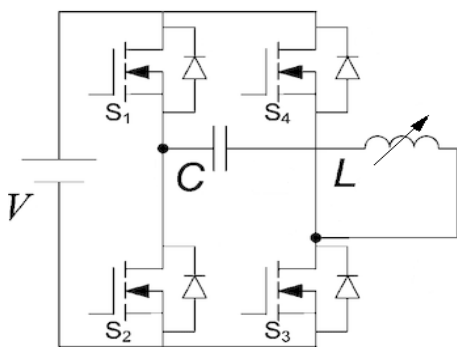


Рис. 6 – Резонансний мостовий перетворювач

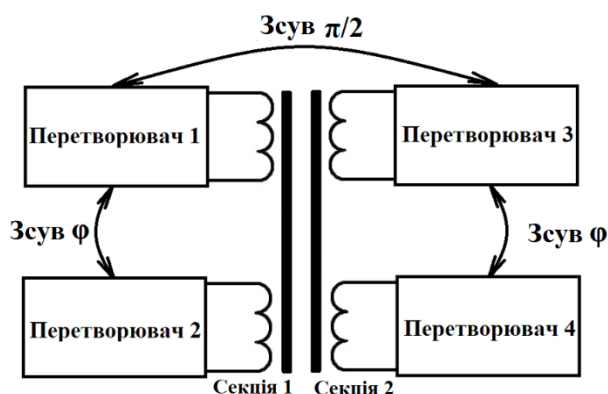


Рис. 7 – Драйвер одного полюса статора

Така модульна структура приводу додатково розподіляє потужність між перетворювачами [17, 18].

Як було сказано вище, полюси статора працюють один за одним, тому може використовуватися лише один електропривод статора для всього ВІД. При цьому електропривод підключається до кожного полюса статора за допомогою двонаправлених ключів.

Симуляція роботи електроприводу

Моделювання роботи електричного драйвера здійснено в системі моделювання R2013a - MATLAB & Simulink. Схема одного перетворювача зображена на рис.8. Індуктивність змінюється в межах $L = 63,4^{-3} \dots 11,7^{-3} \text{ Гн}$, $C = 512 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}$.

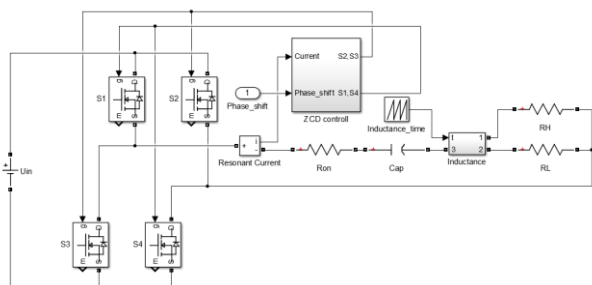


Рис. 8 – Схема одного перетворювача в Simulink

На рис. 9 зображено нормовану сумарну силу при різних кількості періодів синусоїди для формування заданої сили. З рисунку видно, що

амплітуда струму секцій змінюється відповідно до закону регулювання струму, описаного раніше. Оскільки зсув фаз між обмотками секції для модуляції амплітуди формується шляхом введення затримки при перемиканні ключів в моменти нульового струму, форма струму спотворюється і виникають пульсацій моменту, що негативно впливають на роботу двигуна. Ці пульсації можуть бути зменшені, шляхом збільшення кількості періодів формування струму обмотки одного полюса.

На рис. 9 зображено нормовану сумарну силу двигуна, як суму квадратів струму обмоток. Як можна побачити, при кількості періодів на формування струму $T=20$ пульсації мають значення близько 6,5%.

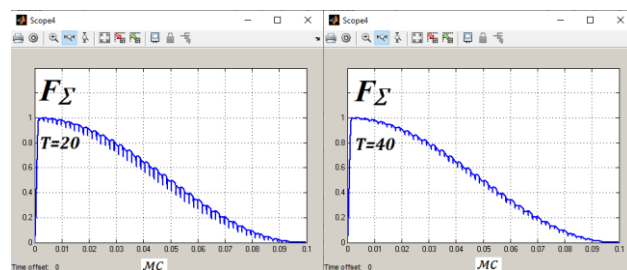


Рис. 9 – Нормована сумарна сила

При використанні кількості періодів $T=40$ пульсації зменшуються в два рази і складають близько 3,25%.

Висновки

Оптимальною конфігурацією для даної структури двигуна є $n+1/n$, так як вона забезпечує оптимальне розміщення полюсів в корпусі ротора, що дозволяє досягти більшого значення сили в заданих габаритах.

Для заданої структури було розроблено і розраховано ВІД, об'єм якого в 2,75 разів менший, а потужність в 6 разів більша у порівнянні з асинхронним двигуном ДТА-1У.

За рахунок використання запропонованого алгоритму керування для формування струму заданої форми пульсації обертового моменту мінімізовано.

Запропоновано модульну структуру електричного драйвера, яка дозволяє розподілити потужність між секціями полюса і використовувати лише чотири перетворювачі для всього ВІД.

Список літератури

1. Boukoberine M. N., Zhou Z., Benbouzid M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects. *Applied Energy*. 2019. V. 255. doi:10.1016/j.apenergy.2019.113823.
2. Laskaris K. I., Kladas A. G. Internal Permanent Magnet Motor Design for Electric Vehicle Drive. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. V. 57(1). P. 138–145. doi:10.1109/tie.2009.2033086.
3. Widmer J. D., Martin R., Kimiabeigi M. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets. *Sustainable*

- Materials and Technologies*. 2015. V. 3. P. 7–13. doi:10.1016/j.susmat.2015.02.001.
4. Ramu Krishnan. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. CRC Press, 2010. 611 p. doi: 10.1201/9781420014235.
 5. Chiba A., Kiyota K. Review of research and development of switched reluctance motor for hybrid electrical vehicle. *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*. 2015. P. 127–131. doi:10.1109/wemdc.2015.7194520.
 6. Jiang C., Chau K. T., Liu C., Han W. Design and Analysis of Wireless Switched Reluctance Motor Drives. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. V. 1–1. doi:10.1109/tie.2018.2829684.
 7. Yu Q., Bilgin B., Emadi A. Design considerations of switched reluctance machines with high power density. *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*. 2016. doi:10.1109/itec.2016.7520226.
 8. Карий М. О., Павлюченко В. Л., Жуйков В. Я., Вербицький Є. В., Ямненко Ю. С. *Електропривод з вентильно-індукторним електроприводом*, Опис до патенту на корисну модель Україна UA 127633 U, 2018.
 9. Deng X., Mecrow B., Gadoue S., Martin R. A torque ripple minimization method for six-phase switched reluctance motor drives, *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*. 2016. doi: 10.1109/icelmach.2016.7732641.
 10. Xue X. D., Cheng K. W. E., Ho S. L. Optimization and Evaluation of Torque-Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2009, V. 24(9). P. 2076–2090. doi:10.1109/tpel.2009.2019581.
 11. Liaw C.-M., Hu K.-W., Wang J.-C., Ho C. Y., Development and Operation Control of a Switched-Reluctance Motor Driven Flywheel. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2018. V. 1–1. doi:10.1109/tpel.2018.2814790.
 12. Deng X., Mecrow B. Design and comparative evaluation of converter topologies for six-phase switched reluctance motor drives. *The Journal of Engineering*. 2019. V. (17), P. 4017–4021. doi:10.1049/joe.2018.8031.
 13. Hu Y., Wang T., Ding W. Performance evaluation on a novel power converter with minimum number of switches for a six-phase switched reluctance motor. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2018. V. 1–1. doi:10.1109/tie.2018.2840480.
 14. Ellabban O., Abu-Rub H. Switched reluctance motor converter topologies: A review. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*. 2014. P. 840–846. doi:10.1109/icit.2014.6895009.
 15. Liu H., Loh, P. C., Wang X., Yang Y., Wang W. & Xu D. Droop Control With Improved Disturbance Adaption for a PV System With Two Power Conversion Stages. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2016. V. 63(10). P. 6073–6085. doi:10.1109/tie.2016.2580525.
 16. Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O., Prokhorova A. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit. *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*. 2016. P. 327–332. doi:10.1109/elnano.2016.7493078.
 17. Ievgen Verbytskyi, Oleksandr Bondarenko, Dmitri Vinnikov. Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding. *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*. Riga. 2017. P. 1–6. doi:10.1109/RTUCON.2017.8124844.
 18. Galkin I., Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D. Modular Self-Balancing Battery Charger Concept for Cost-Effective Power-Assist Wheelchairs, *Energies*. 2019. V. 12. 1526. doi: 10.3390/en12081526.

References (transliterated)

1. Boukoberine M. N., Zhou Z., Benbouzid M. A critical review on unmanned aerial vehicles power supply and energy management: Solutions, strategies, and prospects, *Applied Energy*, 2019, V. 255, doi:10.1016/j.apenergy.2019.113823.
2. Laskaris K. I., Kladas A. G. Internal Permanent Magnet Motor Design for Electric Vehicle Drive, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2010, V. 57(1), p. 138–145, doi:10.1109/tie.2009.2033086.
3. Widmer J. D., Martin R., Kimiabeigi, M. Electric vehicle traction motors without rare earth magnets, *Sustainable Materials and Technologies*, 2015, 3, p. 7–13, doi:10.1016/j.susmat.2015.02.001.
4. Ramu Krishnan. *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*, CRC Press, 2010. 611 p., doi: 10.1201/9781420014235.
5. Chiba A. & Kiyota K. Review of research and development of switched reluctance motor for hybrid electrical vehicle, *IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis (WEMDCD)*, 2015, p. 127–131, doi:10.1109/wemdc.2015.7194520.
6. Jiang C., Chau K. T., Liu C. & Han W. Design and Analysis of Wireless Switched Reluctance Motor Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, V. 1–1, doi:10.1109/tie.2018.2829684.
7. Yu Q., Bilgin B., Emadi A. Design considerations of switched reluctance machines with high power density, *IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*, 2016, doi:10.1109/itec.2016.7520226.
8. Kari M. O., Pavliuchenko V. L., Zhuikov V. Y., Verbytskyi Y. V., Yamnenko Y. S. *Електропривод з вентильно-індукторним електроприводом*, [Electric drive with switched-reluctance motor], Опис до патенту на корисну модель України] Description of the utility model patent Ukraine] UA 127633 U, 2018.
9. Deng X., Mecrow B., Gadoue S. & Martin R. A torque ripple minimization method for six-phase switched reluctance motor drives, *XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2016, doi:10.1109/icelmach.2016.7732641.
10. Xue X. D., Cheng K. W. E., Ho S. L. Optimization and Evaluation of Torque-Sharing Functions for Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2009, V. 24(9), p. 2076–2090, doi:10.1109/tpel.2009.2019581.
11. Liaw C.-M., Hu K.-W., Wang J.-C. & Ho C. Y., Development and Operation Control of a Switched-Reluctance Motor Driven Flywheel, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 2018, V. 1–1, doi: 10.1109/tpel.2018.2814790.
12. Deng X., Mecrow B. Design and comparative evaluation of converter topologies for six-phase switched reluctance motor drives, *The Journal of Engineering*, 2019 (17), p. 4017–4021, doi:10.1049/joe.2018.8031.
13. Hu Y., Wang T., Ding W. Performance evaluation on a novel power converter with minimum number of switches for a six-phase switched reluctance motor, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2018, V. 1–1, doi:10.1109/tie.2018.2840480.

14. Ellabban O. & Abu-Rub H. Switched reluctance motor converter topologies: A review. *IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2014, p. 840-846, doi:10.1109/icit.2014.6895009.
15. Liu H., Loh, P. C., Wang X., Yang Y., Wang W. & Xu D. Droop Control With Improved Disturbance Adaption for a PV System With Two Power Conversion Stages, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, 63(10), p. 6073–6085, doi:10.1109/tie.2016.2580525.
16. Denisov Y., Gorodny A., Gordienko V., Yershov R., Stepenko S., Kostyrieva O. & Prokhorova A. Switch operation power losses of quasi-resonant pulse converter with parallel resonant circuit, *IEEE 36th International Conference on Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2016, p. 327–332. doi:10.1109/elnano.2016.7493078.
17. Ievgen Verbytskyi, Oleksandr Bondarenko, Dmitri Vinnikov. Multicell-type current regulator based on Cuk converter for resistance welding, *IEEE 58th International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University (RTUCON)*, Riga, 2017, p. 1–6, doi:10.1109/RTUCON.2017.8124844.
18. Galkin I., Blinov A., Verbytskyi I., Zinchenko D. Modular Self-Balancing Battery Charger Concept for Cost-Effective Power-Assist Wheelchairs, *Energies* 2019, V. 12, iss. 1526, doi: 10.3390/en12081526.

Сведения об авторах (About authors)

Лук'янов Микола Олексійович – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент кафедри електронних пристроїв та систем, факультет електроніки, Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-8930-9992; e-mail: zebrahead097@gmail.com

Mykola Lukianov – Department of Electronic Devices and Systems, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-8930-9992; e-mail: zebrahead097@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лук'янов М. О. Вентильно-індукторний двигун з покращеними тяговими характеристиками. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ», 2020. № 2 (4). С. 3–. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.03.

Please cite this article as:

Lukianov M. Switched-reluctance motor with improved traction characteristics. *Bulletin of the National Technical University “KhPI”*. Series: New solutions in modern technology. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2020, no. 2 (4), pp. 3–, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.03.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лукьянов Н. А. Вентильно-индукторный двигатель с улучшенными тяговыми характеристиками. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 3–. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.03.

АННОТАЦІЯ Вентильно-індукторний двигателю завдяки своїм перевагам може використовуватися в транспортних засобах низької та середньої потужності. Однак, через значительні пульсації крутячого моменту, складності електричного драйвера та недостатньої удельної потужності він не є поширеним. В даній статті розглядається структура та характеристики вентильно-індукторного двигателя з С-образними полюсами та електричний драйвер для його контролю для мінімізації недоліків двигателя. В результаті аналізу, запропоновані критерії ефективності, засновані на порівнянні прискорюючої та гальмівної сили, створюваної полюсом статора. Для забезпечення ефективної роботи двигателя гальмівна сила повинна бути мінімальною, а її вплив компенсовано певною формою струму, за рахунок чого сумарна сила та момент залишаються постійними в кожен момент часу. За рахунок вибору оптимального відношення між полюсами статора та ротора забезпечується мінімальне значення гальмівної сили, а вибір оптимальної кількості полюсів дозволяє досягти максимальної сили. За рахунок високочастотного методу формування струму обмотки статора з запропонованою формою, вплив гальмівної сили і, відповідно, пульсації крутячого моменту мінімізовано. При цьому для підвищення ефективності роботи двигателя запропоновано двохсекційну структуру полюсів з використанням додаткових обмоток модуляції амплітуди струму, що додатково дозволяє розподілити потужність між секціями. Формування струму управління обмотками здійснюється поширеним резонансним перетворювачем з м'яким переключенням ключів. Модульна структура електричного драйвера дозволяє використовувати всього чотири резонансні перетворювачі для всього драйвера при одночасній роботі одного полюса статора. В результаті було виявлено, що оптимальною структурою двигателя є $n + 1/n$, так як розміщення полюсів в корпусі ротора дозволяє досягти максимальної сили. Розрахунок вентильно-індукторного двигателя для даної структури з $n=7$ показав зменшення об'єму двигателя в 2,75 рази та підвищення потужності в 6 разів за порівнянням з популярним тяговим асинхронним двигателем. Моделювання електричного драйвера в середовищі Matlab Simulink показало, що пульсації крутячого моменту при даному методі формування струму обмотки статора становлять близько 3,25% і можуть варіюватися в залежності від кількості періодів модулюючого сигналу.

Ключові слова: вентильно-індукторний двигателю; модульний електричний драйвер; постійний момент; високочастотне управління; резонансний перетворювач

Надійшла (received) 04.05.2020

УДК 621.17

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.04

ПРЕИМУЩЕСТВА ИМПУЛЬСНОГО ПОДВОДА ТЕПЛА ДЛЯ ПОКРЫТИЯ ПЕРЕМЕННЫХ НАГРУЗОК В СИСТЕМАХ ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ

Ф. И. ЛУХТУРА*, В. И. ЦЫГАНОВ

кафедра ПТЭУ и ТС, ГВУЗ «ПГТУ», Мариуполь, УКРАИНА

*e-mail: lukhlena@yandex.ru

АННОТАЦИЯ Рассмотрены практические приложения полученных ранее теоретических результатов по применению импульсного (циклического) подвода теплоты от источника тепла (котла), работающего на тепловую сеть, для покрытия существенно переменных нагрузок системы теплоснабжения. Проведен анализ эффективности работы системы теплоснабжения с различными блоками котельных установок и параметрами систем теплоснабжения при переменных нагрузках на основе анализа разработанной математической динамической модели системы производства и распределения теплоты. Полученная инженерная теория послужила также основой для разработки алгоритмов оптимизации системы при ступенчатом регулировании подвода теплоты источниками тепла путем их перевода на холостой ход, в т. ч. глубоким снижением нагрузки, или с полным их отключением, на переменных режимах работы котельной при покрытии неравномерных графиков ее нагрузок. При этом оценены затраты потребляемой тепловой энергии с целью повышения экономической эффективности и выбора определенного состава оборудования котельной в предлагаемых режимах. Определены, в зависимости от емкости тепловой сети и/или аккумулирующих теплоту устройств, величины потребления теплоты и режимов регулирования, рациональные компоновки котельного оборудования с минимизацией потребления энергоресурсов. Оценены эффективные значения длительности импульсов подачи теплоты агрегатами котельной и паузы между импульсами, а также скважности импульсов, при использовании различных блоков котельного оборудования. При этом важной характеристикой надежности системы теплоснабжения является частота циклов, лимитирующая число регламентированных включений котлов соответствующей мощности в связи с наличием усталостных напряжений в них. Показано существенное влияние перечисленных факторов и указанных функциональных параметров на характеристики импульсного подключения источников тепла и интенсивность подачи энергоносителя при переменных нагрузках. Характерно, что при сравнении различных режимов импульсной подачи (с холостым ходом и без) более предпочтительным режимом является режим с полным отключением источников теплоты от тепловой сети. При этом эффективность растет с ростом числа эксплуатируемых агрегатов и достигает 10% по сравнению с традиционным способом подвода теплоты для покрытия переменных нагрузок тепловых сетей. Полученные результаты также могут быть полезны для решения оптимизационных задач при работе индивидуальной котельной на переменных режимах при покрытии ее различных, в т. ч. суточных, графиков нагрузок. Данный подход и представленные решения могут быть распространены на любые другие источники теплоты, использующие в качестве рабочей среды, как жидкость, так и газ (пар), для покрытия неравномерных соответствующих тепловых нагрузок.

Ключевые слова: графики нагрузок; источник тепла (котел); рабочая среда; энергия; аккумулятор; импульсное (циклическое, ступенчатое) регулирование; эффективность

ADVANTAGE OF PULSE HEAT SUPPLY FOR COVERING VARIABLE LOADS IN HEAT SUPPLY SYSTEMS

F. LUKHTURA, V. TSIGANOV

Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, SHEE "PSTU", Mariupol, UKRAINE

ABSTRACT Practical applications of previously obtained theoretical results on the use of pulsed (cyclic) heat supply from a heat source (boiler) operating on a heating network to cover substantially variable loads of a heat supply system are considered. The analysis of the efficiency of a heat supply system with various blocks of boiler plants and the parameters of heat supply systems at variable loads is carried out based on the analysis of the developed mathematical dynamic model of the heat production and distribution system. The obtained engineering theory also served as the basis for the development of system optimization algorithms for the stepwise regulation of heat supply by heat sources by switching them to idle speed, including a deep reduction in the load, or with their complete shutdown, at variable modes of the boiler room while covering uneven schedules of its loads. At the same time, the costs of consumed thermal energy were estimated in order to increase economic efficiency and select a certain composition of the boiler equipment in the proposed modes. Depending on the capacity of the heating network and / or heat storage devices, the values of heat consumption and regulation modes, rational layout of boiler equipment with minimization of energy consumption are determined. The effective values of the duration of the heat supply pulses by the boiler units and the pause between pulses, as well as the duty cycle of the pulses using various blocks of boiler equipment, are estimated. An important characteristic of the reliability of the heat supply system is the frequency of cycles that limit the number of regulated starts of boilers of the corresponding capacity due to the presence of fatigue stresses in them. The significant influence of the listed factors and the specified functional parameters on the characteristics of the pulsed connection of heat sources and the intensity of the energy supply at variable loads is shown. It is characteristic that when comparing different modes of pulsed supply (with and without idle), the more preferable mode is the mode with the heat sources completely disconnected from the heating network. At the same time, efficiency increases with the number of

operating units and reaches 10% compared to the traditional method of supplying heat to cover the variable loads of heating networks. The results obtained can also be useful for solving optimization problems when operating an individual boiler house in variable modes when covering it with various ones, including annual, load schedules. This approach and the presented solutions can be extended to any other sources of heat, using both liquid and gas (steam) as a working medium, to cover the uneven corresponding thermal loads.

Keywords: load schedules; heat source (boiler); working medium; energy; battery; pulse (cyclic, step) regulation; efficiency

Введение

Актуальность рассматриваемых в статье вопросов определяется возросшим значением энергоэффективности и оптимизации систем теплоснабжения (СТ) для подачи и распределения рабочей среды (теплоносителя), требующие развития действующих и создания новых высокоэффективных систем для промышленных предприятий и коммунального хозяйства, которым в современных условиях отечественные хозяйствующие субъекты и общество в целом отводят первостепенную роль. В связи с ростом цен на топливо и, как следствие, увеличением издержек при работе источника тепла – тепловых станций (ТС), в т.ч. котельных, связанных с оплатой топлива, вопрос эффективного и рационального использования энергетических ресурсов на ТС становится сверх актуальным. К тому же, повышение энергоэффективности ТС является перспективным направлением снижения энергопотребления. Для снижения энергоемкости большое значение придается оптимизации системы теплоснабжения и ТС в целом, т.к. тепловые станции, как один из основных структурных элементов СТ, во многом определяют ее эксплуатационные и экономические показатели работы.

В работах [1–13] представлены решения многообразных задач, связанных с совершенствованием работы как котлов и котельного оборудования ТС [1–12], так и их тепловых схем для производства и транспорта тепла [13,15]. Вследствие изменения объемов производства тепла по мере суточного потребления, агрегаты (источники тепла) тепловой станции (ТС) и система теплоснабжения (тепловые сети и др.) часто эксплуатируются в неоптимальных режимах с пониженным КПД, что может приводить к существенному перерасходу топлива.

Проведенный анализ существующей практики совершенствования системы теплоснабжения в целом позволил выявить ее некоторые недостатки:

- в существующих инженерных инструментальных элементах системы теплоснабжения (котельная, тепловая схема, тепловая сеть, потребитель) рассматриваются в основном по отдельности, без учета взаимного влияния ТС и тепловых потребителей, обусловленного наличием технологических связей.

- недостаточная информированность существующих математических моделей относительно каждого агрегата (источника тепла) и оптимального соотношения их состава в случае регулирования переменной нагрузки, в т.ч. пиковой.

Кроме того, по существующим оценкам, до 10÷15% энергозатрат систем теплоснабжения могут быть снижены за счет изменения только состава оборудования ТС и способов управления ими. Одним из эффективных путей экономии энергоресурсов при существующих переменных нагрузках является оптимизация состава и режимов работы оборудования. Она может производиться по следующим направлениям:

- выбор оптимального числа эксплуатируемых агрегатов в любой момент времени;
- оптимального распределения нагрузки между ними;
- оптимизация работы установок с использованием циклического (ступенчатого) их подключения при работе на тепловую сеть [1,11] и др.
- рациональное построение системы теплоснабжения для покрытия переменных нагрузок ТС.

Система производства и распределения тепла (с комплексом энергетического оборудования) должна производить столько продукции (тепла) [12], сколько требуют в данный момент потребители, определяющие нагрузку ТС – вырабатываемое в данный момент времени количество тепла. Этим определяются и характер работы источников тепла на отопление, горячее водоснабжение и др. этих систем, и их графики нагрузок - изменение нагрузки во времени. Обычно это изменение или изменение потребляемого топлива во времени представляется графически в зависимости от отрезка времени. Различают суточные, недельные, сезонные (лето, зима) и годовые графики. Они служат для выбора состава оборудования при проектировании тепловых станций, определения текущих и годовых технико-экономических показателей, распределения различных тепловых нагрузок и установления оптимальных режимов работы оборудования. Графики нагрузок, а значит, и графики потребления тепла, и в конечном счете – топлива, отличаются значительной неравномерностью. Объясняется она неодинаковым режимом потребления рабочей среды (продукции ТС) разными группами тепловых потребителей на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение коммунальными хозяйствами, промышленными потребителями и др. Суммарная нагрузка Q непрерывно изменяется, достигая в определенные моменты наибольшей (Q_{max}) и наименьшей (Q_{min}) величины. На этом основании его разбивают на три зоны [12]: пиковая, полупиковая и базовая. В этих условиях вопросы регулирования тепловой нагрузкой, и экономичность ТС имеют большое значение.

Не перечисляя известные методы регулирования тепловой нагрузки, обратим внимание на способ периодического отключения или перевода источника тепла на режим холостого хода, на так называемое цикличное (импульсное) регулирование. Для котлов с цикличным регулированием подачи тепла в систему теплоснабжения при периодическом их отключении такая теория разработана в [1], где проведен теоретический анализ динамики такого импульсного регулирования. В этом случае источники тепла должны оснащаться системой регулирования, обеспечивающей изменение теплопроизводительности путем автоматического перевода их на холостой ход путем снижения до минимума расхода топлива на горелочные устройства. Последние работают в течение контролируемого промежутка времени в режиме «большого» горения и затем циклически переключаются в режим «малого» горения или полностью выключаются. Наглядные практические доказательства преимущества его эффективности при использовании импульсного нагрева теплоносителя в системах теплоснабжения (СТ) зданий, особенно при покрытии переменных нагрузок ТС, в технической литературе, практически отсутствуют.

Цель работы

На основе разработанной ранее физической модели рабочего процесса [1] и ее анализе для установок ТС с цикличным (импульсным) подводом теплоты к системе теплоснабжения представить практическое обоснование эффективности такого подвода тепла при переменных тепловых нагрузках. Разработать оптимальные варианты при выборе состава оборудования ТС (котельной) для покрытия, как базовой части суточного переменного графика ее нагрузок, так и пиковой, для рационального построения системы производства и транспорта тепла и улучшение работы ТС и СТ, в т.ч. для перспективных проектов.

Изложение основного материала

В соответствии с представленной теорией [1] импульсного нагрева рабочей среды в системах теплоснабжения, ниже представлена разработанная на ее основе методика расчета, которая по определенному алгоритму определяет регулировочные характеристики системы теплоснабжения для покрытия годового графика нагрузок на различных возможных ее вариантах работы. В этой методике необходимо определить для каждого режима потребления теплоты продолжительность цикла, фаз нагрева и остывания теплоносителя во время холостого хода или останова генератора теплоты, величину скважности и др.

Так в исследовании [1], при полном отключении оборудования во время паузы, длительность нагрева теплоносителя (импульс

нагрева) – отрезок времени, в течение которого котел (и его горелки) работают при максимальном расходе топлива, можно определить, используя соотношение [1]:

$$\tau_{имп} = \frac{mc}{kF} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{нач}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta} \quad (1)$$

Длительность простоя (пауза) – отрезок времени между двумя последовательными импульсами, в течение которого топливо на горелку котла не подается, и происходит охлаждение теплоносителя вследствие потерь тепла в окружающую среду, определяется как

$$\tau_{паузы} = \frac{mc}{kF} \cdot \frac{1}{\kappa} \cdot \ln \frac{\vartheta_{нач} - \vartheta_0}{\vartheta - \vartheta_0} \quad (2)$$

Тогда период включения τ_{κ} – отрезок времени между началами двух последовательных импульсов, определяется суммой соотношений (6) и (7), а их скважность S равна отношению периода τ_{κ} следования импульсов к длительности импульса $\tau_{имп}$

$$S = \frac{\tau_{\kappa}}{\tau_{имп}} = 1 + \frac{\ln \frac{\vartheta_{нач.паузы} - \vartheta_0}{\vartheta_{кон.паузы} - \vartheta_0}}{\ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{нач.имп}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{кон.имп}}} \quad (3)$$

При этом, $\vartheta_{кон.имп} = \vartheta_{нач.паузы}$, $\vartheta_{нач.имп} = \vartheta_{кон.паузы}$.

Из соотношения для определения периода включения τ_{κ} можно определить величину частоты подвода тепла (импульсов), c^{-1}

$$\omega = \frac{1}{\tau_{\kappa}} = \kappa \frac{kF}{mc} \left[\ln \frac{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{нач.имп}}{\left(\frac{1}{\kappa} \cdot \frac{P}{kF} + \vartheta_0\right) - \vartheta_{кон.имп}} \cdot \frac{\vartheta_{нач.паузы} - \vartheta_0}{\vartheta_{кон.паузы} - \vartheta_0} \right]^{-1} \quad (4)$$

Осредненная величина затраченной тепловой мощности P_{cp} за цикл, определяется, согласно [1], по формуле:

$$P_{cp} = Q_{\kappa} = \frac{P_{max}}{S} = P_{max} \cdot \beta \quad (5)$$

где $\beta = S^{-1}$ – обратная величина скважности импульсов или коэффициент заполнения цикла (коэффициент использования мощности источника тепла) – отношение длительности импульса к периоду включения.

В соотношениях (1) – (5) P – подводимая тепловая мощность; c , ϑ и m – теплоемкость, текущая температура и масса нагреваемого теплоносителя; k – коэффициент теплопередачи; F – суммарная поверхность теплопередачи (поверхность ограждения зданий); ϑ_0 – температура окружающей среды (в помещении или за ее пределами); κ –

коэффициент пропорциональности температуры воздуха внутри помещения температуре теплоносителя, зависящий от параметров теплообмена между теплоносителем и атмосферой внутреннего помещения, а также между внутренним помещением жилого строения и окружающей средой.

Для доказательства эффективности практического применения режима импульсного нагрева рабочей среды при покрытии переменного графика нагрузок в качестве конкретного примера рассмотрена система теплоснабжения одного из районов г. Мариуполя (Украина).

Годовой график нагрузки системы теплоснабжения приведен на рис. 1. При этом график нагрузки сведен к линейно-ступенчатому, где число годовых часов разделены на 12 равных интервалов (месяцев) согласно методике [12]. Величина нагрузки (сплошная полужирная линия) на каждом интервале указаны в поле рисунка в МВт. Здесь же поинтервально нанесена по вертикали равномерная разбивка (светлые линии) по мощности в 1 МВт.

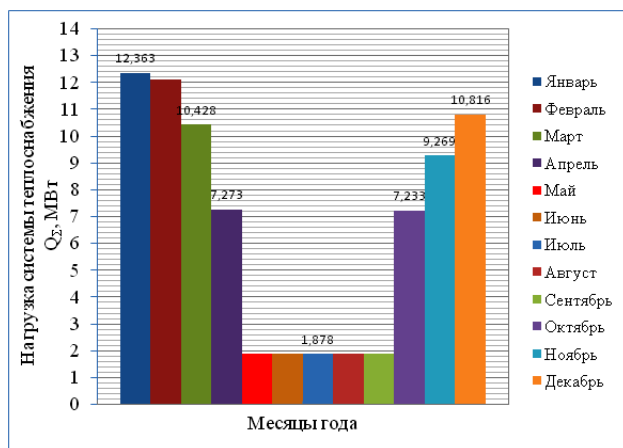


Рис. 1 – Годовой график теплового потребления жилого района по месяцам

При расчете и построении графиков нагрузки, согласно методике [12], системы теплоснабжения (рис. 1) расчётная температура наружного воздуха для систем отопления принята равной $t_o = -23^{\circ}\text{C}$ (условие района г. Мариуполя). Численность населения района $m = 5770$ чел. Общая площадь жилого здания на одного жителя $f_{\text{общ}} = 13,56 \text{ м}^2/\text{чел.}$ [12]. Средняя за отопительный период норма расхода горячей воды на одного жителя в сутки $a = 115 \text{ л/сутки}$. Расчётные нагрузки на отопление жилых и общественных зданий района определяли по [12] как:

$$Q_{o \max} = q_o \cdot A(1+K_1), \quad (6)$$

где q_o – величина удельного показателя теплового потока на отопление жилых зданий, принята равной $158,05 \text{ Вт/м}^2$ при $t_o = -23^{\circ}\text{C}$; A – общая площадь жилых зданий рассматриваемого района ($A = f_{\text{общ}} m$); $K_1=0,25$ – коэффициент, учитывающий наличие общественных зданий.

Максимальный тепловой поток на вентиляцию общественных зданий района:

$$Q_{v \max} = q_o \cdot A \cdot K_1 \cdot K_2, \quad (7)$$

где $K_2=0,4$ – доля вентиляционной нагрузки.

Среднечасовой тепловой поток на горячее водоснабжение жилых и общественных зданий:

$$Q_{гв} = q_{гв} \cdot m. \quad (8)$$

Укрупнённый показатель теплового потока на горячее водоснабжение $q_{гв}$ с учётом общественных зданий при норме на одного жителя $a = 115 \text{ л/сутки}$ составляет при этом 407 Вт .

При принятых внешних и внутренних параметрах системы теплоснабжения расчётные нагрузки составили: на отопление – $Q_{o \max} = 15,457 \text{ МВт}$, вентиляцию – $Q_{v \max} = 1,236 \text{ МВт}$, на горячее водоснабжение – $Q_{гв} = 2,348 \text{ МВт}$. Суммарная максимальная нагрузка ($Q_{\Sigma} = 19,041 \text{ МВт}$) по району определена суммированием расчётных тепловых потоков на отопление, вентиляцию и горячее водоснабжение:

$$Q_{\Sigma} = Q_{o \max} + Q_{v \max} + Q_{гв}. \quad (9)$$

В соответствии с последней для покрытия расчетной (максимальной зимней) нагрузки выбран разный состав источника тепла (котельной) системы теплоснабжения (без учета резервного котла):

- 1) ТВГ-4 (4,65 МВт) – 5 котлов.
- 2) КВГМ-10 (11,6 МВт) – 2 котла.
- 3) КВ-Р-23,26-150 (23,26 МВт) – 1 котёл.
- 4) Двухходовый котёл ELLPREX 5000 (5 МВт) – 4 котла.
- 5) Двухходовый котёл ELLPREX 7000 (7 МВт) – 3 котла.

Первые три варианта котельной имеют одинаковую суммарную тепловую мощность.

Для построения годового графика теплового потребления по месяцам (рис.1) были использованы среднечасовые температуры наружного воздуха г. Мариуполя [14]. Часовые расходы теплоты на отопление и вентиляцию для каждого месяца со среднечасовой температурой ниже $+8^{\circ}\text{C}$ составили:

$$Q_{o \text{ ср}} = Q_{o \max} \frac{t_{op} - t_{\text{ср.мес}}}{t_{op} - t_o}, \quad (10)$$

$$Q_{v \text{ ср}} = Q_{v \max} \frac{t_{op} - t_{\text{ср.мес}}}{t_{op} - t_o}, \quad (11)$$

где t_{op} и t_o – расчётные температуры воздуха внутри помещений и в окружающей среде.

Среднечасовой расход теплоты на горячее водоснабжение $Q_{гв}^n$ для неотапливаемого периода

$$Q_{гв}^n = \beta Q_{гв} \frac{55 - t_x^n}{55 - t_x}, \quad (12)$$

где t_x , t_x^n – расчётные температуры холодной воды соответственно в зимний и летний период.

Суммарные месячные расходы теплоты в отопительный период

$$Q_{\Sigma}^{cp} = Q_{o\,cp} + Q_{в\,cp} + Q_{гв}^{\eta} \quad (13)$$

Для неотапливаемого периода суммарный расход теплоты равен среднечасовому расходу теплоты на горячее водоснабжение ($Q_{гв}^{\eta}=1,878$ МВт). Результаты расчётов по (6) – (13) сведены в табл. 1, на основании которых и построен годовой график теплового потребления по месяцам (рис. 1).

Таблица 1 – Среднечасовые расходы теплоты по месяцам года

Расход теплоты, МВт	Среднемесячная температура наружного воздуха, $t_{ср.мес}$ °C					
	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь
	-6,6	-6	-1,8	5,9	11,9	16,1
Q_o	9,274	9,048	7,464	4,561	-	-
$Q_{в}$	0,741	0,723	0,596	0,364	-	-
$Q_{гв}$	2,348	2,348	2,348	2,348	1,878	1,878
Q_{Σ}	12,363	12,119	10,428	7,273	1,878	1,878

Расход теплоты, МВт	Среднемесячная температура наружного воздуха, $t_{ср.мес}$ °C					
	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь
	18,2	17,3	12,2	6	1	-2,8
Q_o	-	-	-	4,524	6,409	7,841
$Q_{в}$	-	-	-	0,361	0,512	0,627
$Q_{гв}$	1,878	1,878	1,878	2,348	2,348	2,348
Q_{Σ}	1,878	1,878	1,878	7,233	9,269	10,82

Обсуждение результатов

Для демонстрации преимуществ импульсного нагрева теплоносителя для выбранных вариаций составов котлов на котельной и для простоты и наглядности представляемых результатов соотношения (6) – (8) приведены к линейному виду разложением в ряд логарифмические функции в этих выражениях и ограничиваясь одним его членом. При этом формула (3) для определения скважности S приобретает вид:

$$S = \frac{\tau_{\eta}}{\tau_{имп}} = \frac{P}{Q_{пот}^{нач.паузы}} + \left(1 - \frac{Q_{пот}^{нач.имп.}}{Q_{пот}^{нач.паузы}}\right) = \frac{1}{q_{пот}^{нач.паузы}} + \left(1 - \frac{q_{пот}^{нач.имп.}}{q_{пот}^{нач.паузы}}\right). \quad (14)$$

Продолжительность импульса и паузы соответственно:

$$\tau_{имп} = \frac{T}{\kappa} \cdot \frac{\left(1 - \frac{q_{пот}^{нач.имп.}}{q_{пот}^{нач.паузы}}\right)}{S-1}, \quad \tau_{паузы} = \frac{T}{\kappa} \cdot \left(1 - \frac{q_{пот}^{нач.имп.}}{q_{пот}^{нач.паузы}}\right). \quad (15)$$

Длительность цикла и частота:

$$\tau_{\eta} = \frac{T}{\kappa} \cdot \left(1 - \frac{q_{пот}^{нач.имп.}}{q_{пот}^{нач.паузы}}\right) \frac{S}{S-1}, \quad \omega_{цикла} = \frac{1}{\tau_{\eta}}. \quad (16)$$

Здесь $q_{пот}^{кон.паузы} = q_{пот}^{нач.имп.}$, где $q_{пот} = \frac{Q_{пот}^{нач.паузы}}{P}$

- относительный параметр потребления тепла в начале паузы.

Тепло Q_{η} , отданное в цикле потребителям, определяется по формуле:

$$Q_{\eta} = \frac{P}{S} = P \cdot \beta = Q_{пот}^{нач.паузы} \left[1 - \beta \cdot \left(1 - \frac{q_{пот}^{нач.имп.}}{q_{пот}^{нач.паузы}}\right)\right]. \quad (17)$$

Из (14) вытекает важное следствие:

$$\frac{1}{P_{ср}} = \frac{1}{Q_{\eta}} = \frac{S}{P} = \frac{1}{Q_{пот}^{нач.паузы}} + \frac{1}{P} \left(1 - \frac{Q_{пот}^{нач.имп.}}{Q_{пот}^{нач.паузы}}\right). \quad (18)$$

Как видно из соотношения (18), с ростом мощности подвода тепла P к системе теплоснабжения увеличивается затраченная тепловая мощность за цикл $Q_{цикл} = P_{ср}$ при всех остальных неизменных параметрах.

При решении поставленной задачи были приняты следующие основные допущения:

1. КПД котла при изменении нагрузки потребления и длительности его эксплуатации не изменяется, и им пренебрегаем.

2. Котлы должны быть оснащены системой регулирования, обеспечивающей изменение производительности котла от 0 до 100%, при использовании ступенчатого (циклического) регулирования, путем автоматического перевода его на пониженные нагрузки, или выведены из работы.

Расчёты по представленному алгоритму проведены для полученного выше разного состава оборудования источника тепла (котельной) с различными характеристиками системы теплоснабжения, параметры системы изменялись в

диапазоне $\frac{T}{\kappa} = \frac{mc}{\kappa \cdot kF} = 5 \div 20$ с диапазоном ее

настройки $\bar{q} = \frac{q_{пот}^{нач.имп.}}{q_{пот}^{нач.паузы}} = 0,9$. Некоторые данные

результатов приведены в табл. 2, 3 и на рис. 2.

В табл. 2 и 3 представлены данные из расчета регулировочных характеристик системы теплоснабжения, на основании упрощенных соотношений (14) – (17), полученные при работе в импульсном режиме соответственно 5-ти котлов с суммарной мощностью (23,25МВт), и от 1 до 3 котлов ТВГ-4 с единичной тепловой мощностью 4,65 МВт. Работа последних осуществлялась в соответствии с графиком годовой нагрузки СТ (табл.1), а количество работающих котлов z при покрытии соответствующей нагрузки изменялось. Здесь же представлены сравнительные данные производства и/или

потребления тепловой энергии при циклической работе 5, и от 1 до 3 котлов ТВГ-4 с полным их отключением.

Таблица 2 – Регулировочные характеристики системы теплоснабжения при работе 5 котлов с суммарной мощностью (23,25МВт)

Расчетный параметр	Номер периода (месяц года)							
	1	2	3	4	5-9	10	11	12
Q_{Σ} , МВт	12,3	12,1	10,4	7,2	1,88	7,2	9,2	10,8
$q_{\text{ном}} = Q_{\text{ном}}/P_{\text{макс}}$	0,53	0,52	0,45	0,31	0,08	0,31	0,40	0,46
$\tau_{\text{имп}}$, сек	2,02	1,96	1,52	0,86	0,17	0,86	1,25	1,57
$\tau_{\text{паузы}}$, сек	2	2	2	2	2	2	2	2
$\tau_{\text{ц}}$, сек	4,02	3,96	3,52	2,86	2,17	2,86	3,25	3,57
Частота ω , с ⁻¹	0,25	0,25	0,28	0,35	0,46	0,35	0,31	0,28
S	1,99	2,02	2,32	3,33	12,6	3,33	2,6	2,27
$Q_{\text{ц}}$, МВт	11,68	11,51	10,02	6,98	1,85	6,98	8,94	10,24
Δt , час	720	720	720	720	720	720	720	720
N_i , ГДж·10 ⁻³	30,27	29,83	25,97	18,09	4,8	18,09	23,17	26,54
$N_{\text{трад}}$, ГДж·10 ⁻³	31,9	31,4	27,0	18,7	4,873	18,7	23,8	28,0
Экономия тепла	$\frac{\sum_{i=1}^{12} N_{i \text{ трад}} - \sum_{i=1}^{12} N_i}{\sum_{i=1}^{12} N_{i \text{ трад}}} \cdot 100\% = 3,88\%$							

Таблица 3 – Регулировочные характеристики системы теплоснабжения при работе от $z=1$ до 3 котлов

Расчетный параметр	Номер периода (месяц года)							
	1	2	3	4	5-9	10	11	12
z	3	3	3	2	1	2	2	3
Q_{Σ} , МВт	12,3	12,1	10,4	7,2	1,88	7,2	9,2	10,8
$q_{\text{ном}} = Q_{\text{ном}}/P_{\text{макс}}$	0,88	0,87	0,75	0,77	0,39	0,77	0,99	0,75
$\tau_{\text{имп}}$, сек	8,33	8	4,65	5,0	1,2	5,0	18,18	4,65
$\tau_{\text{паузы}}$, сек	2	2	2	2	2	2	2	2
$\tau_{\text{ц}}$, сек	10,33	10	6,65	7,0	3,2	7,0	20,18	6,65
Частота ω , с ⁻¹	0,1	0,1	0,15	0,14	0,31	0,14	0,05	0,15
S	1,24	1,25	1,43	1,4	2,66	1,4	1,11	1,43
$Q_{\text{ц}}$, МВт	11,25	11,16	9,76	6,64	1,75	6,64	8,38	9,76
Δt , час	720	720	720	720	720	720	720	720
N_i , ГДж·10 ⁻³	29,08	28,93	25,3	17,21	4,54	17,2	21,72	25,3
$N_{\text{трад}}$, ГДж·10 ⁻³	31,9	31,4	27,0	18,7	4,873	18,7	23,8	28,0
Экономия тепла	$\frac{\sum_{i=1}^{12} N_{i \text{ трад}} - \sum_{i=1}^{12} N_i}{\sum_{i=1}^{12} N_{i \text{ трад}}} \cdot 100\% = 8,06\%$							

Сравнительный график производства и/или потребления для этих же режимов (табл. 2, 3) и дополнительно для режимов работы с 4 котлами ТВГ (1 в резерве), 3 (2 в резерве) представлены на рис. 2.

Из полученных результатов видно, что более выгодны режимы всех вариантов с импульсной подачей и полным отключением котлов.

Наименьшая величина потребления ($187,44 \cdot 10^3$ ГДж) в сравнении с остальными вариантами была затрачена при работе от 1 до 3 котлов, при этом уменьшается частота циклов, что полностью соответствует результатам [1]. Для сравнения, работа ТС по традиционному способу нагрева теплоносителя приводит к суммарной потребляемой тепловой энергии $203,87 \cdot 10^3$ ГДж. При этом снижение производства и потребления тепловой энергии, по сравнению с традиционным способом подвода тепла, составляет до $7 \div 10\%$ (в среднем около 8%), что существенно.

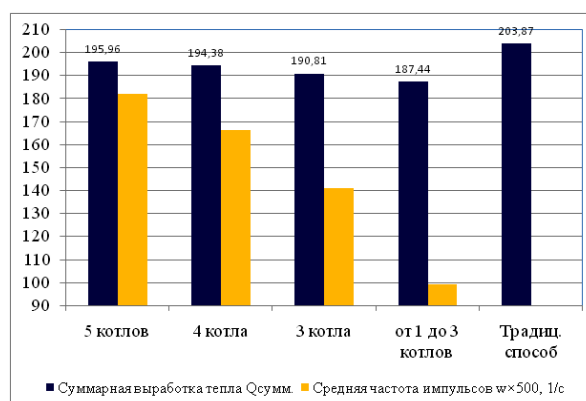


Рис. 2 – Сравнительный анализ годового производства (или потребления) тепловой энергии при работе 1÷3, 3, 4 и 5 котлов на импульсном режиме с полным их отключением

Таким образом, покрытие годового графика нагрузок СТ более выгодно осуществлять с использованием импульсного режима. Отрицательным моментом такого регулирования может быть лимитирование этого процесса числом «останова – пуска» в связи с возникновением усталостных напряжений в оборудовании источника тепла в этом случае. Этот момент, возможно, может быть обойден подбором параметрических характеристик импульсного регулирования.

В заключении можно отметить, что полученные результаты с успехом могут использоваться техническими работниками при выборе оптимальной эксплуатационной схемы работы источников тепла (котлов) для покрытия графиков нагрузок в короткие сроки без использования сложных вычислительных программных комплексов. Такой подход позволяет минимизировать средний удельный расход тепловой энергии и др. Кроме того, эту методику можно использовать для оптимизации работы ТС при покрытии ею тепловой нагрузки в любой момент времени, в т.ч. суточных, сезонных и др.

Выводы

Представлено практическое обоснование эффективности применения импульсного подвода тепла при переменных тепловых нагрузках. Разработаны оптимальные варианты при выборе состава оборудования ТС (котельной) для покрытия, как базовой части суточного переменного графика ее нагрузок, так и пиковой, для рационального построения системы производства и транспорта тепла и улучшения работы ТС.

Список литературы

1. Лухтура Ф. И., Цыганов В. И. О применении импульсного подвода тепла в системах теплоснабжения. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2018. № 45(1321). С.32–40. doi:10.20998/2413-4295.2018.
2. Кнорре Г.Ф. [и др.]. *Теория топочных процессов.* М.-Л.: Энергия, 1966. 491 с.
3. Кацнельсон Б. Д., Тарakanовский А. А. Сжигание топлива в пульсирующем потоке. *Теория и практика пульсационного горения:* Тр. ЦКТИ. Л.: 1965. Вып. 64. С. 3–7.
4. Pachaiyappan R., Dasa Prakash J. Improving the boiler efficiency by optimizing the combustion air. *Applied Mechanics and Materials.* 2015. V. 787. P. 238–242. doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.787.238.
5. Mallikarjuna V., Jashuva N., Rama Bhupal Reddy B. Improving boiler efficiency by using air preheater. *International journal of advanced research in engineering and applied sciences.* 2014. V. 3. № 2. P. 11-24.
6. Ghritlahre H., Pratap Singh T. Effect of Excess Air on 30 TPH AFBC Boilers on dry Flue Gas Losses and its Efficiency. *International Journal of Research in Advent Technology.* 2014. V. 2. № 6. P. 19–23.
7. Abramovskikh A. A., Ulyanova U. A., Lavrinenko S. V., Matveeva A. A., Malishev D. Modernisation of boiler unit automation system at acting power station. *MATEC Web of Conferences* 91, 01002. 2017. doi: 10.1051/mateconf/20179101002
8. Hu L., Lv Y., Tang K., Richards G. An Improved Methodology for Pulse Combustion with Programmable Timing Sequence Used in Reheating Furnaces. *ISIJ International.* 2017. V. 57. № 12. P. 2266–2268. doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-020.
9. Таймаров М. А., Шарипов М. Р. Котёл пульсирующего горения природных и пиролизных газов. *Вестник Казанского технологического университета.* 2013. Т. 16. № 21. С. 133–135.
10. Синицын А. А. Исследование особенностей работы котла, основанного на пульсирующем горении газообразного топлива. *Нефтегазовое дело.* 2006. № 2. С. 1–13.
11. Дегтярь А. Б., Панферов В. И. Построение алгоритма импульсного отопления зданий и исследование режимов его работы. *Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника.* 2008. Вып. 8. № 17(117). С. 41–44.
12. Соколов Е. Я. *Теплофикация и тепловые сети: учебник для вузов.* М.: Изд-во МЭИ, 1999. 472 с.
13. Лухтура Ф. И., Цыганов В. И. О применении циклического режима подключения аккумуляторов

теплоты в системах теплоснабжения. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* Харьков: НТУ «ХПИ». 2019. № 2. С. 35–42. doi:10.20998/2413-4295.2019.02.05.

14. Климатический график. URL: <https://ru.climate-data.org/европа/украина/донецкая-область/мариуполь-619/> (дата обращения: 03.06.2019).
15. Webb J. Improvising innovation in UK urban district heating: the convergence of social and environmental agendas in Aberdeen. *Energy Policy.* 2015. № 78. P. 265–272. doi:10.1016/j.enpol.2014.12.003.

References (transliterated)

1. Lukhtura F., Tsiganov V. On the use of pulse heat in a heat supply system. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* Kharkiv: NTU "KhPI", 2018, no. 45 (1321), p. 32–40, doi:10.20998/2413-4295.2018.
2. Knorre G. F., Arefev K. M., Blokh A. G. *Teoriya topochnykh protsessov [The theory of furnace processes].* Moscow-Leningrad, Energia Publ., 1966, 491 p.
3. Katsnel'son B. D., Tarakanovsky A. A. Szhiganiye topliva v pul'siruyushchem potoke [Combustion of fuel in pulsating flow]. *Teoriya i praktika pul'satsionnogo gorennya: Tr. TSKTI [Theory and practice of pulsating combustion: Works of CKTI],* 1965, Iss. 64, p. 3–7.
4. Pachaiyappan R., Dasa Prakash J. Improving the boiler efficiency by optimizing the combustion air. *Applied Mechanics and Materials,* 2015, V. 787, p. 238–242, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.787.238.
5. Mallikarjuna V., Jashuva N., Rama Bhupal Reddy B. Improving boiler efficiency by using air preheater. *International journal of advanced research in engineering and applied sciences,* 2014, V. 3, no 2, p. 11-24.
6. Ghritlahre H., Pratap Singh T. Effect of Excess Air on 30 TPH AFBC Boilers on dry Flue Gas Losses and its Efficiency. *International Journal of Research in Advent Technology,* 2014, V. 2, no. 6, p. 19-23.
7. Abramovskikh A. A., Ulyanova U. A., Lavrinenko S. V., Matveeva A. A., Malishev D. Modernisation of boiler unit automation system at acting power station. *MATEC Web of Conferences* 91, 01002, 2017, doi: 10.1051/mateconf/20179101002.
8. Hu L., Lv Y., Tang K., Richards G. An Improved Methodology for Pulse Combustion with Programmable Timing Sequence Used in Reheating Furnaces. *ISIJ International,* 2017, V. 57, no. 12, p. 2266-2268, doi: 10.2355/isijinternational.ISIJINT-2017-020.
9. Taymarov M. A., Sharipov M. R. Kotol pul'siruyushchego gorennya prirodnykh i piroliznykh gazov [Boiler of pulsating combustion of natural and pyrolysis gases]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta [Bulletin of Kazan Technological University],* 2013, V. 16, no. 21, p. 133–135.
10. Sinitsyn A. A. Issledovaniye osobennostey raboty kotla, osnovannogo na pul'siruyushchem gorenii gazoobraznogo topliva [Investigation of the peculiarities of the operation of the boiler based on the pulsating combustion of gaseous fuels]. *Neftegazovoye delo [Oil and Gas Business],* 2006, no 2, p. 1–13.
11. Degtyar' A. B., Panferov V. I. Postroyeniye algoritma impul'snogo otopleniya zdaniy i issledovaniye rezhimov yego raboty [Construction of an algorithm for pulsed heating of buildings and study of its operating modes]. *Vestnik Iuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya*

- «Komp'yuternyye tekhnologii, upravleniye, radioelektronika» [Bulletin of the South Ural State University. Series: Computer Technologies, Automatic Control & Radioelectronics], 2008, V. 8, no. 17(117), p. 41–44.
12. Sokolov Ye. Ya. *Teplofikatsiya i teplovyye seti: uchebnik dlya vuzov* [Heating and heating networks: a textbook for universities]. Moscow, Publishing house of the Moscow Power Engineering Institute Publ., 1999. 472 p.
13. Lukhtura F., Tsiganov V. On application of the cycle mode of connecting heat batteries in heat supply systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv: NTU "KhPI", 2019, no. 2, p. 35–42, doi:10.20998/2413-4295.2019.02.05.
14. Climate graph. Available at: <https://ru.climate-data.org/европа/украина/донецкая-область/мариуполь-619/> (accessed 03.06.2020)
15. Webb J. Improvising innovation in UK urban district heating: the convergence of social and environmental agendas in Aberdeen, *Energy Policy*, 2015, no 78, p. 265–272, doi:10.1016/j.enpol.2014.12.003.

Сведения об авторах (About authors)

Лухтура Федор Иванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина; e-mail: lukhelena@yandex.ru

Fedor Lukhtura – Senior Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment "Priazovsky State Technical University", Mariupol, Ukraine; e-mail: lukhelena@yandex.ru

Цыганов Владимир Иванович – Государственное высшее учебное заведение «Приазовский государственный технический университет», ст. преподаватель кафедры промышленных теплоэнергетических установок и теплоснабжения; г. Мариуполь, Украина.

Vladimir Tsiganov – Senior Lecturer, Department of Industrial Heat and Power Plants and Heat Supply, State higher educational establishment "Priazovsky State Technical University", Mariupol, Ukraine.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Лухтура Ф. И., Цыганов В. И. Преимущества импульсного подвода тепла для покрытия переменных нагрузок в системах теплоснабжения. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 30-3 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.04.

Please cite this article as:

Lukhtura F., Tsiganov V. Advantage of pulse heat supply for covering variable loads in heat supply systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 30-3 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.04.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Лухтура Ф. І., Циганов В. І. Переваги імпульсного підведення тепла для покриття змінних навантажень в системах тепlopостачання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 30-3 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.04.

АНОТАЦІЯ Розглянуто практичне використання отриманих раніше теоретичних результатів із застосування імпульсного (циклічного) підведення теплоти від джерела тепла (котла), що працює на теплову мережу, для покриття суттєво змінних навантажень системи тепlopостачання. Проведено аналіз ефективності роботи системи тепlopостачання з різними блоками котельних установок і параметрами систем тепlopостачання при змінних навантаженнях на основі аналізу розробленої математичної динамічної моделі системи виробництва і розподілу теплоти. Отримана інженерна теорія послужила також основою для розробки алгоритмів оптимізації системи при ступінчастому регулюванні підведення теплоти джерелами тепла шляхом їх переведення на холостий хід, в т.ч. глибоким зниженням навантаження, або з повним їх вимиканням, на змінних режимах роботи котельні при покритті нерівномірних графіків її навантажень. При цьому оцінені витрати споживаної теплової енергії з метою підвищення економічної ефективності та вибору певного складу обладнання котельні в запропонованих режимах. Визначено, в залежності від ємності теплової мережі та/або акумулюючих теплоту пристроїв, величини споживання теплоти і режимів регулювання, раціональні компоновки котельного обладнання з мінімізацією споживання енергоресурсів. Оцінені ефективні значення тривалості імпульсів подачі теплоти агрегатами котельні і паузи між імпульсами, а також сквапності імпульсів, при використанні різних блоків котельного обладнання. При цьому важливою характеристикою надійності системи тепlopостачання є частота циклів, що лімітують кількість регламентованих включень котлів відповідної потужності в зв'язку з наявністю втомних напружень в них. Показано суттєвий вплив перерахованих факторів і зазначених функціональних параметрів на характеристики імпульсного підключення джерел тепла і інтенсивність подачі енергоносія при змінних навантаженнях. Характерно, що при порівнянні різних режимів імпульсної подачі (з холостим ходом і без) кращим режимом є режим з повним відключенням джерел теплоти від теплової мережі. При цьому ефективність зростає з ростом числа експлуатованих агрегатів і досягає близько 10% в порівнянні з традиційним способом підведення теплоти для покриття змінних навантажень теплових мереж. Отримані результати також можуть бути корисні для вирішення оптимізаційних завдань при роботі індивідуальної котельні на змінних режимах при покритті її різних, в т.ч. річних, графіків навантажень. Даний підхід і представлені рішення можуть бути поширені на будь-які інші джерела теплоти, що використовують у якості робочого середовища, як рідину, так і газ (пар), для покриття нерівномірних відповідних теплових навантажень.

Ключові слова: графіки навантажень; джерело тепла (котел); робоче середовище; енергія; акумулятор; імпульсне (циклічне, ступінчасте) регулювання; ефективність

Поступила (received) 06.05.2020

УДК 621.311

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.05

ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ УСТАНОВОК НА БІОПАЛИВІ

І. В. ПАНТЕЛЄЄВА^{1}, Н. М. ШМАТЬКО², А. В. ГЛУШКО³*¹кафедра фізики, електротехніки і електроенергетики, УІПА, Харків, УКРАЇНА²кафедра менеджменту інноваційного підприємництва та міжнародних економічних відносин, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА³кафедра зварювання, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: shmatko.khpi@gmail.com

АНОТАЦІЯ У всьому світі та в Україні, зокрема, все гостріше постає питання нестачі енергоресурсів, їх дорожнечі, а також забруднення навколишнього середовища шкідливими відходами виробництва електроенергії на теплових електростанціях. Екологи серйозно хвилюються за стан нашої планети при подальшому використанні традиційних джерел енергії. У ситуації, що склалася, на перше місце виходить спосіб отримання енергії за допомогою нетрадиційних і поновлюваних джерел, до яких відноситься і біопаливо. Загальна кількість біологічної сировини в світі значно перевищує запаси класичного органічного палива. Тому стратегія розвитку енергокомплексів багатьох країн світу пов'язана з використанням відновлюваних джерел енергії. Сировиною для виробництва біопалива може бути будь-який вид біологічного матеріалу. У статті проаналізовано можливі види біомаси, приведена класифікація цих видів з точки зору отримання біопалива. Сьогодні обсяг енергії споживаної біомаси складає близько 50 ЕДж в світі і становить близько 10-15% світового споживання первинної енергії. Для використання біоенергетичного потенціалу в довгостроковій перспективі зусилля повинні бути спрямовані на підвищення рівня виходу біомаси та модернізацію сільського господарства, пряме збільшення глобального виробництва продуктів харчування, а значить, і ресурсів для біомаси. Існує багато шляхів перетворення вихідної біомаси в кінцевий продукт у вигляді енергії. Кілька технологій були розроблені та адаптовані, виходячи з різної фізичної природи і хімічного складу вихідної сировини і виду енергії (тепло, енергетика, паливо для транспорту). У статті також розглянуто можливі способи виробництва біопалива і деякі установки для отримання теплової та електричної енергії. Для більш ефективного використання енергії з біомаси сучасні великомасштабні теплові рішення часто поєднуються з виробництвом тепла та електроенергії - когенерації. З цієї позиції розглянуті парогазові установки, в яких встановлюються котли з топками з киплячим шаром. Дуже актуально використання газотурбінних установок на біопаливі, які можуть використовуватися для виробництва електроенергії в години пік в енергосистемі, а також як самостійне автономне джерело енергії для окремих споживачів.

Ключевые слова: біомаса; біопаливо; електрична енергія; енергозберігаючі технології; газотурбінна установка; електропостачання споживачів

ENSURING ENERGY SAVING WHEN USING BIOFUEL INSTALLATIONS

*I. PANTIELIEIEVA¹, N. SHMATKO², A. GLUSHKO³*¹Department of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, UEPA, Kharkiv, UKRAINE²Department of Management of Innovative Entrepreneurship and International Economic Relations, NTU KhPI, Kharkiv, UKRAINE³Department of Welding, NTU KhPI, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT All over the world and in Ukraine, in particular, the issue of lack of energy resources, their high cost, as well as pollution of the environment with hazardous waste from the production of electricity at thermal power plants is becoming more acute. Environmentalists are seriously concerned about the state of our planet with the continued use of traditional energy sources. In the current situation, the first way is to obtain energy from non-traditional and renewable sources, which includes biofuels. The total amount of biological raw materials in the world far exceeds the reserves of conventional fossil fuels. Therefore, the strategy of development of energy complexes in most countries of the world is associated with the use of renewable energy sources. The raw material for the production of biofuels can be any type of biological material. The article analyzes the possible types of biomass, the classification of these species in terms of obtaining biofuels. Today, the amount of energy consumed by biomass is about 50 EJ in the world and is about 10-15% of world primary energy consumption. To use the bioenergy potential in the long run, efforts should be focused on increasing biomass yields and modernizing agriculture, directly increasing global food production, and hence biomass resources. There are many ways to convert the original biomass into the final product in the form of energy. Several technologies have been developed and adapted based on the different physical nature and chemical composition of raw materials and energy (heat, energy, transport fuel). The article also considers possible methods of biofuel production and some installations for heat and electricity. For more efficient use of energy from biomass, modern large-scale thermal solutions are often combined with the production of heat and electricity - cogeneration. From this position the steam-gas installations in which boilers with fire chambers with a fluidized bed are established are considered. It is very important to use gas turbines on biofuels, which can be used to produce electricity during peak hours in the power system, as well as an independent autonomous energy source for individual consumers.

Keywords: biomass; biofuels; electric energy; energy saving technologies; gas turbine installation; power supply to consumers

Вступ

Ресурси біологічної сировини на нашій планеті, тобто ресурси біопалива, значно перевищують запаси

органічного палива. Загальна кількість біомаси на землі, яке включає рослинний і тваринний світ, а також продукти її фізіологічної біотрансформації і промислової переробки, оцінюється приблизно в 800

млрд. тон при щорічному прирості 200 млрд. тон. Запаси ж кам'яного вугілля оцінюються в 500 млрд. тонн, нафти - 200 млрд. тонн, газу - в 100 млрд. тонн [1-3]. В Україні запаси вугілля, які знаходяться на складах ТЕС та ТЕЦ, антрацитової групи складають 586,3 тис. тонн, газової групи складають 2124,8 тис. тонн [4].

Використання альтернативного палива в енергоустановках сприяє збереженню традиційних енергоресурсів і поліпшенню стану навколишнього середовища відповідно до принципів енергозберігаючих технологій [5,6]. Біопаливні установки поки ще не набули широкого застосування, тому що при використанні, наприклад, природного газу витрати на обслуговування енергоустановок менше. Тому використання біопалива економічно доцільно там, де близько аграрне виробництво. Крім цього аспекту, необхідно проаналізувати сировинні джерела біопалива і ареали його розміщення в кожній конкретній місцевості.

Стратегія розвитку енергокомплексів більшості країн світу пов'язана з використанням відновлюваних джерел енергії, що є одним з напрямків для успішного вирішення проблеми енергозбереження споживачів. Взагалі перехід на відновлювані джерела енергії на сьогоднішній день є загальною тенденцією задля зменшення впливу на екологічну ситуацію та це пов'язано зі станом здоров'я людей [7]. Україна має наміри приєднуватись до ініціатив Європейської зеленої угоди, яка полягає в укріпленні енергетики та екологічної ситуації.

Слід звернути також увагу на те, що сировиною для виробництва біопалива може бути будь-який вид біологічного матеріалу, який називається біомасою [8]. Біопаливо - продукт у всіх регіонах світу, і майже в кожному з них може бути зроблена її переробка в енергію і паливо. На даному етапі розвитку енергетики тільки за рахунок біомаси можна отримати 10-15% від загальної кількості енергетичних потреб країн, а в деяких регіонах і більше.

Криза світової економіки, яка пов'язана, в першу чергу, з дефіцитом паливно-енергетичних ресурсів, стимулює впровадження енергозберігаючих технологій переробки біологічних відходів з метою отримання біогазу, здатного замінити природний газ для електростанцій і транспорту [9,10].

Мета роботи

Мета статті - аналіз видів біомаси, напрямків отримання і використання біопалива в сучасних енергоустановках.

Виклад основного матеріалу

Всі види біомаси можемо класифікувати наступним чином:

- сировина рослинного походження;
- сировина тваринного походження;
- відходи життєдіяльності людини.

Із сировини рослинного походження можна виготовляти тверде, рідке та газоподібне біопаливо. На рис.1 представлені види сировини рослинного походження.

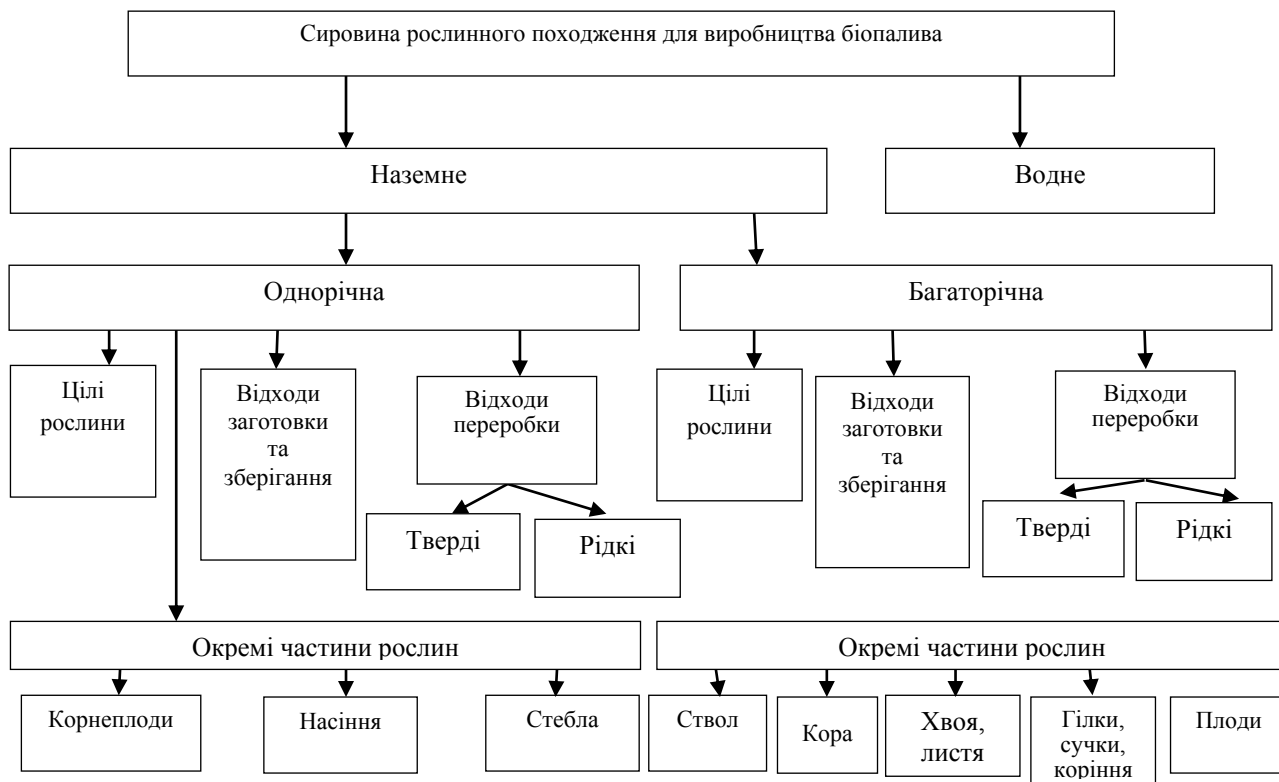


Рис. 1 – Класифікація сировини рослинного походження для виробництва біопалива

Склад джерел біомаси тваринного походження представлено на рис. 2. Ресурси сировини цієї групи настільки ж великі, як і ресурси рослинного походження. Зокрема, щорічний запас відходів життєдіяльності тварин та птахів в Україні оцінюється приблизно в 250-300 млн. тонн [5,11].

Найбільш розповсюдженим видом твердого біопалива є дрова, деревні гранули (пелети). Теплота згорання пелет 16-17 МДж/кг. Найбільша теплота згорання у деревного вугілля до 32-35 МДж/кг [8, 11]. Деревне вугілля вважається найекологічнішим чистим біопаливом. Його використовують, як і в промисловості так, і в побуті. Зазначимо, що вугільні

брикети випускають з широким спектром задалегідь заданих характеристик: швидкість горіння (швидке чи повільне), димність (бездимність) при згоранні, запах диму та інше.

Із багатьох видів відходів життєдіяльності людей в якості сировини для біопалива представляють найбільший інтерес тверді побутові відходи (харчові), а також папір, картон та відходи деревини. Їх класифікація в залежності від походження початкової сировини представлена на рис. 3. Згідно цієї класифікації тверді біопалива виготовляють з сировини біологічного походження [8].

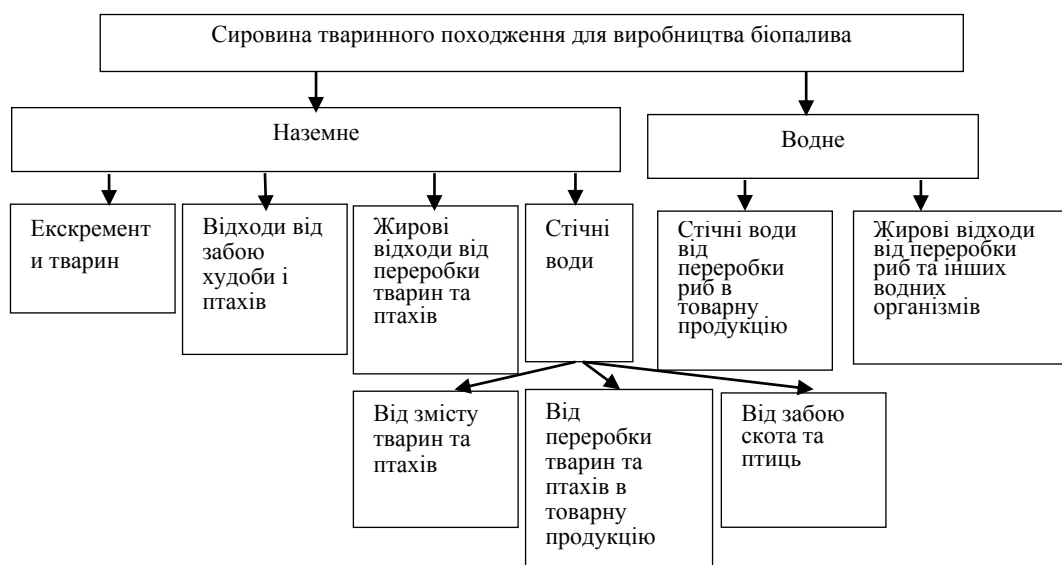


Рис. 2 – Класифікація сировини тваринного походження

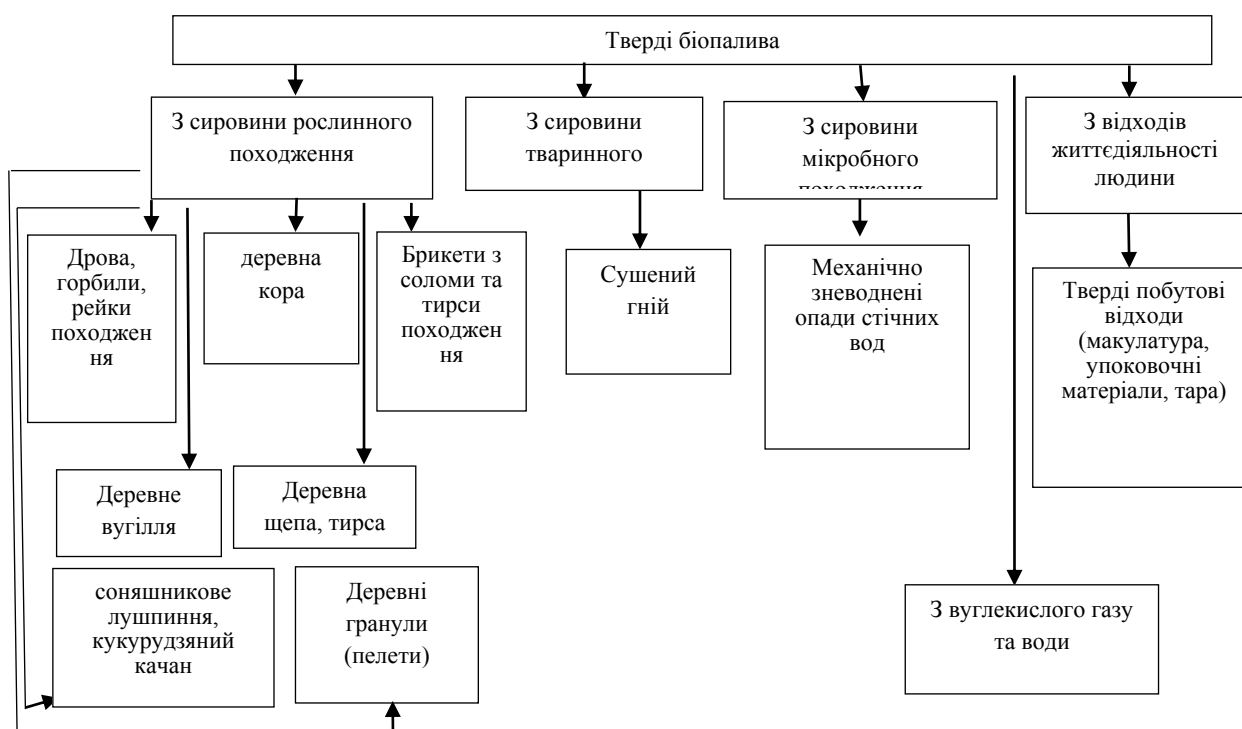


Рис. 3 – Класифікація твердого біопалива

Найбільш розповсюдженим видом твердого біопалива є дрова, деревні гранули (пелети). Теплота згоряння пелет 16-17 МДж/кг. Найбільша теплота згоряння у деревного вугілля до 32-35 МДж/кг [8,11]. Деревне вугілля вважається найекологічнішим чистим біопаливом. Його використовують, як і в промисловості так, і в побуті. Зазначимо, що вугільні брикети випускають з широким спектром заздалегідь заданих характеристик: швидкість горіння (швидке чи повільне), димність (бездимність) при згоранні, запах диму та інше.

Існує досить багато шляхів переробки початкової біомаси в кінцевий продукт у вигляді енергії. Технології були розроблені та адаптовані виходячи з різної фізичної природи та хімічного складу початкової сировини та виду енергії (тепло, електроенергія, паливо для транспорту).

Модернізація технологій для біомаси, на сьогоднішній час, розробляється для перетворення громіздкої сировини в більш щільні та практичні носії енергії для ефективного транспортування, зберігання та зручного використання у наступному перетворенні [12].

На рис. 4 зображено можливі способи виробництва біопалива (які існують та перспективні).

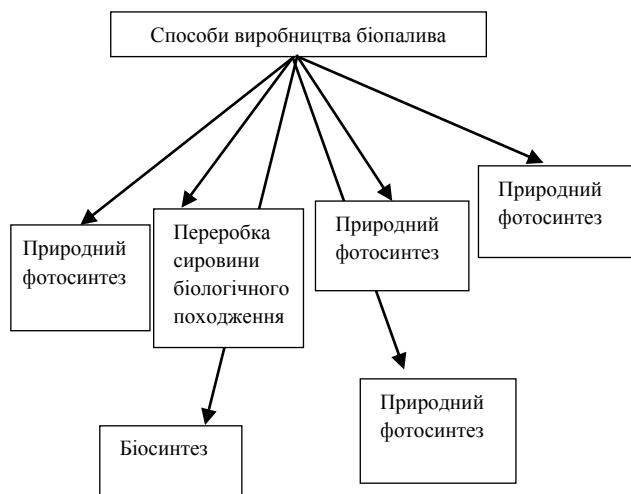


Рис. 4 – Способи виробництва біопалива

Для виробництва електроенергії і тепла пар зазвичай отримують при спалюванні різних видів біомаси в топках парових котлів. При цьому раціонально використовувати такі термохімічні процеси: піроліз або суха перегонка (нагрів або часткове спалювання органіки для отримання похідних палив або хімічних сполук). Продукти піролізу - гази, рідкий конденсат (смоли, масла), тверді залишки (вугілля, зола). Традиційна технологія отримання деревного вугілля - піроліз без збору парів і газів. У процесі піролізу отримують також газоподібне паливо, яке зручно для подальшого використання, екологічно і транспортабельність. Для його отримання використовують газогенератори, коефіцієнт корисної дії яких становить 80-90%.

Гідрогенерація - процес, при якому подрібнену, розкласу або переварену, біомасу нагрівають в атмосфері водню до 600 С ° при тиску 5 МПа для етанолу. Можлива гідрогенерація із застосуванням СО і пара. При цьому з продуктів реакції (в присутності каталізатора) витягується сістетична нафта.

Гідроліз - перетворення целюлози в цукор для подальшого зброджування при перегріванні в сірчаній кислоти або під впливом мікроорганізмів. Можна використовувати спиртову ферментацію (бродіння) - отримання з біомаси етилового спирту, котрий потім використовують як паливо. Початковою сировиною для цього процесу, рослинний крохмаль, целюлоза.

Біогаз може бути отриманий при анаеробному зброджуванні біомаси, тобто в процесі її окислення без присутності повітря. Для отримання біогазу використовують біогазогенератори, що дозволяють отримати максимальну кількість метану. Такі газогенератори економічно ефективні при роботі на стічних водах від тваринницьких ферм і боєнь.

Пар проходить через трубопроводи на ТЕС і важливим питанням також є збільшення терміну напруження цих елементів енергетичного обладнання, а саме зварних з'єднань. Тому слід приділяти велику увагу і пошкодженості елементів енергетичного обладнання [13].

Широке застосування знайшли різного роду котли. При спалюванні палива в топках з високою температурою утворюється досить багато діоксиду азоту NO₂, при зниженні температури - діоксид азоту майже не утворюється. У парогазових установках (ПГУ) як правило використовують котли з топками з, так званим, киплячим шаром. Усередині шару розміщують труби з нагрівається теплоносієм, який відводить виділяється теплоту. Завдяки порівняно низькій температурі горіння в топках з киплячим шаром не відбувається розплавлення золи, і тому вона не налипає на поверхні теплообміну котла. В результаті скорочуються витрати на очистку поверхонь теплообміну. Киплячий шар на 90% складається з частинок золи, тому можна спалювати матеріали з дуже високою зольністю, а додавання вапняку дозволяє різко знизити викиди діоксиду сірки SO₂. У Фінляндії, Швеції котли з киплячим шаром застосовують для утилізації відходів лісової промисловості. У США, Англії, Франції котли з киплячим шаром все ширше застосовують на невеликих теплових електростанціях [3,11].

У ряді країн розроблені установки для спалювання твердих відходів. В Японії спалюють до 80% всіх твердих відходів, в Швеції - до 60%. У США розробили установку для спалювання відходів без попереднього сортування та подрібнення, з максимальним розміром окремих предметів до 1м. У відходи можуть додаватися відпрацьовані мастила, пластмаси, відходи хімлабораторій, нерозрізані покрішки і інші гумотехнічні вироби, мулові опади міських стічних вод [12].

Подібні установки працюють в Люксембурзі, Франції, Німеччині. Термічний розклад і шлакування твердих відходів, крім використання додаткових енергоресурсів, вирішує також екологічно важливе завдання скорочення площ під міські звалища і забруднення ними атмосферного повітря та ґрунтовних вод.

Обговорення результатів

У сучасній енергетиці все більш широке застосування знаходять газотурбінні установки (ГТУ). Основу сучасних ГТУ становлять газові турбіни потужністю 25-100 МВт. Спрощена структурна схема енергоблоку такої електростанції представлена на рис. 5.

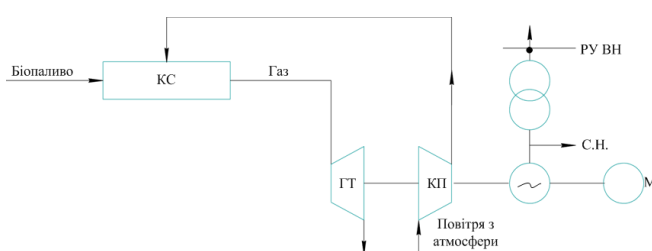


Рис. 5 – Структурна схема ГТУ

Біопаливо подається в камеру згоряння КС, туди ж нагнітається компресором КП стиснене повітря. Гарячі продукти згоряння віддають енергію газовій турбіні ГТ, яка обертає компресор і синхронний генератор Г. Запуск установки проводиться за допомогою розгінного двигуна М і тривають 1-2 хв. Тому ГТУ відрізняються високою маневреністю і придатним для роботи як в енергосистемі, так і для автономних споживачів.

Теплоелектростанції на біопаливі мають можливість збільшувати безпеку енергетичної галузі будь-якого регіону, позитивно позначатися на сільському господарстві, лісопереробці. Міні-ТЕЦ може використовуватися в будь-яких районах при наявності джерела дешевого біопалива [14, 15]. Перевагою таких станцій з газогенераторами є: малий статутний капітал, близькість до споживачів, відсутність необхідності будівництва дорогих високовольтних ліній електропередачі, дешева експлуатація. Скорочуються витрати при передачі енергії, відсутня необхідність включення в мережу централізованого електропостачання.

Висновки

Розроблено класифікацію видів біомаси, а також способів її переробки. Розглянуто можливість застосування біопалива в установках для виробництва теплової та електричної енергії, що є перспективним з точки зору все більшого розвитку у всьому світі біоенергетики.

Список літератури

1. Коробко Б., Жовнір М. Концепція та основні завдання галузевої програми впровадження нових та поновлюваних джерел енергії. *Енергетика та електрифікація*. 1999. № 7. С. 33-41.
2. Альтернативная энергетика. URL: <https://www.alterenergy.info/> (Дата звернення: 13.05.2020).
3. Интеллектуальная собственность в Украине. URL: <https://zet.in.ua/> (Дата звернення: 13.05.2020).
4. Запаси вугілля на складах ТЕС та ТЕЦ (тис. тонн). URL: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245398672&cat_id=245395735 (Дата звернення: 20.05.2020).
5. Закон України про енергозбереження: № 74. *Закони України*. 1997. Т7. С. 281-291.
6. Мазуренко А. С., Денисова А. Е., Климчук А. А., Нго Минь Хиеу, Котов П. А. Экспериментальные характеристики биогазовых энергоустановок. «Энергосберегающие технологии и оборудование». *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2014. № 1/8 (67). С. 7-12.
7. Олійник Ю. С. Використання сонячних батарей у сучасних умовах. *Вчені записки Таврійського національного університету*. 2018. Вип. № 29(68), №2. С. 220-224.
8. Интеллектуальная собственность в Украине. URL: <https://zet.in.ua/> (Дата звернення: 13.05.2020).
9. Черноivanova Г. С., Шматко Н. М. Форми організації інноваційної діяльності у ринкових умовах України. Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Тем ат. вип.: *Технічний прогрес та ефективність виробництва*. Харків: НТУ «ХПІ». 2010. № 8. С. 191-198.
10. Shmatko N. The large-scale economic and industrial systems structural and organizational sustainability ensuring through enterprise engineering methodology. *Nauka i Studia*. 2018. № 14 (194). P. 3-13.
11. Гютт А. Мини-дрова на экспорт и не только. *Биоэнергетика*. 2007. № 1. С. 55-57.
12. Pantieliieva I., Shmatko N., Glushko A. Alternative energy: some issues of generating energy from biofuels. *Con actas de la conferencia internacional científica y práctica «Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial» 24 de abril de 2020. Barcelona, España*. 2020. P. 15-17. doi: 10.36074/24.04.2020.v2.04.
13. Glushko A. Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. Vol. 6. 1(84). P. 14-20. doi: 10.15587/1729-4061.2016.85852.
14. Смородин Г. С. Анализ использования биотоплива при производстве электрической энергии. *Молодой ученый*. 2016. № 20(124). С. 199-202.
15. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantieliieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters. *Eastern-european journal of enterprise technologies*. 2018. 5/5(95). P. 20-28. doi: 10.15587/1729-4061.2018.144925.

References (transliterated)

1. Korobko B., Zhovnir M. Kontseptsiya ta osnovni zavdannya haluzevoyi prohramy vprovadzheniya novykh ta

- ponovlyuvanykh dzherel enerhiyi. *Enerhetyka ta elektrifikatsiya*, 1999, № 7, P. 33-41.
2. Al'ternatyvnaia enerhetyka. Available at: <https://www.alterenergy.info/> (accessed: 13.05.2020).
 3. Yntellektual'naya sobstvennost' v Ukrainy. Available at: <https://zet.in.ua/> (accessed: 13.05.2020).
 4. Zapasy vugillya na skladax TES ta TECz (ty's.tonn). Available at: http://mpe.kmu.gov.ua/minugol/control/uk/publish/article?art_id=245398672&cat_id=245395735 (accessed: 20.05.2020).
 5. Zakon Ukrainy pro enerhozbezheniia: № 74. *Zakony Ukrainy*, 1997, 7, P. 281-291.
 6. Mazurenko A. S., Denysova A. E., Klymchuk A. A., Nho Myn' Khyeu, Kotov P. A. Ékserhetycheskye kharakterystyky byohazovykh énerhoustonovok. Énerhosberehayushchye tekhnolohyy y oborudovanye. *Vostochno-evropeyskyy zhurnal peredovykh tekhnolohyy*, 2014, № 1/8 (67), P. 7-12.
 7. Oliynyk Yu. S. Vykorystannia sonyachnykh batarey u suchasnykh umovakh. *Vcheni zapysky Tavriys'koho natsional'noho universytetu*, 2018, № 29(68), №2, P. 220-224.
 8. Panteleeva Y. V. Sostoyanye razvytyia enerhetyky na osnove byotekhnolohyy. *Vcheni zapysky Tavriys'koho natsional'noho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky»*, 2018, 29 (68), №1, P. 85-90.
 9. Chernoianova H. S., Shmat'ko N. M. Formy orhanizatsiyi innovatsynoyi diyal'nosti u rynkovykh umovakh Ukrainy. *Visnyk Nats. tekhn. un-tu «KHPI»: zb. nauk. pr. Tem at. vyp.: Tekhnichnyy prohres ta efektyvnist' vyrobnytstva*. Kharkiv: NTU «KHPI», 2010, No 8, P. 191-198.
 10. Shmatko N. The large-scale economic and industrial systems structural and organizational sustainability ensuring through enterprise engineering methodology. *Nauka i Studia*, 2018, № 14 (194), P. 3-13.
 11. Hyutt A. Myny-drova na éksport y ne tol'ko. *Byoenerhetyka*, 2007, № 1, P. 55-57.
 12. Pantieliieva I., Shmatko N., Glushko A. Alternative energy: some issues of generating energy from biofuels. *Con actas de la conferencia internacional científica y práctica «Integración de las ciencias fundamentales y aplicadas en el paradigma de la sociedad post-industrial» 24 de abril de 2020. Barcelona, España*, 2020, P. 15-17, doi: 10.36074/24.04.2020.v2.04.
 13. Glushko A. Researching of welded steam pipe joints operated for a long time. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, V. 6, 1(84), P. 14-20, doi: 10.15587/1729-4061.2016.85852.
 14. Smorodyn H. S. Analiz yspol'zovanyia byotoplyva pry proyzvodstve élektrycheskoy énerhiy. *Molodoy uchenyy*, 2016, № 20(124), P. 199-202.
 15. Budanov P., Brovko K., Cherniuk A., Pantieliieva I., Oliynyk Yu., Shmatko N., Vasyuchenko P. Improvement of safety of autonomous electrical installations by implementing a method for calculating the electrolytic grounding electrodes parameters. *Eastern-european journal of enterprise technologies*, 2018, 5/5(95), P. 20-28, doi: 10.15587/1729-4061.2018.144925.

Сведения об авторах (About authors)

Пантелєєва Ірина Вікторівна – кандидат технічних наук, доцент, Українська інженерно-педагогічна академія, доцент кафедри фізики, електротехніки і електроенергетики; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2960-2358; e-mail: panteleeva.uipa@gmail.com.

Ірина Pantieliieva – Scientific Degree (Ph. D.), Docent, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Department of Physics, Electrical Engineering and Power Engineering, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2960-2358; e-mail: panteleeva.uipa@gmail.com.

Шматко Наталія Михайлівна - доктор економічних наук, доцент Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри менеджменту інноваційного підприємництва та міжнародних економічних відносин, м. Харків, Україна, ORCID 0000-0002-4909-252X e-mail: shmatko.khpi@gmail.com

Nataliia Shmatko – Doctor of Economic Sciences, Docent, Associate Professor, Department of Management of Innovative Entrepreneurship and International Economic Relations, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-4909-252X e-mail: shmatko.khpi@gmail.com.

Глушко Альона Валеріївна - кандидат технічних наук, старший викладач кафедри зварювання, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна, ORCID 0000-0002-6245-9971 e-mail: alyonaglushko@gmail.com.

Alyona Glushko - Scientific Degree (Ph. D.), senior lecturer, Department of Welding, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID 0000-0002-6245-9971 e-mail: alyonaglushko@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Пантелєєва І. В., Шматко Н. М., Глушко А. В. Забезпечення енергозбереження при використанні установок на біопаливі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 38- . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.05.

Please cite this article as:

Pantieliieva I., Shmatko N., Glushko A. Ensuring energy saving when using biofuel installations. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 38- , doi:10.20998/2413-4295.2020.02.05.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Пантелеева И. В., Шматько Н. М., Глушко А. В. Обеспечение энергосбережения при использовании установок на биотопливе. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 38- . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.05.

АННОТАЦИЯ Во всем мире и в Украине, в частности, все острее возникает вопрос нехватки энергоресурсов, их дороговизны, а также загрязнения окружающей среды вредными отходами производства электроэнергии на тепловых электростанциях. Экологи серьезно опасаются за состояние нашей планеты при дальнейшем использовании традиционных источников энергии. В сложившейся ситуации на первое место выходит способ получения энергии с помощью нетрадиционных и возобновляемых источников, к которым относится и биотопливо. Общее количество биологического сырья в мире значительно превышает запасы классического органического топлива. Поэтому стратегия развития энергокомплексов большинства стран мира связана с использованием возобновляемых источников энергии. Сырьем для производства биотоплива может быть любой вид биологического материала. В статье проанализированы возможные виды биомассы, проведена классификация этих видов с точки зрения получения биотоплива. Сегодня объем энергии потребляемой биомассы составляет около 50 ЭДж в мире и составляет около 10-15 % мирового потребления первичной энергии. Для использования биоэнергетического потенциала в долгосрочной перспективе усилия должны быть направлены на повышение уровня выхода биомассы и модернизацию сельского хозяйства, прямое увеличение глобального производства продуктов питания, а значит, и ресурсов для биомассы. Существует много путей преобразования исходной биомассы в конечный продукт в виде энергии. Несколько технологий были разработаны и адаптированы, исходя из различной физической природы и химического состава исходного сырья и вида энергии (тепло, энергетика, топливо для транспорта). В статье также рассмотрены возможные способы производства биотоплива и некоторые установки для получения тепловой и электрической энергий. Для более эффективного использования энергии из биомассы современные крупномасштабные тепловые решения часто сочетаются с производством тепла и электроэнергии – когенерации. С этой позиции рассмотрены парогазовые установки, в которых устанавливаются котлы с топками с кипящим слоем. Вестма актуально использование газотурбинных установок на биотопливе, которые могут использоваться для производства электроэнергии в часы пик в энергосистеме, а также как самостоятельный автономный источник энергии для отдельных потребителей.

Ключевые слова: биомасса; биотопливо; электрическая энергия; энергосберегающие технологии; газотурбинная установка; электроснабжение потребителей

Надійшла (received) 18.05.2020

УДК 008.5

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.06

ДИНАМИКА ИНФОРМАЦИОННОЙ ЭНТРОПИИ ПРОЕКТОВ И ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ЕЕ ОЦЕНКИ

А. В. БОНДАРЬ

кафедра управления логистическими системами и проектами, Одесский национальный морской университет, Одесса, УКРАИНА
*e-mail: ocheretyankaalla@gmail.com

АННОТАЦИЯ Рассмотрены вопросы практической оценки и изучения динамики информационной энтропии проектов. Информационная энтропия проекта формируется, исходя из множества возможных вариантов результатов проекта и их вероятностей. Предлагаемый подход определения информационной энтропии проектов, соответствующих операционной деятельности проектно-ориентированных организаций, является комбинированием Шенновского подхода к вычислению энтропии, методов математической статистики и теории вероятностей. В основе процедуры – рассмотрение результатов проекта как случайной величины с нормальным законом распределения, а множество событий для оценки энтропии формируется путем «дробления» интервалов на множество возможных значений результата проекта. Ширина интервалов влияет на уровень энтропии. Рассмотрены практические аспекты формирования интервалов, установлено, что интервалы для результатов проекта формируются не механически, а с учетом знания менеджера проекта реальных условий, приводящих к тому или иному интервалу результатов, каждый из которых является событием, связанным с определенными условиями. Оптимальным для проекта является вариант минимального количества интервалов минимальной ширины, что приведет к минимизации информационной энтропии. Таким образом, установлена взаимосвязь между среднеквадратическим отклонением результата проекта и информационной энтропией, что проиллюстрировано соответствующим расчетным примером. Уменьшение энтропии обуславливается уменьшением среднеквадратического отклонения. Установлены возможные варианты динамики информационной энтропии в рамках жизненного цикла, определены необходимые варианты для обеспечения успеха проекта. Динамика энтропии рассмотрена в совокупности с динамикой среднеквадратического отклонения результата как функции от времени. Снижение информационной энтропии основано на создании таких условий, при которых среднеквадратическое отклонение является монотонно убывающей функцией от времени. Соответствующие экспериментальные исследования подтверждают адекватность предлагаемого подхода к определению информационной энтропии проекта и мониторинга ее динамики. Определены условия, при которых динамика энтропии будет свидетельствовать о высоком качестве процессов управления проектом.

Ключевые слова: энтропия проекта; дисперсия; жизненный цикл; результат; нормальный закон

DYNAMICS OF INFORMATION ENTROPY OF PROJECTS AND PRACTICAL ASPECTS OF ITS EVALUATION

A. BONDAR

Logistic systems and project management, Odessa National maritime University, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT The issues of practical assessment and study of the dynamics of informational entropy of projects are considered. The informational entropy of the project is formed on the basis of many possible options for project results and their probabilities. The proposed approach for determining the informational entropy of projects corresponding to the operational activities of project-oriented organizations is a combination of the Shannon approach to calculating entropy, methods of mathematical statistics and probability theory. The procedure is based on the consideration of project results as a random variable with a normal distribution law, and many events for estimating entropy are formed by “splitting” the intervals into many possible values of the project result. The width of the intervals affects the level of entropy. The practical aspects of the formation of intervals are considered, it is established that the intervals for the project results are not formed mechanically, but taking into account the knowledge of the project manager of the real conditions leading to a particular interval of results, each of which is an event associated with certain conditions. Optimal for the project is the option of a minimum number of intervals of minimum width, which will lead to minimization of information entropy. Thus, the relationship between the standard deviation of the project result and information entropy is established, which is illustrated by the corresponding calculation example. A decrease in entropy is caused by a decrease in standard deviation. Possible options for the dynamics of informational entropy within the life cycle are identified; the necessary options for ensuring the success of the project are identified. The dynamics of entropy is considered in conjunction with the dynamics of the standard deviation of the result as a function of time. The decrease in information entropy is based on the creation of conditions under which the standard deviation is a monotonically decreasing function of time. Corresponding experimental studies confirm the adequacy of the proposed approach to determining the informational entropy of a project and monitoring its dynamics. The conditions are determined under which the dynamics of entropy will testify to the positive quality of the project management processes.

Keywords: project entropy; dispersion; life cycle; result; normal law

Введение

Согласно [1,2] функционирование и развитие проектно-ориентированной организации связано с

двумя видами энтропии – информационной и энергоэнтропией. Данные категории могут быть использованы в качестве характеристик организации,

отражающие ее «качество», прежде всего, с точки зрения бизнес-процессов.

Проект как самостоятельная структура также обладает указанными видами энтропий, интеграция которых формирует соответствующие энтропии организации. Таким образом, как и большинство категорий, связанных с проектно-ориентированными организациями, информационная энтропия и энергоэнтропия являются двухуровневыми, то есть рассматриваются и на уровне проекта, и на уровне организации в целом. Такая декомпозиция позволяет разрабатывать механизмы влияния на энтропии организационного уровня путем воздействия на энтропию на уровне проектов.

Динамика внешней среды и изменения внутренней среды организации (на уровне отдельного проекта и организации в целом) обуславливают динамику энтропий. Собственно, изменение энтропии и является в большей степени показателем качества бизнес-процессов организации, чем само значение энтропии в конкретный момент времени. Поэтому идентификация поведения энтропии на уровне проекта является актуальной научной задачей.

Анализ литературных источников

Проектно-ориентированное управление [3,4] как прогрессивная методология организации операционной деятельности предприятий и организаций интенсивно пополняется новыми категориями, интегрируя как классические, так и инновационные [5] подходы к управлению. И сегодня проектно-ориентированное управление применяется в различных сферах деятельности как коммерческих, так и некоммерческих [6-8]. Одной из доминирующих концепций, которая успешно интегрировалась в проектно-ориентированное управление, является ценностная концепция (например, [9-13]), которая расширяет границы традиционной эффективности и предоставляет возможность универсализации оценки результатов проекта и деятельности в целом, вне зависимости от ее сферы. Таким образом, смещаются акценты в понимании «успешности» проектов, организаций и предприятий, и качественная оценка управления в целом, и отдельных бизнес-процессов становится значительно важнее количественных результатов, высокое значение которых в текущем периоде без качественного управления не является залогом высоких результатов по завершению проекта или в будущей деятельности организаций.

Одной из таких характеристик, которые позволяют оценить качество управления и бизнес-процессов, является информационная энтропия. К данной категории обращаются отдельные исследователи (например, [14-16]), получая определенные результаты, в том числе, и в приложении к проектам, и проектно-ориентированным организациям в целом.

Как правило, информационная энтропия используется в качестве аналога меры риска проекта в качестве противопоставления традиционному подходу, основанному на дисперсии нормальной случайной величины, что важно и нужно в тех ситуациях, когда установить вид и параметры закона нет возможности, но можно оценить вероятности определенных ситуаций.

Тем не менее, следует отметить, что, не смотря на существующие исследования, их результаты являются в большей степени концептуальными и не предоставляют конкретных инструментов для оценки энтропии и отслеживания ее динамики. Динамичность же информационной энтропии рассматривается с математической точки зрения [17-20] применительно к усложняющимся во времени системам. И предлагаемые результаты не могут быть применены к проектам, а для использования их на уровне предприятия и организаций требуется соответствующая прикладная адаптация.

Цель работы

Исходя из вышесказанного, целью данного исследования является изучение динамики информационной энтропии проектов и разработка подхода к ее оценке.

Изложение основного материала

Оценка информационной энтропии проекта.

В проектно-ориентированных организациях реализуются проекты двух категорий – проекты, связанные с текущей (операционной) деятельностью, и проекты развития, которые связаны с достижением стратегических целей организации. Проекты развития присущи различным организациям, но при рассмотрении проектно-ориентированных организаций, прежде всего, подразумевается, что их операционная деятельность представлена в виде совокупности проектов. Поэтому в рамках данного исследования внимание сосредоточено именно на указанной категории проектов.

Информационная энтропия проекта формируется, исходя из множества возможных вариантов результатов проекта и их вероятностей. Пусть в организации в рамках операционной деятельности осуществляется n проектов. Организация ожидает от каждого проекта результата $R_j, j = \overline{1, n}$, который, может быть принят как случайная величина с заданным законом распределения. В противном случае имеет место полная неопределенность, что нехарактерно для проектов, соответствующих операционной деятельности, а в большей мере присуще, например, инновационным проектам, для которых результаты не могут быть спрогнозированы на базе предыдущей статистики. Таким образом, спецификой проектов

операционной деятельности является то, что их результаты могут быть смоделированы с помощью методов математической статистики и теории вероятностей.

Для каждого проекта $j = \overline{1, n}$ введем в рассмотрение H_j - информационную энтропию:

$$H_j = - \sum_{k_j=1}^{K_j} p(A_{k_j}) \cdot \ln(p(A_{k_j})), \quad (1)$$

где события A_{k_j} состоят в том, что результат проекта составил R_{k_j} , и каждому проекту характерны таких возможных событий. При этом:

$$p(A_{k_j}) = p(R_j = R_{k_j}) \quad (2)$$

в случае дискретности случайной величины $R_j, j = \overline{1, n}$, или

$$p(A_{k_j}) = p(R_j \in (R_{k_j-1}, R_{k_j}]) \quad (3)$$

в случае ее непрерывности, где R_{k_0} - условная минимальная граница результатов проекта и начало первого интервала возможных значений.

Как правило, нормальный закон распределения является наиболее подходящим для описания поведения R_j , поэтому в качестве $(R_{k_j-1}, R_{k_j}]$, $k_j = \overline{1, K_j}, j = \overline{1, n}$ может быть принято «дробление» области вероятностно значимых возможных значений R_j на интервалы. Под вероятностно значимыми понимаются те значения, вероятность которых больше некой заданной величины, а остальными значениями можно пренебречь как маловероятными.

Ширина указанных интервалов d определяется подходом к рассмотрению результата проекта и размахом его возможных значений. Последний для нормального закона распределения определяется дисперсией или среднеквадратическим отклонением σ_{R_j} (правило «трех сигм»).

Отметим, что принимаемая ширина и количество интервалов $(R_{k_j-1}, R_{k_j}]$ является проявлением «осведомленности» о результатах проекта: если менеджмент не в состоянии выделить несколько интервалов и может рассматривать только их небольшое количество, то это означает, что менеджмент не осведомлен о факторах (их поведении), которые могут приводить к тому или иному диапазону значений результата проекта.

Таким образом, «дробление» на интервалы для результатов проекта осуществляется не механически, а с учетом знания менеджером проекта реальных условий (ситуаций), приводящих к тому или иному интервалу результатов, каждый из которых является событием, связанным с определенными условиями. Это, в свою очередь, естественным образом отражается на информационной энтропии проекта. Оптимальным для проекта будет вариант минимального количества интервалов минимальной ширины, что приведет к минимизации информационной энтропии.

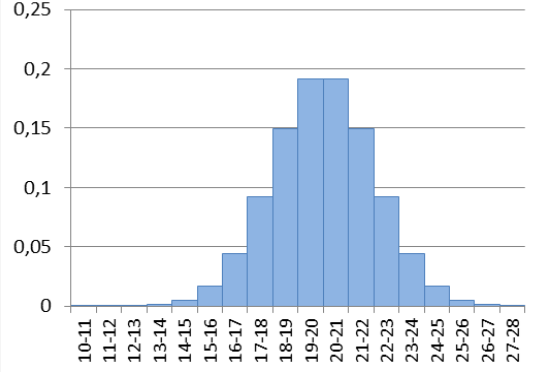
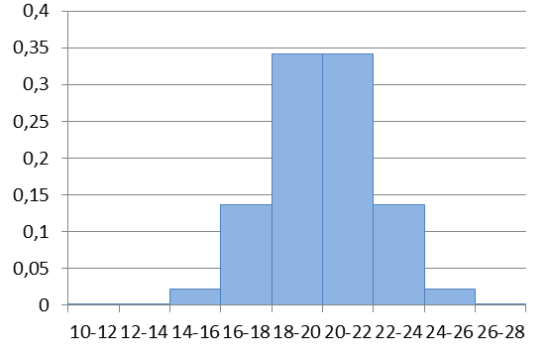
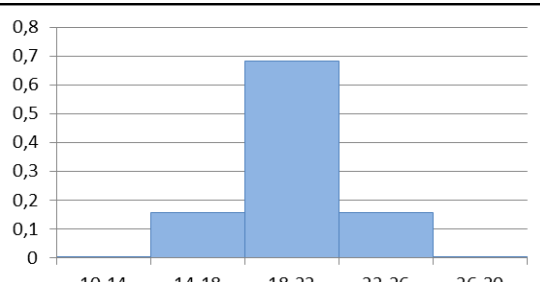
Влияние процедуры формирования событий-интервалов $(R_{k_j-1}, R_{k_j}]$ на информационную энтропию H_j представлено в табл.1. Результаты расчетов наглядно демонстрируют уменьшение информационной энтропии от $H = 2,12$ (при «дроблении» интервалов шириной $d = 1$) до $H = 0,86$ (при ширине интервалов $d = 4$).

Отметим, что более широкое «дробление» интервалов, с одной стороны - может искусственно уменьшать энтропию, с другой стороны - свидетельствовать о приемлемости значительной вариации результата с точки зрения проекта, что определяет его относительную устойчивость по отношению к влиянию негативных факторов. Таким образом, определение ширины интервалов d является результатом комбинации лицами, принимающими решение, множества факторов, связанных как с внутренней, так и с внешней средой проекта.

Предлагаемая процедура определения информационной энтропии проектов, соответствующих операционной деятельности проектно-ориентированных организаций, с вычислительной точки зрения является комбинированием подхода Шеннона к вычислению энтропии и методов математической статистики и теории вероятностей. Не смотря на то, что согласно классическому пониманию случайная величина (в данном варианте R_j) принимает свои возможные значения в результате воздействия множества факторов, тем не менее, это множество факторов условно может быть распределено на группы множеств, которые могут быть определенным образом интерпретированы. В результате могут быть выделены наиболее вероятные диапазоны значений результатов.

Динамика информационной энтропии проекта. Энтропия является динамической характеристикой проекта и меняется на протяжении всего жизненного цикла, продолжительность которого обозначим T_j .

Таблица 1 - Влияние процедуры формирования событий –интервалов на информационную энтропию

«Дробление» событий-интервалов		Информационная энтропия		
		A	p(A)	p(A)ln(p(A))
		10-11	0,000003	0,0000
		11-12	0,000028	-0,0003
		12-13	0,000201	-0,0017
		13-14	0,001117	-0,0076
		14-15	0,004860	-0,0259
		15-16	0,016540	-0,0678
	
		25-26	0,004860	-0,0259
		26-27	0,001117	-0,0076
		27-28	0,000201	-0,0017
		H		2,1221
		A	p(A)	p(A)ln(p(A))
		10-12	3,13846E-05	-0,000325433
		12-14	0,001318227	-0,008741778
		14-16	0,021400234	-0,082270063
		16-18	0,135905122	-0,271239207
		18-20	0,341344746	-0,366898608
		20-22	0,341344746	-0,366898608
		22-24	0,135905122	-0,271239207
		24-26	0,021400234	-0,082270063
		26-28	0,001318227	-0,008741778
		H		1,458624746
		A	p(A)	p(A)ln(p(A))
		10-14	0,001350	-0,008918
		14-18	0,157305	-0,290947
		18-22	0,682689	-0,260593
		22-26	0,157305	-0,290947
		26-30	0,001318	-0,008742
		H		0,860146

Для проектов, соответствующих операционной деятельности, продолжительность жизненного цикла, как правило, небольшая. Кроме того, данные проекты не относятся к категории инвестиционных. Отметим, что выделение этапов жизненного цикла проекта может осуществляться с различной детализацией, поэтому дальнейшие рассуждения не основываются на какой-то определенной структуре жизненного цикла проекта, а рассматривают исключительно его продолжительность.

На начальном этапе жизненного цикла проекта информационная энтропия H_j , как правило, максимальна, что объясняется наибольшим в рамках жизненного цикла периодом прогнозирования результатов. Нормальной и необходимой для обеспечения эффективного управления является ситуация, при которой информационная энтропия постепенно уменьшается и $H_j \rightarrow 0$ при $t \rightarrow T_j$

прежде всего, за счет приближения периода получения продукта проекта и его результата, а, следовательно, более достоверной информированности менеджмента снижения уровня неопределенности.

На рис.1 представлены варианты возможной динамики информационной энтропии проекта. Варианты 1 и 2 соответствуют позитивному развитию проекта и снижению энтропии различными темпами (естественно, что вариант 1 является лучшим, так как темп снижения выше). Варианты 3 и 4 характеризуют неприемлемые ситуации по проекту, при которых энтропия растет на протяжении практически всего жизненного цикла (для варианта 4 скорость роста значительно выше).

Это свидетельствует о неспособности менеджмента контролировать и влиять на ситуацию, что делает достаточно вероятным провал проекта с точки зрения его результатов.

С учетом принятого выше подхода к определению энтропии, уровень энтропии связан с шириной диапазона значений результатов, который определяется среднеквадратическим отклонением:

$$H_j = H_j(\sigma_{R_j}(t)), 0 \leq t \leq T_j. \quad (4)$$

Таким образом, можно утверждать, что в начале жизненного цикла проекта:

$$\sigma_{R_j}(t=0) = \max_{t \in [0; T_j]} \{ \sigma_{R_j}(t) \}, \quad (5)$$

если принять среднеквадратическое отклонение результата проекта $\sigma_{R_j}(t)$ как функцию от времени [12,13].

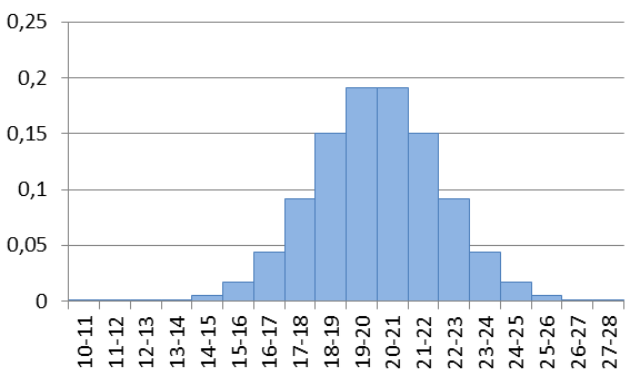
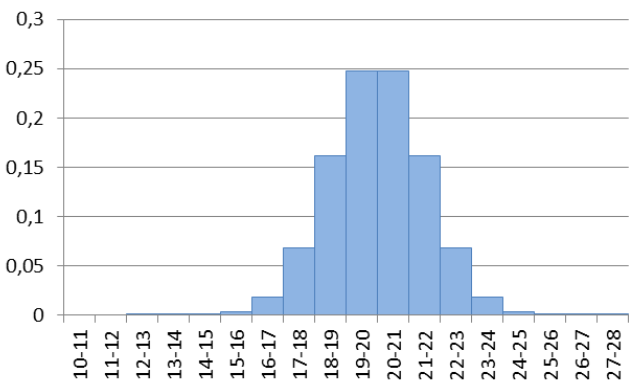
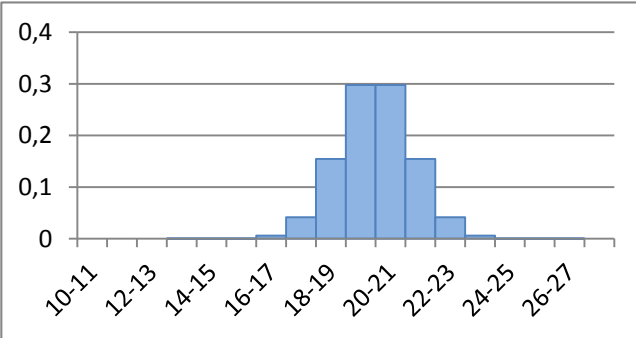
Уменьшение среднеквадратического отклонения приводит к уменьшению диапазона

вероятностно значимых значений R_j , и, следовательно, к уменьшению информационной энтропии (табл.2).

Результаты расчетов демонстрируют снижение энтропии с $H=2,12$ до $H=1,63$ при уменьшении σ_R с 2 до 1,2 при постоянной ширине интервалов d .

Таким образом, эффективное управление проектом предусматривает обеспечение монотонно убывающей функции $\sigma_{R_j}(t)$, что соответствует уменьшению риска недополучения ожидаемого результата с точки зрения классического его оценивания с помощью дисперсии [13,20].

Таблица 2 – Изменение информационной энтропии проекта при уменьшении среднеквадратического отклонения его результата σ_{R_j}

Графическое представление рассматриваемых событий-интервалов	Характеристики результата и энтропия
	$\bar{R} = 20$ $\sigma_R = 2$ $H = 2,12$
	$\bar{R} = 20$ $\sigma_R = 1,5$ $H = 1,84$
	$\bar{R} = 20$ $\sigma_R = 1,2$ $H = 1,63$

На рис.2 схематично представлена динамика изменения вероятностной оценки результатов проекта во взаимосвязи с информационной энтропией. Для представленного примера:

$$\sigma_{R_j}(0) > \sigma_{R_j}(t_1) > \sigma_{R_j}(t_2). \quad (6)$$

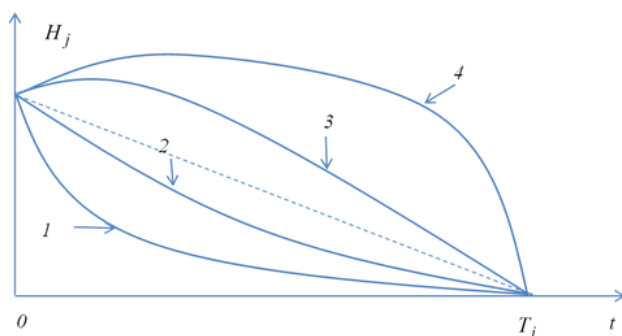


Рис. 1 – Примеры возможной динамики информационной энтропии проекта

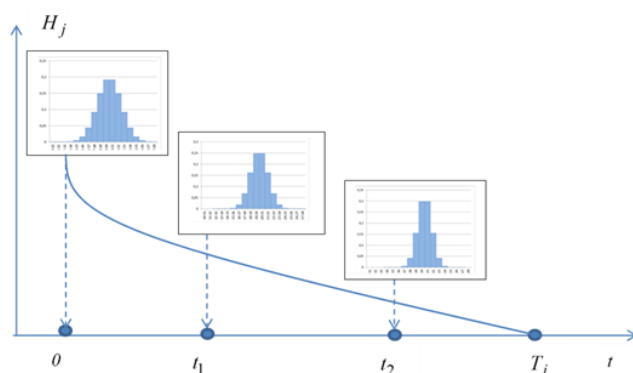


Рис. 2 – Динамика изменения вероятностной оценки результатов проекта во взаимосвязи с информационной энтропией

Таким образом, контроль за $\sigma_{R_j}(t)$ обеспечивает контроль за информационной энтропией проекта, что является необходимым для его успешной реализации.

Выводы

В данной работе рассмотрены вопросы практической оценки и изучения динамики информационной энтропии проектов. Предлагаемая процедура определения информационной энтропии проектов, соответствующих операционной деятельности проектно-ориентированных организаций, является комбинированием подхода, предложенного Шенноном, к вычислению энтропии и методов математической статистики и теории вероятностей. В основе процедуры – рассмотрение результатов проекта как случайной величины с нормальным законом распределения, а множество

событий для оценки энтропии формируется путем «дробления» на интервалы множества возможных значений результата проекта. Установлена взаимосвязь между среднеквадратическим отклонением результата проекта и информационной энтропией, что проиллюстрировано соответствующим расчетным примером. Динамика энтропии рассмотрена в совокупности с динамикой среднеквадратического отклонения результата как функции от времени. Определены условия, при которых динамика энтропии будет свидетельствовать о позитивном качестве процессов управления проектом.

Дальнейшим развитием представленных результатов является разработка механизмов снижения энтропии проектов путем уменьшения дисперсии их результатов.

Список литературы

1. Bondar A., Bushuyev S., Onyshchenko S., Hiroshi, H. Entropy Paradigm of Project-Oriented Organizations Management. *Proceedings of the 1st International Workshop IT Project Management (ITPM 2020) Lviv, Ukraine, February 18-20, 2020, CEUR Workshop Proceedings*. 2020. V. 1. P. 233-243.
2. Аверин Г. В., Звягинцева А. В. О взаимосвязи статистической и информационной энтропии при описании состояний сложных систем. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика*. 2016. Т. 44. №. 20 (241). С. 105-116.
3. Бушуев С. Д., Бушуева Н. С. Механизмы формирования ценности в деятельности проектно-ориентированных предприятий. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. 2010. №.1/2. С. 4-9.
4. Тесля Ю. Н., Хлевна Ю. Л. Организация внедрения конкретизированной методологии и информационной технологии управления проектами как единой системы проектно-ориентированного предприятия. *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2018. № 45 (1321). С. 134-141. doi: 10.20998/2413-4295.2018.45.18.
5. Павлова С. І. Проектно-орієнтовані організації як розвиток методів управління підприємством. *Вісник ЖДТУ: Економіка, управління та адміністрування, Серія І*. 2016. №. 4 (78). С. 170-177. doi: 10.26642/jen-2016-4(78)-170-177.
6. Onyshchenko S., Leontieva A. Modeling of the optimal composition of the enterprise technical development program. *Technology audit and production reserves*. 2018. № 5(2). С. 36-41. doi: 10.15587/2312-8372.2018.146463.
7. Швиндина А. А. Особенности управления проектно ориентированной организацией. *Управление проектами та розвиток виробництва: Зб. наук. пр.* Луганськ: СНУ ім. В. Даля. 2011. № 3 (39). С. 10-17.
8. Онищенко С. П., Арабаджи Е.С. Структура, цель, продукт и ценность программ развития предприятий. *Вісник Одеського національного морського університету*. 2011. № 33. С. 175-186.
9. Морозов В. В., Коломієць А. С., Кальніченко О. В. Використання моделі франчайзингу для управління інноваційними проектами на основі ціннісного підходу. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*.

Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами. 2020. № 1 С. 56 – 62. doi: 10.20998/2413-3000.2020.1.8.

10. Рогозина В. Б. Механизмы управления развитием проектно-ориентированных организаций на моделях комплементарных ценностей. *Вісник НТУ «ХПІ»*. 2015. № 1 (1110). С.54 – 65.
 11. Бондар А. В. Концепція цінності людських ресурсів проектно-орієнтованої організації. *Збірник наукових праць Національного університету кораблебудування імені адмірала Макарова*. Видавничий дім «Гельватика». 2019. № 1. С. 135-141. doi: 10.15589/znpp2019.1(475).19.
 12. Onyshchenko S., Bondar A., Andrievska V., Sudnyk N., Lohinov O. Constructing and exploring the model to form the road map of enterprise development. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2019. V. 5. 3 (101). 33-42. doi: 10.15587/1729-4061.2019.179185.
 13. Бондарь А.В. Онищенко С.П. Оптимизация временных параметров проекта. *Управління розвитком складних систем*. 2019. № 39. С. 11-18. doi: 10.6084/M9.FIGSHARE.11340629.V1.
 14. Jae-Yoon Jung, Chang-Ho Chin and Jorge Cardoso. An entropy-based uncertainty measure of process models. *Information Processing Letters*. 2011. 111(3). P. 135-141.
 15. Шахов А. В. Энтропийная модель портфельного управления проектно-ориентированной организацией. *Управління проектами та розвиток виробництва*. 2014. № 2. С. 87-95.
 16. Han W., Zhu B. Research on New Methods of Multi-project Based on Entropy and Particle Swarm Optimization for Resource Leveling Problem. *Advances in Engineering Research*. (AER) 2017. V. 124, P. 215-221.
 17. Downarowicz T. *Entropy in Dynamical Systems (New Mathematical Monographs)*. Cambridge: Cambridge University Press. 2011. doi: 10.1017/CBO9780511976155.
 18. Markechová D. Riečan B. Entropy of fuzzy partitions and entropy of fuzzy dynamical systems. *Entropy*. 2016. № 18, Article ID 19. <https://doi.org/10.3390/e18010019>.
 19. Markechová D., Ebrahimzadeh A. & Eslami Giski Z. Logical entropy of dynamical systems. *Adv Differ Equ*. 2018. p. 70. doi: 10.1186/s13662-018-1524-z.
 20. Schlick C. M., Duckwitz S. & Schneider S. Project dynamics and emergent complexity. *Comput Math Organ Theory*. 2013. № 19. P. 480–515. doi: 10.1007/s10588-012-9132-z
- References (transliterated)**
1. Bondar A., Bushuyev S., Onyshchenko S., Hiroshi, H. Entropy Paradigm of Project-Oriented Organizations Management. *Proceedings of the 1st International Workshop IT Project Management (ITPM 2020)*. Lviv, Ukraine, February 18-20, 2020, *CEUR Workshop Proceedings*, 2020, V. 1, p. 233-243.
 2. Averin G. V., Zvyagintseva A. V. О взаимосвязи статистической и информационной энтропии при описании состояний сложных систем [On the relationship of statistical and information entropy in describing the states of complex systems]. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Математика. Физика* [Scientific reports of Belgorod State University. Series: Mathematics. Physics], 2016, V. 44, No. 20 (241), P. 105-116.
 3. Bushuev S. D., Bushueva N. S. Механизмы формирования ценности в деятельности проектно-ориентированных предприятий [Mechanisms of value formation in the activities of project-oriented enterprises]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy* [East European Journal of Advanced Technology], 2010, No. ½, P. 4-9.
 4. Teslya Yu. N., Khlevna Yu. L. Organizatsiya vnedreniya konkretizirovannoy metodologii i informatsionnoy tekhnologii upravleniya proyektami kak yedinoi sistemy proyektno-oriyentirovannogo predpriyatiya [Organization of introducing a specific methodology and information technology for project management as a single system of a project-oriented enterprise]. *Bulletin of NTU "KhPI", Series: New solutions in modern technology*. – Kharkov: NTU "KhPI", 2018, 45 (1321), P. 134-141, doi: 10.20998/2413-4295.2018.45.18.
 5. Pavlova S. I. Proyektno-oriyentovani organizatsii yak rozvitok metodiv upravlinnya pidpriemstvom [Design and organization of development methods of management]. *Visnik ZHDTU: Yekonomika, upravlinnya ta administruvannya* [News of ZHDTU: Economy, administration and administration], Seriya 1, 2016, No. 4 (78), P. 170-177, doi: 10.26642/jen-2016-4(78)-170-177.
 6. Onyshchenko S., Leontieva A. Modeling of the optimal composition of the enterprise technical development program. *Technology audit and production reserves*, 2018, No. 5 (2), P. 36-41, doi: 10.15587/2312-8372.2018.146463.
 7. Shvindina A. A. Osobennosti upravleniya proyektno oriyentirovannoy organizatsiyey [Features of project-oriented organization management]. *Upravlinnya proyektami ta rozvitok virobnitstva: Zb. nauk. pr. Lugans'k: SNU im. V.Dalya* [Project management and development of virology: Sciences. Lugansk ave.: SNU im. V. Dalya], 2011, No. 3 (39), P. 10-17.
 8. Onishchenko S. P., Arabadzhi E. S. Struktura, tsel', produkt i tsennost' programm razvitiya predpriyatiy [The structure, purpose, product and value of enterprise development programs]. *Visnik Odes'kogo natsional'nogo mors'kogo universitetu* [Newsletter of Odessa National Marine University], 2011, No. 33, P. 175-186.
 9. Morozov V. B., Kolomits A.S., Kalnichenko O. V. Viktoristannya modeli franchayzingu dlya upravlinnya innovatsiyimi proektami na osnovi tsinnisnogo pidkhodu [Victoria models of franchising for managing innovative projects on the basis of a valuable approach]. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu «KHPI». Seriya: Strategichne upravlinnya, upravlinnya portfelyami, programami ta proyektami* [Newsletter of the National Technical University "KhPI". Seriya: Strategic management, portfolio management, programs and projects], 2020, No. 1, P. 56 – 62, doi: 10.20998/2413-3000.2020.1.8.
 10. Rogozina V. B. Mekhanyzmy upravleniya razvytyem proektno-oriyentirovannykh orhanyzatsyy na modelyakh komplementarnykh tsennostey [Mechanisms for managing the development of project-oriented organizations on models of complementary values]. *Visnyk of NTU «KHPI»* [Bulletin of NTU "KhPI"], 2015, No. 1 (1110), P. 54-65.
 11. Bondar A. V. Kontseptsiiya tsinnosti lyudskyykh resursiv proektno-oriyentovanoi orhanizatsiyi [The concept of value of human resources in the design and organization of organizations]. *Zbirnyk naukovykh prats' Natsional'noho universytetu korablobuduvannya imeni admiral Makarova* [Zbirnyk naukovykh prac of the National University of Shipbuilding and the Admiral Makarov]. Vidavnychy dim "Helvatika", 2019, No. 1, P. 135-141, doi: 10.15589/znpp2019.1(475).19.

12. Onyshchenko S., Bondar A., Andrievska V., Sudnyk N., Lohinov O. [Constructing and exploring the model to form the road map of enterprise development]. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2019, V. 5.3 (101), 33-42, doi: 10.15587/1729-4061.2019.179185.
13. Bondar A. V. Onishchenko S.P. Optymyzatsyya vremennykh parametrov proekta. [Optimization of project time parameters]. *Upravlinnya rozvytkom skladnykh system* [Managing the development of folding systems], 2019, No. 39, P. 11-18, doi: 10.6084/M9.FIGSHARE.11340629.V1.
14. Jae-Yoon Jung, Chang-Ho Chin and Jorge Cardoso. An entropy-based uncertainty measure of process models. *Information Processing Letters*, 2011, 111 (3), P. 135-141.
15. Shakhov A. V. Entropyynaya model' portfel'noho upravlenyya proektno-oryentirovannoy orhanyzatsyye. [Entropy model of portfolio management of a project-oriented organization]. *Upravlinnya proektamy ta rozvytok vyrobnytsva* [Project management and production development], 2014, No. 2, P. 87-95.
16. Han W., Zhu B. Research on New Methods of Multi-project Based on Entropy and Particle Swarm Optimization for Resource Leveling Problem. *Advances in Engineering Research. (AER)*, 2017, 124, P. 215-221.
17. Downarowicz, T. *Entropy in Dynamical Systems (New Mathematical Monographs)*. Cambridge, Cambridge University Press, 2011, doi: 10.1017/CBO9780511976155.
18. Markechová D., Riečan B. Entropy of fuzzy partitions and entropy of fuzzy dynamical systems. *Entropy*, 2016, No. 18, Article ID 19, doi: 10.3390/e18010019.
19. Markechová D., Ebrahimzadeh A. & Eslami Giski Z. Logical entropy of dynamical systems. *Adv Differ Equ.*, 2018, 70, doi: 10.1186/s13662-018-1524-z.
20. Schlick C. M., Duckwitz S. & Schneider S. Project dynamics and emergent complexity. *Comput Math Organ Theory*, 2013, No. 19, P. 480-515, doi: 10.1007/s10588-012-9132-z.

Сведения об авторах (About authors)

Бондар Алла Витальевна – кандидат технических наук, Одесский национальный морской университет, доцент кафедры «Управление логистическими системами и проектами», г. Одесса; ORCID: 0000-0003-2228-2726; e-mail: ocheretyankaalla@gmail.com.

Bondar Alla – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Odessa National maritime University, Associate Professor at the Department of «Logistic systems and project management», Odessa; ORCID: 0000-0003-2228-2726; e-mail: ocheretyankaalla@gmail.com.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Бондарь А. В. Динамика информационной энтропии проектов и практические аспекты ее оценки. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 5-5 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.06.

Please cite this article as:

Bondar A. Dynamics of information entropy of projects and practical aspects of its evaluation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 5-5 , doi:10.20998/2413-4295.2020.02.06.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Бондар А. В. Динаміка інформаційної ентропії проектів та практичні аспекти її оцінки. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 5-5 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.06.

АНОТАЦІЯ Розглянуто питання практичної оцінки і вивчення динаміки інформаційної ентропії проектів. Інформаційна ентропія проекту формується, виходячи з множини можливих варіантів результатів проекту та їх ймовірностей. Пропонований підхід визначення інформаційної ентропії проектів, відповідних операційній діяльності проектно-орієнтованих організацій, є комбінуванням Шеннонського підходу до обчислення ентропії, методів математичної статистики і теорії ймовірностей. В основі процедури - розгляд результатів проекту як випадкової величини з нормальним законом розподілу, а множина подій для оцінки ентропії формується шляхом «дроблення» інтервалів на множини можливих значень результату проекту. Ширина інтервалів впливає на рівень ентропії. Розглянуто практичні аспекти формування інтервалів. Встановлено, що інтервали для результатів проекту формуються не механічно, а з урахуванням знання менеджера проекту реальних умов, що призводять до того чи іншого інтервалу результатів, кожен з яких є подією, пов'язаною з певними умовами. Оптимальним для проекту є варіант мінімальної кількості інтервалів мінімальної ширини, що призведе до мінімізації інформаційної ентропії. Таким чином, встановлено взаємозв'язок між середньоквадратичним відхиленням результату проекту і інформаційною ентропією, що проілюстровано відповідним розрахунковим прикладом. Зменшення ентропії обумовлюється зменшенням середньоквадратичного відхилення. Встановлено можливі варіанти динаміки інформаційної ентропії в рамках життєвого циклу, визначені необхідні варіанти для забезпечення успіху проекту. Динаміка ентропії розглянута в сукупності з динамікою середньоквадратичного відхилення результату як функції від часу. Зниження інформаційної ентропії засноване на створенні таких умов, при яких середньоквадратичне відхилення є монотонно спадною функцією від часу. Відповідні експериментальні дослідження підтверджують адекватність запропонованого підходу до визначення інформаційної ентропії проекту і моніторингу її динаміки. Визначено умови, при яких динаміка ентропії буде свідчити про високу якість процесів управління проектом.

Ключові слова: ентропія проекту; дисперсія; життєвий цикл; результат; нормальний закон

Поступила (received) 20.05.2020

УДК 004.89

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.07

АНАЛІЗ ДАНИХ ТА МАШИННЕ НАВЧАННЯ НА ОСНОВІ ДАНИХ ЛАБОРАТОРІЇ ЦЕРН

В. В. ГИГИНЯК*, А. О. ХЛЕВНИЙ

кафедра технологій управління, Київський національний університет імені Тараса Шевченка, м. Київ, УКРАЇНА
*e-mail: hyhyniak.viktor@email.com

АНОТАЦІЯ У даній роботі проведено аналіз даних, застосовано та порівняно між собою ряд методів машинного навчання до одного із найбільш важливих за своїм впливом та значенням відкритих датасетів організації ЦЕРН, розміщених на CERN Open Data Portal, який пов'язаний із відкриттям бозону Хіггса. Завдання полягало у вирішенні проблеми бінарної класифікації та розподіленні спостережень на ті, що свідчать про сигнал розпаду частинки та фонові. На першому етапі було проаналізовано вхідні дані, проведено аналіз відсутніх значень. Було відзначено залежність факту відсутності більшості змінних від однієї характеристичної, а також перевірено чи впливає наявність/відсутність на належність спостережень до сигналу. Для оцінки та отримання початкових результатів про вплив змінних на результат було розраховано матриці кореляцій. Далі застосовано більш точний та надійний метод розрахунку Predictive Power Score, який є новим та перспективним підходом до визначення залежностей, а саме передбачувальних властивостей змінних. Для подальшого застосування підходів машинного навчання датасет було оброблено та очищено, виявлено та закодовано категоріальні змінні за підходом «one-hot encoding», а також проведено заміну відсутніх значень на розраховані середні по датасету. Після підготовки вхідних даних їх було використано для навчання та валідації ряду моделей. Оскільки проблема полягала в вирішенні питання бінарної класифікації, то до розглянутих моделей ввійшли найбільш поширені методи класифікації, такі як: Decision Tree, Logistic Regression, Bagging, Random Forest, K-Nearest Neighbours, Gradient Boosting, XGB, SVM. До кожного з методів було застосовано пошук гіперпараметрів із використанням 2-фолдної крос-валідації. Серед метрик для оцінки якості та продуктивності моделей було обрано метрики адекватності, точності, чутливості, F-значення та AUC, остання з них була вирішальною, оскільки найбільше підходила до вимог та особливостей класифікації. Найкращими себе показали K-Nearest Neighbours та методи, що базуються на побудові ансамблів із простих класифікаторів, а саме дерев рішень. Також було проведено навчання та валідація моделей на базі нейронних мереж, які хоч і показали досить високі результати, однак через проблематику з перенавчанням виявилися децю гіршими за методи на основі побудови ансамблів. Найвищі значення спостерігались для Gradient Boosting та XGB, а так як останній є схожим за принципом до першого, але має ряд переваг по швидкості, надійності та продуктивності, то було обрано зупинитися саме на ньому. Після наступного етапу вдосконалення вхідних параметрів моделі, було досягнуто збільшення значень метрик та отримано високі показники передбачувальної здатності. Оскільки XGB базується на побудові ансамблів із простіших предикторів (а в даному випадку дерев рішень), то це дозволило отримати наочне уявлення про алгоритм передбачення. Таким чином наступним кроком було проведено візуалізацію роботи отриманої моделі у вигляді побудови зведеного дерева рішень, а також розраховано F-значення важливості змінних. Отримані результати дозволили провести аналіз впливу кожної із змінних на передбачення сигналу, а також порівняти їх із теоретичними відомостями. Було відмічено більший вплив змінних, отриманих вченими методами розрахунку із теоретичних формул в порівнянні із вхідними змінним, які відповідали неопрацьованим значенням детекторів. Таким чином в результаті роботи було проаналізовано різні підходи та методи машинного навчання, встановлено, що найбільш продуктивними та при цьому легкими в інтерпретації результатів є моделі на базі ансамблю дерев рішень, а також отриманий алгоритм для роботи з експериментальними даними, їх аналізом та використанням у методах машинного навчання.

Ключові слова: аналіз даних; обробка даних; експериментальні дані; машинне навчання; бінарна класифікація; градієнтний бустинг

DATA ANALYSIS AND MACHINE LEARNING ON THE CERN DATA

V. HYHYNIAK, A. KHLEVNYI

Department of Management Technologies, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The data from one of the open datasets of CERN, applying and comparing a number of machine learning methods were analyzed. The dataset is hosted on the CERN Open Data Portal and is associated with the discovery of the Higgs boson. It is considered to be one of the most challenging in terms of impact and importance. First of all, the task was to solve the problem of binary classification and the division of observations into the records that indicate the signal of particle decay and background. At the first stage, the input data were analyzed, and the missing values were processed too. The fact of the dependence of most variables on the absence of one characteristic was noted, and it was checked whether the presence/absence affects the affiliation of observations to the signal. Correlation matrices were calculated to evaluate and obtain initial results on the influence of variables on the output. Secondly, a more accurate and reliable method of calculating the Predictive Power Score was used, which is a new and promising approach to determine the dependencies, namely the predictive properties of variables. For further application of machine

learning approaches, the dataset was processed and cleaned, categorical variables were identified and coded according to the "one-hot encoding" approach, and the missing values were replaced with the calculated averages of the dataset. After preparing the input data, they were used for training and validation of a number of models. Since the task was to solve the problem of binary classification, the considered models included the most common classification methods, such as: Decision Tree, Logistic Regression, Bagging, Random Forest, K-Nearest Neighbors, Gradient Boosting, XGB, SVM. The search for hyperparameters using 2-fold cross-validation was applied to each of the methods. Among the metrics for assessing the quality and performance of the models, metrics of accuracy, precision, sensitivity, F-value and AUC were chosen, the latter of which was crucial because it best suited the requirements and features of the classification. K-Nearest Neighbors and methods based on building ensembles from simple classifiers, namely decision trees, proved to be the best. Models based on neural networks were also suggested and validated, although they showed quite good results, due to the problem of overfitting turned out to be slightly worse than the methods based on the construction of ensembles. The highest values were observed for Gradient Boosting and XGB, and since the latter is similar in principle to the first one, but has a number of advantages in speed, reliability and performance, it was chosen to focus on. After the next stage of improving the input parameters of the model, an increase in the values of metrics was achieved and high indicators of predictability were obtained. Since XGB is based on building ensembles from simple predictors (and in this case decision trees), this allowed us to get a clear idea of the prediction algorithm. Thus, the next step was to visualize the work of the obtained model in the form of constructing a consolidated decision tree, and also calculate the F-values of the importance of variables. The obtained results allowed us to analyze the influence of each of the variables on the prediction of the signal, as well as to compare them with theoretical information. A greater influence of variables was obtained by scientific methods of calculation from theoretical formulas in comparison with the input variables, which corresponded to the raw values of the detectors. Thus, as a result of the work different approaches and methods of machine learning were analyzed, it was found that the most productive and easy to interpret the results are models based on the ensemble of decision trees, and the algorithm for working with experimental data, their analysis and use in methods of machine learning was established.

Keywords: data analysis; data processing; experimental data; machine learning; binary classification; gradient boosting

Вступ

Роль та вплив науки про дані зростає з кожним роком, аналіз даних та машинне навчання набирають все більшої ваги як невід'ємна частина робочого процесу організацій, що оперують значними обсягами інформації. До однієї з таких належить і відома у всьому світі ЦЕРН - Європейська організація з ядерних досліджень, яка одночасно є найбільшою в світі лабораторією з фізики елементарних частинок. Проведення експериментів завжди супроводжується генерацією великих об'ємів даних (наприклад, за 2016 рік було згенеровано понад 49 Петабайтів даних [1]), що містять в собі важливу інформацію, яка, однак, потребує знань вчених для її виокремлення.

У зв'язку зі зростаючим інтересом до даних, отриманих в ЦЕРН, було створено CERN Open Data portal [2], на якому знаходиться інформація призначена для навчальних та дослідницьких цілей. На порталі зібрані відкриті дані з різних LHC експериментів: ALICE, ATLAS, CMS та LHCb. Серед найбільш цікавих зі сторони Data Science є підготовані збірки / набори даних для аналізу даних та машинного навчання. В даній роботі було обрано один із найбільш важливих за своїм впливом та значенням датасет, пов'язаний із відкриттям бозону Хіггса. Розглянутий датасет побудований на основі змодельованих за допомогою офіційного генератора-моделі ATLAS full-detector подій "Higgs to tautau", змішаних з різним фоном [3]. Отримані з експериментів дані необхідно класифікувати та перевірити на відповідність подій розпадам бозонів Хіггса. Для ідентифікації сигналу (каналу, або події), що відповідає розпаду бозону, використовуються спеціальні алгоритми, побудовані дослідниками на базі фізичних знань. Але все більшої уваги привертають підходи до класифікації, отримані за

допомогою методів машинного навчання. Вони є досить перспективними у напрямку покращення існуючих підходів та алгоритмів. З цією метою організація надала дані для можливості створення нових моделей іншими науковцями та фахівцями з data science.

Мета роботи

В даній роботі ставилося на меті провести аналіз вхідних даних, зробити їх обробку та підготовку до подальшого використання в моделях, а також розробити рішення для поставленої проблеми бінарної класифікації методами машинного навчання [4], а саме: розробити, навчити та порівняти між собою ефективність моделей, визначити найбільш вдалі та доцільні, забезпечити їх легке використання для автоматизації ідентифікації сигналів з даних, які отримуються на експериментах. Отриманий підхід до автоматичного прийняття рішень про класифікацію сигналів, допоможе та пришвидшить роботу під час аналізу отриманих даних з експерименту в середовищі Python [5]. Також отримання алгоритму роботи з даними, розробки та валідації моделей може бути застосований до інших наборів вхідних даних.

Викладення основного матеріалу

На першому етапі роботи було проаналізовано вхідні дані, проведено аналіз відсутніх значень [6]. Було відзначено залежність факту відсутності більшості змінних від однієї характеристичної, а також перевірено чи впливає наявність/відсутність на приналежність спостережень до сигналу. Для оцінки та отримання початкових результатів про вплив змінних на результат було розраховано матриці кореляцій. Далі застосовано більш точний та надійний

Variable	Number of missing values
DER_mass_MMC	~38,000
DER_mass_transverse_met_lep	0
DER_mass_vis	0
DER_pt_h	0
DER_deltaeta_jet_jet	~180,000
DER_mass_jet_jet	~180,000
DER_deltaeta_jet_jet	~180,000
DER_deltar_tau_lep	0
DER_pt_tot	0
DER_sum_pt	0
DER_pt_ratio_lep_tau	0
DER_met_phi_centralty	0
DER_lep_eta_centralty	~180,000
PRJ_tau_eta	0
PRJ_tau_phi	0
PRJ_lep_pt	0
PRJ_lep_eta	0
PRJ_lep_phi	0
PRJ_met	0
PRJ_met_phi	0
PRJ_met_sumet	0
PRJ_jet_num	0
PRJ_jet_leading_pt	~98,000
PRJ_jet_leading_eta	0
PRJ_jet_leading_phi	0
PRJ_jet_subleading_pt	~98,000
PRJ_jet_subleading_eta	~180,000
PRJ_jet_subleading_phi	~180,000
PRJ_jet_all_pt	0

Classifier	Accuracy	Precision	Recall	FMeasure	AUC
GaussianNB	0.68204	0.546211	0.435912	0.484868	0.761160
LogisticRegression	0.74952	0.675280	0.532837	0.595661	0.815203
KNeighborsClassifier	0.80190	0.740824	0.653073	0.694186	0.868067
DecisionTreeClassifier	0.81890	0.763739	0.677228	0.717886	0.880569
RandomForestClassifier	0.82294	0.792401	0.656752	0.718228	0.889015
SVC	0.83064	0.779958	0.699118	0.737329	0.893542
BaggingClassifier	0.83554	0.790000	0.711381	0.748632	0.899080
XGBClassifier	0.83400	0.783139	0.715871	0.747996	0.904973
GradientBoostingClassifier	0.84154	0.795140	0.725754	0.758864	0.910165

Найкращими себе показали K-Nearest Neighbours та методи, що базуються на побудові ансамблів із простих класифікаторів, а саме дерев рішень. Також було проведено навчання та валідація моделей на базі нейронних мереж, які хоч і показали досить високі результати, однак через проблематику з перенавчанням виявилися дещо гіршими за методи на основі побудови ансамблів. Найвищі значення спостерігались для Gradient Boosting та XGB, а так як останній є схожим за принципом до першого, але має ряд переваг по швидкості, надійності та продуктивності, то було обрано зупинитися саме на ньому. Оскільки XGB базується на побудові ансамблів із простіших предикторів (а в даному випадку дерев рішень), то це дозволило отримати наочне уявлення про алгоритм передбачення. Таким чином наступним кроком було проведено візуалізацію роботи отриманої моделі у вигляді побудови зведеного дерева рішень, а також розраховано F-значення важливості змінних [10]. Отримані результати дозволили провести аналіз впливу кожної із змінних на передбачення сигналу, а також

Після навчання та валідації моделей було отримано ряд їх характеристик, що наведені на рис. 2.

порівняти їх із теоретичними відомостями. Було відмічено більший вплив змінних, отриманих вченими методами розрахунку із теоретичних формул в порівнянні із вхідними змінним, які відповідали неопрацьованим значенням детекторів

Висновки

В результаті роботи було проаналізовано різні підходи та методи машинного навчання, встановлено, що найбільш продуктивними та при цьому легкими в інтерпретації результатів є моделі на базі ансамблю дерев рішень. Застосування нейронних мереж є також високоефективним, однак в порівнянні з ансамблями дерев рішень не мають настільки високих показників по надійності передбачень та можливості простої інтерпретації отриманої моделі та визначення впливу кожної окремої змінної на результат. Також було отримано алгоритм для роботи з експериментальними даними, їх аналізом, обробкою та використанням в методах машинного навчання.

Список літератури

1. *Annual Report 2016*. CERN. Retrieved 22 September 2017. URL: <https://cds.cern.ch/record/2270805/files/486-1611-1-SM.pdf> (дата звернення 18.01.2020).
2. *CERN Open Data Portal*. URL: <http://opendata.cern.ch/> (дата звернення: 05.05.2020).
3. ATLAS collaboration. *Dataset from the ATLAS Higgs Boson Machine Learning Challenge 2014*. CERN Open Data Portal. 2014. doi:10.7483/opendata.atlas.zbp2.m5t8.
4. Alpaydin Ethem. *Introduction to Machine Learning*. 2010. MIT Press. p. 9.
5. Fortune Nathanael Alexander. *A Short Guide to Using Python For Data Analysis In Experimental Physics*. 2018. Physics: Faculty Publications, Smith College, Northampton, MA. URL: https://scholarworks.smith.edu/phy_facpubs/30 (дата звернення 18.01.2020).
6. Salgado C. M., Azevedo C., Proença H., Vieira S. M. *Missing Data*. In: *Secondary Analysis of Electronic Health Records*. Springer, 2016, Cham. P. 143–162.
7. RIP correlation. Introducing the Predictive Power Score : веб-сайт. URL: <https://8080labs.com/blog/posts/rip-correlation-introducing-the-predictive-power-score-pps/> (дата звернення: 03.05.2020).

8. Gérard Biau, Benoît Cadre. *Optimization by gradient boosting*. 2017. URL: [ffhal-01562618](https://arxiv.org/abs/1701.05626) (дата звернення 18.01.2020).
9. Changming Zhao, Dongrui Wu, Jian Huang, Ye Yuan, Hai-Tao Zhang. *BoostTree and BoostForest for Ensemble Learning*. URL: [arXiv:2003.09737](https://arxiv.org/abs/2003.09737) (дата звернення 18.01.2020).
10. *Feature Importance and Feature Selection With XGBoost in Python*. URL: <https://machinelearningmastery.com/feature-importance-and-feature-selection-with-xgboost-in-python/> (дата звернення: 03.05.2020).

References (transliterated)

1. *Annual Report 2016*. CERN. Retrieved 22 September 2017. Available at: <https://cds.cern.ch/record/2270805/files/486-1611-1-SM.pdf> (accessed 18.01.2020).
2. *CERN Open Data Portal*. Available at: <http://opendata.cern.ch/> (accessed: 05.05.2020).
3. ATLAS collaboration. Dataset from the ATLAS Higgs Boson Machine Learning Challenge 2014. CERN Open Data Portal, 2014, doi:10.7483/opendata.atlas.zbp2.m5t8.
4. Alpaydin Ethem. *Introduction to Machine Learning*. MIT Press, 2010, p. 9.
5. Fortune Nathanael Alexander. *A Short Guide to Using Python For Data Analysis In Experimental Physics*. 2018. Physics: Faculty Publications, Smith College, Northampton, MA. Available at: https://scholarworks.smith.edu/phy_facpubs/30 (accessed 18.01.2020).
6. Salgado C. M., Azevedo C., Proença H., Vieira S. M. *Missing Data*. In: *Secondary Analysis of Electronic Health Records*. Springer, 2016, Cham, pp.143–162.
7. RIP correlation. Introducing the Predictive Power Score. Available at: <https://8080labs.com/blog/posts/rip-correlation-introducing-the-predictive-power-score-pps/> (accessed: 03.05.2020).
8. Gérard Biau, Benoît Cadre. *Optimization by gradient boosting*. 2017. Available at: [ffhal-01562618](https://arxiv.org/abs/1701.05626) (accessed 18.01.2020).
9. Changming Zhao, Dongrui Wu, Jian Huang, Ye Yuan, Hai-Tao Zhang *BoostTree and BoostForest for Ensemble Learning*. Available at: [arXiv:2003.09737](https://arxiv.org/abs/2003.09737) (accessed 18.01.2020).
10. *Feature Importance and Feature Selection With XGBoost in Python*. Available at: <https://machinelearningmastery.com/feature-importance-and-feature-selection-with-xgboost-in-python/> (accessed: 03.05.2020).

Сведения об авторах (About authors)

Гигиняк Віктор Васильович – магістрант кафедри технологій управління, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; м. Київ, Україна; e-mail: hyhyniak.viktor@gmail.com.

Viktor Hyhyniak – Bachelors Degree, pursuing Master Degree, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine; e-mail: hyhyniak.viktor@gmail.com.

Хлевний Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, асистент кафедри технологій управління, Київський національний університет імені Тараса Шевченка; м. Київ, Україна; e-mail: andlev@ukr.net.

Andrii Khlevnyi – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Department of, Taras Shevchenko National University of Kyiv, Kyiv, Ukraine; e-mail: andlev@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гигиняк В. В., Хлевний А. О. Аналіз даних та машинне навчання на основі даних лабораторії ЦЕРН. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 53–55. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.07.

Please cite this article as:

Hyhyniak V., Khlevnyi A. Data Analysis and Machine Learning on the CERN data. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 53–5 , doi:10.20998/2413-4295.2020.02.07.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гигиняк В. В., Хлевной А. А. Анализ данных и машинное обучение на основе данных лаборатории ЦЕРН. *Вестник Национального технического университета «ХПИ».* Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 53–55 doi:10.20998/2413-4295.2020.02.07.

АНОТАЦИЯ В данной работе был проведен анализ данных, применены и сравнены между собой ряд методов машинного обучения к одному из самых важных по своему влиянию и значению открытых наборов данных организации ЦЕРН, размещенных на CERN Open Data Portal, который связан с открытием бозона Хиггса. Задача состояла в решении проблемы бинарной классификации и распределении наблюдений на те, что свидетельствуют о сигнале распада частицы и фоновые. На первом этапе были проанализированы входные данные, проведен анализ недостающих значений. Было отмечено зависимость факта отсутствия большинства переменных от одной характеристической, а также проверено влияние наличия/отсутствия переменных на принадлежность наблюдений к сигналу. Для оценки и получения начальных результатов о влиянии переменных на результат была рассчитана матрица корреляций. Далее применено более точный и надежный метод расчета Predictive Power Score, который является новым и перспективным подходом к определению зависимости, а именно к предсказанию свойств переменных. Для дальнейшего применения подходов машинного обучения, данные были обработаны и очищены, обнаружено и закодировано категориальные переменные по методу «one-hot encoding», а также проведена замена отсутствующих значений на рассчитанные средние по набору данных. После подготовки исходных данных они были использованы для обучения и валидации ряда моделей. Поскольку проблема заключалась в решении вопроса бинарной классификации, то в число рассматриваемых моделей вошли наиболее распространенные методы классификации, такие как: Decision Tree, Logistic Regression, Bagging, Random Forest, K-Nearest Neighbours, Gradient Boosting, XGB, SVM. К каждому из методов было применено поиск гиперпараметров с использованием 2-фолдной кросс-валидации. Среди метрик для оценки качества и производительности моделей были выбраны метрики точности, точности, чувствительности, F-значения и AUC, последняя из них была решающей, поскольку больше согласовывалась с требованиями и особенностями классификации. Лучшими себя показали K-Nearest Neighbours и методы, основанные на построении ансамблей из простых классификаторов, а именно деревья решений. Также было проведено обучение и валидация моделей на базе нейронных сетей, которые хотя и показали достаточно высокие результаты, однако через проблематику с переобучением оказались несколько хуже методов на основе построения ансамблей. Высокие значения наблюдались для Gradient Boosting и XGB, а так как последний похож по принципу на первый, но имеет ряд преимуществ по скорости, надежности и производительности, то было решено остановиться именно на нем. После следующего этапа совершенствования входных параметров модели, было достигнуто увеличение значений метрик и получены высокие показатели предсказательной способности. Поскольку XGB базируется на построении ансамблей из простых предикторов (а в данном случае деревьев решений), то это позволило получить наглядное представление об алгоритме предсказания. Таким образом следующим шагом было проведено визуализацию работы полученной модели в виде построения сводного дерева решений, а также рассчитано F-значение важности переменных. Полученные результаты позволили провести анализ влияния каждой из переменных на предсказания сигнала, а также сравнить их с теоретическими сведениями. Было отмечено большее влияние переменных, полученных учеными методами расчета из теоретических формул по сравнению с входными переменными, которые отвечали необработанным значениям детекторов. Таким образом в результате работы были проанализированы различные подходы и методы машинного обучения, установлено, что наиболее продуктивными и при этом легкими в интерпретации результатов есть модели на базе ансамбля деревьев решений, а также был получен алгоритм для работы с экспериментальными данными, их анализом и использованием в методах машинного обучения.

Ключевые слова: анализ данных; обработка данных; экспериментальные данные; машинное обучение; бинарная классификация; градиентный бустинг

Надійшла (received) 16.05.2020

УДК 004.8

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.08

ПОБУДОВА АЛГОРИТМУ ПРОГНОСТИЧНОЇ МОДЕЛІ ПРИ СТВОРЕННІ ПРЕДИКТИВНОГО МОДУЛЯ ПЕРЕДБАЧЕННЯ НЕШТАТНИХ СИТУАЦІЙ В РОБОТІ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ

М. М. КОЛДУН,* Ю. Є. ГРУДЗИНСЬКИЙ

кафедра АТЕП, НТУУ "Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського", Київ, УКРАЇНА
*e-mail: koldun.maks@gmail.com

АНОТАЦІЯ У статті пропонується методологія створення моделі роботи прогнозуючої системи для технологічних об'єктів управління складними або критичними виробництвами. Для цього запропоновано використовувати ітераційний алгоритм прогнозування технічного стану об'єкта, побудованій на основі математико-статистичних методів обробки часових рядів показань об'єктових датчиків, який включає в себе кілька кроків. Кроки алгоритму реалізують: формалізацію апріорних даних, що мають відношення до побудови моделі, у вигляді вхідного керуючого фактора X і вихідного контрольованого вектора параметрів y ; висунення гіпотези про структуру моделі за результатами ранжирування вхідних керуючих факторів X ; вибір алгоритму отримання інформації з об'єкта управління відповідно до структури моделі і ітераційного алгоритму; вибір реалізації алгоритму знімання інформації відповідно необхідної точності вимірювань вхідних параметрів керуючих факторів і оцінки впливу збурюючих впливів; оцінку параметрів моделі, використовуючи стандартні математичні процедури статистичної обробки даних з виключенням слабо значущих параметрів; перевірку адекватності моделі з можливим повторенням усієї процедури з метою поліпшення характеристик моделі. Запропонована агрегована процедура побудови моделі поведінки об'єкта керування придатна для дослідження поведінки більшості потенційно небезпечних технологічних об'єктів управління. Процедура дозволяє здешевити і спростити розробку моделі потенційно небезпечних об'єктів, забезпечити подальший безпечний режим їх функціонування та зробити оцінку їх поточного і майбутнього станів, знизивши витрати на їхню експлуатацію.

Ключові слова: теплоенергетика; формалізація; оцінка; прогнозування; моделювання; виробництво; агрегування; параметри; ітераційний алгоритм

CONSTRUCTION OF THE ALGORITHM OF THE FORECAST MODEL AT CREATION OF THE MODULE OF PREDICTION OF EMERGENCY SITUATIONS IN WORK OF THE INDUSTRIAL AUTOMATION AND CONTROL SYSTEMS

M. KOLDUN*, J. HRUDZYNSKIY

Department ATEP, NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The article proposes a methodology for creating a model of the forecasting system for technological objects of complex or critical production management. To do this, it is proposed to use an iterative algorithm for predicting the technical condition of the object, built on the basis of mathematical and statistical methods of processing time series of readings of object sensors, which includes several steps. The steps of the algorithm implement: formalization of a priori data related to the construction of the model, in the form of the input control factor X and the output controlled vector of parameters y ; hypothesizing the structure of the model based on the results of ranking the input control factors X ; selection of the algorithm for obtaining information from the control object in accordance with the structure of the model and the iterative algorithm; the choice of implementation of the algorithm for capturing information in accordance with the required accuracy of measurements of the input parameters of the control factors and the assessment of the impact of disturbing effects; estimation of model parameters, using standard mathematical procedures of statistical data processing with the exception of weakly significant parameters; checking the adequacy of the model with a possible repetition of the entire procedure in order to improve the characteristics of the model. The proposed aggregate procedure for constructing a model of behavior of the control object is suitable for studying the behavior of most potentially dangerous technological control objects. The procedure allows reducing the cost and simplifying the development of a model of potentially dangerous objects, to ensure further safe operation and to assess their current and future conditions, reducing the cost of their operation.

Keywords: power engineering; formalization; assessment; forecasting; modeling; production; aggregation; parameters; iterative algorithm

Вступ

Аналіз вітчизняних і закордонних систем показує, що в даний час при їх експлуатації, в

основному прийнята "жорстка" стратегія технічного обслуговування, використовуючи тільки апріорну інформацію. У той же час більш перспективними є "гнучкі" стратегії управління технічним станом

потенційно небезпечних об'єктів, засновані на аналізі та оцінці фактичного технічного стану об'єктів. Так декілька років тому на одному з об'єктів енергетичної компанії Duke Energy зафіксували незначне збільшення вібрації в роботі парової турбіни. Предиктивна система в центрі моніторингу електростанції «прийшла до висновку», що аномалія пов'язана з дефектом лопатки і перевірка підтвердила прогноз. В Duke Energy вважають, що раннє виявлення проблеми дозволило заощадити компанії понад \$ 4 млн [1].

Таким чином, предиктивна аналітика дозволяє прогнозувати операційну поведінку технологічної системи, відповідаючи на численні питання «Що може статися, якщо?..» на основі аналізу поточної потокової діагностичної інформації з давачів. Основним елементом такої аналітики є відповідна модель для прогнозуючої системи.

Ціль роботи

Ціль нашої роботи полягає в пропозиції можливої процедури побудови моделі для прогнозуючої системи.

Виклад основного матеріалу

При вивченні динаміки поведінки потенційно небезпечних об'єктів можна виділити два основних підходи: **прогнозування їх технічного стану і прогнозування надійності**.

Прогнозування надійності, засноване на спостереженні прямих або непрямих прогнозованих параметрів, дозволяє досліджувати надійність конкретних об'єктів і виробів в процесі їх роботи.

Прогнозування технічного стану здійснюється на різних стадіях життєвого циклу об'єктів: при проектуванні, виробництві та експлуатації. На стадії проектування вихідними даними є проектні характеристики, робочі режими і умови роботи. Цільова спрямованість прогнозування на цьому етапі - створення конструкції, яка найкращим чином задовольняє вихідним умовам роботи. На стадії експлуатації досліджуються передбачувані закономірності зміни технічних параметрів реального об'єкта, тому прогнозування технічного стану має на меті своєчасне попередження відмов і застосування таких робочих умов експлуатації і режиму обслуговування, які найкращим чином відповідають завданню забезпечення заданої надійності і ефективності [2].

Діагностичній інформації в процедурі контролю та попередження аварій на потенційно небезпечних об'єктах належить велика роль. Аналіз показує, що ризик аварії тісно пов'язаний з ймовірністю прийняття правильного рішення про стан об'єкта. У свою чергу, прийняття рішення про стан об'єкту багато в чому пов'язано з наявністю досить повної інформації про його стан [3].

Враховуючи цю інформацію, в основу створення ефективних діагностичних систем покладена не фіксація вже виниклого дефекту, а пошук і реєстрація фізичних та інших ефектів, що передують моменту переходу контрольованого об'єкта в «дефектний» стан. Основними факторами, що впливають на вибір способу прогнозування стану складних об'єктів, є сукупність наявних параметрів, цільова спрямованість поставленого завдання і робочий алгоритм [4].

Завдання прогнозування тісно пов'язані з завданнями випереджувальної діагностики (наприклад, визначення терміну служби об'єкта або періодичності його профілактичних перевірок і ремонтів). Рішення задач прогнозування вельми важливо, зокрема, для організації технічного обслуговування об'єктів за їх станом (замість обслуговування за термінами або по ресурсу). Безпосереднє перенесення методів вирішення завдань діагностування на завдання прогнозування неможливо через відмінності моделей, з якими доводиться працювати, при діагностуванні моделлю зазвичай є опис об'єкта, в той час як при прогнозуванні необхідна модель процесу еволюції технічних характеристик об'єкта в часі. В результаті діагностування кожен раз визначається не більше ніж одна «точка» зазначеного процесу еволюції для поточного моменту (інтервалу) часу. Проте добре організоване діагностичне забезпечення об'єкта зі зберіганням усіх попередніх результатів діагностування може дати корисну і об'єктивну інформацію, що представляє собою попередню історію (динаміку) розвитку процесу зміни технічних характеристик об'єкта в минулому, що може бути використано для систематичної корекції прогнозу і підвищення його достовірності

Сучасні методи прогнозування засновані на використанні великої кількості різних математичних методів. Це методи функціонального аналізу, теорії ймовірностей і математичної статистики, теорії випадкових функцій і випадкових процесів, спектрального аналізу, теорії розпізнавання образів. Основними факторами, що впливають на вибір способу прогнозування стану складних об'єктів, є сукупність наявних параметрів, цільова спрямованість поставленого завдання і робочий алгоритм

Аналіз статистичних даних діагностики дозволяє судити про неполадки в об'єкті. Прогнозування майбутніх відмов включає розрахунковий час до відмови, допомагаючи визначити момент проведення техобслуговування, уникнути відмов і аварій.

Однак практична реалізація теоретично жорстких постановок задач прогнозування технічного стану складних об'єктів зустрічається з труднощами і обмеженнями. Цим, мабуть, пояснюється слабке і повільне впровадження методів і засобів прогнозування в практику.

Апріорні дані про технічні характеристики об'єкта можна отримувати від функціонального і

тестового діагностування. Тим самим при досить «хороших» засобах функціонального і тестового діагностування та за умови організації накопичення, обробки інформації є можливість в будь-який період часу життєвого циклу об'єкта мати не тільки абсолютні фактичні значення інтенсивностей відмов і прогнозованих параметрів, але також динаміку їх зміни, наприклад, у вигляді кривих.

При наявності таких кривих можна емпірично вибрати критерій придатності і призначити його граничне значення, після досягнення якого подальше використання даного екземпляра об'єкта або неможливо (небезпечно), або не виправдано з техніко-економічних міркувань. Вдалий вибір критерію придатності дозволяє використовувати його значення також для управління періодичністю тестового діагностування (тобто профілактики і ремонту) об'єкта. Це і буде реалізацією індивідуального прогнозування технічного стану об'єкта і тим самим обслуговування його стану.

Найпростішими критеріями придатності можуть бути, наприклад, значення або швидкість зміни абсолютних значень інтенсивностей відмов, або прогнозованих параметрів.

Найбільш важкими є питання вибору обґрунтованого призначення граничного значення критерію придатності, а також вибору прогнозованих параметрів.

Дуже непростю і трудомісткою задачею є вибір прогнозованих параметрів складних технічних систем. Кожен конкретний випадок вимагає розробки оригінального підходу з урахуванням обраних цілей і методів прогнозування. Проте можна сформулювати деякі загальні рекомендації (методи) за вибором прогнозованих параметрів стосовно до різних технічних систем.

1. Метод вибору, що враховує похідні параметрів, заснований на аналізі властивості «монотонності» координат, використовується при аналітичному прогнозуванні в разі, якщо враховуються похідні прогнозованих параметрів об'єктів.

2. Інформаційний підхід до вибору параметрів, що враховує зміну ентропії об'єкта діагностування при виборі того чи іншого параметра. При такому підході для прогнозування відбираються параметри, що несуть максимальну кількість інформації про об'єкт.

3. Вибір прогнозованих параметрів методами статистичної класифікації. Дозволяє в умовах великого числа початкових, первинних параметрів звести до мінімуму число параметрів-ознак для простоти розпізнання, а також для скорочення витрат на виконання вимірювань параметрів об'єкта, іноді вельми трудомістких, що вимагають спеціально розробленої апаратури.

4. Метод вагових коефіцієнтів, заснований на різній значимості діагностичних параметрів для оцінки працездатності складної технічної системи. При цьому для оцінки значущості кожного параметра вводиться певна множина чисел («вага»), кожне з яких

характеризує його «корисність». Завдання зводиться до знаходження такої сукупності вагових коефіцієнтів, яка дозволила б виділити відокремлені класи об'єктів всередині складної системи (кластери, фрактали і т.п.), досить інформативно описувані обраними параметрами.

5. Емпіричний метод. Використовується для отримання «найкращого» (по якомусь певному критерію) набору параметрів. З усіх параметрів процесу, системи вибирається один (або декілька), найбільш інформативний, потім до першого параметру додається такий параметр з решти, щоб інформативність пари параметрів для прогнозування стану складної технічної системи була найбільшою, після цього до отриманої пари параметрів додається наступний параметр і так далі. Додавання параметрів закінчується, коли інформативність набору параметрів незначно перевершує інформативність набору, отриманого на попередньому кроці, або ж коли досягнутий потрібний рівень інформативності або точності розпізнавання. Процес можна вести і в зворотному порядку.

6. Критерій знаків, при якому задача вибору інформативних параметрів зводиться до перевірки тотожності розподілів, що описують стан об'єкта з їх допомогою. Найбільш інформативні параметри, у яких різниця між розподілами максимальна.

Теоретично обґрунтовані відповіді на ці питання вдається отримати далеко не завжди і тільки для дуже простих об'єктів. У більшості випадків, однак, можуть виявитися прийнятними методи експертних оцінок.

Всі завдання технічного прогнозування можна звести до трьох напрямків [5]:

1. Визначення протікання процесу протягом майбутнього відрізка часу в конкретній розмірності.

2. Визначення очікуваної ймовірності невиходу досліджуваного процесу за встановлені допускові границі.

3. Визначення класу довговічності досліджуваного процесу з урахуванням того, що потенційно небезпечні об'єкти функціонують в умовах дії значного числа факторів, в тому числі випадкових.

Прогнозування поведінки таких об'єктів найбільш ефективно з використанням теорії ймовірності. Інакше кажучи, для очікуваних подій можуть бути вказані лише ймовірності їх виникнення, а щодо значень тих чи інших величин часто доводиться обмежуватися законами їх розподілу або іншими ймовірнісними характеристиками: середнім значенням, дисперсією, тощо.

Основним завданням прогнозування є дослідження тенденції, логіки розвитку прогнозованого процесу, що дозволяє в кінцевому підсумку зменшити вплив невизначеності майбутньої ситуації на результат прийнятих рішень. При цьому важливе значення мають точні дані про те, що і за яких умов і сценаріях може статися з об'єктом прогнозування в майбутньому.[6].



Рис. 1 – Схема прогнозування

Широко застосовуваним математичним апаратом для прогнозу поведінки складних об'єктів є математико-статистичні методи обробки часових рядів [7]. Структурна схема такого прогнозування наведена вище на рис. 1.

Після вибору моделі об'єкта, як правило, виникає задача визначення значень її параметрів, що залишилися невідомими. Для визначення цих параметрів в якості математичного апарату використовуємо математико-статистичні методи обробки часових рядів. Отримані результати прогнозування піддаються логічному аналізу, після якого вносяться поправки в інші елементи прогнозуальної системи [8].

Обговорення результатів

Виходячи з положень п.п. 1-6 попереднього розділу нижче описується запропонована ітеративна процедура побудови моделі для прогнозуальної системи.

Нехай X - кінцева множина факторів, що впливають на діагностичний параметр y . Тоді в загальному випадку ітеративна процедура побудови моделі містить 6 етапів.

1. Формалізація апріорних даних, що мають відношення до побудови моделі. Дані можуть бути представлені у вигляді записів спільних спостережень фактору X і вихідного контрольованого параметра y , або y у вигляді сукупності думок експертів про характеристики об'єкта (процесу), що моделюється. Формалізація апріорних даних передбачає виконання ряду процедур, що дозволяють ранжувати чинники X за ступенем їх впливу на вихідний контрольований параметр y для подальшого скорочення параметрів моделі.

2. Висування гіпотези про структуру моделі. За результатами ранжування вхідних керуючих факторів X висувається гіпотеза про структуру моделі - припущення про число факторів множини X , що залишаються в моделі, і вигляді функціонального зв'язку між X та y .

3. Вибір алгоритму знімання інформації з об'єкта. Отримання інформації, необхідної для оцінювання параметрів моделі, здійснюється одним із двох способів - пасивним або активним експериментом. При пасивному експерименті не втручаються у функціонування об'єкта, що моделюється і обмежуються лише реєстрацією спільних спостережень вихідного контрольованого параметра y і частини множини вхідних керуючих факторів X , що включені до моделі. В активному експерименті реєструють значення вихідного контрольованого параметра y , змінюючи за певним алгоритмом вхідні керуючі фактори X , що включені до моделі. Вибір алгоритму визначається структурою моделі, прийнятої в результаті виконання пункту 2 ітеративної процедури.

4. Реалізація алгоритму знімання інформації. При реалізації алгоритму знімання інформації необхідно враховувати точність вимірювання вхідних параметрів керуючих факторів X . Похибки вимірювання X повинні бути як мінімум в декілька разів менше відповідних діапазонів зміни параметрів. Крім того, алгоритм повинен виключати вплив систематичних складових в збурюючих впливах, що спотворюють результат моделювання.

5. Оцінювання параметрів моделі. На цьому етапі, використовуючи стандартні обчислювальні процедури статистичної обробки, оцінюють невідомі коефіцієнти прогнозованої моделі. Складові моделі, що мають малі в статистичному сенсі оцінки коефіцієнтів, виключаються з моделі. Для інших складових моделі, оцінки коефіцієнтів в загальному випадку перераховуються.

6. Перевірка адекватності моделі. Побудова моделі закінчується перевіркою її адекватності (відповідності даним, наявним в розпорядженні). Якщо модель неадекватна, то необхідно повторити процедуру, досягаючи поліпшення характеристик моделі. Будь-яка модель, як правило, використовується для прогнозування стану об'єкта, тому адекватність моделі визначає її прогнозні властивості [9]. Теоретично, перевірка адекватності моделі можлива лише при реалізації активного експерименту. Однак, оцінка працездатності (тобто визначення характеристик точності) моделі можлива завжди. Якщо модель неадекватна, або не задовольняє по працездатності, то необхідно повернутися до етапу 2 процедури побудови моделі, висунути альтернативну гіпотезу про структуру моделі і повторити всі інші етапи процедури.

7. Побудова моделі закінчується або при позитивному результаті перевірки адекватності, або при задовільній працездатності.

На більшості етапів ітеративної процедури побудови моделі, доцільно використовувати методи математичної статистики для оцінювання параметрів випадкових величин і перевірки статистичних гіпотез.

Використання запропонованого алгоритму для моделювання поведінки таких об'єктів, має свою

специфіку. Оскільки метою моделювання поведінки потенційно небезпечних об'єктів є забезпечення безпечного режиму їх функціонування, основні завдання моделювання і подальшого аналізу можливої поведінки об'єкта діагностики – це максимально точна і достовірна оцінка його поточного і майбутнього стану. Тому, зокрема, на етапах 1 і 2 спрощення виду і структури моделі не може і не повинно бути визначальним фактором для дослідника, а на етапах 5 і 6 при оцінці адекватності моделі статистичні оцінки параметрів моделі повинні, безумовно, бути ефективними, вірними і незміщеними з дуже високим ступенем точності (ймовірності).

Прикладом практичного впровадження подібного алгоритму побудови прогностичної моделі є система управління та контролю технічного обслуговування і ремонту магістральних нафтопроводів "СКУТОР" [10]. Система використовується для забезпечення надійності, екологічної безпеки і зниження аварійності магістральних нафтопроводів. У цій системі були проведені роботи по створенню інформаційно аналітичної системи для визначення технічного стану нафтопроводів, обсягів часу і витрат для підтримки їх працездатності, а також обсягів капітального ремонту на основі технічної діагностики.

Висновки

Запропонована агрегована процедура побудови моделі поведінки об'єкта дослідження придатна для дослідження поведінки будь-якого потенційно небезпечного об'єкта. Разом з тим, використання запропонованого алгоритму для моделювання поведінки таких об'єктів, має свою специфіку. Оскільки метою моделювання поведінки потенційно небезпечних об'єктів є забезпечення безпечного режиму їх функціонування, основні завдання моделювання і подальшого аналізу можливої поведінки об'єкта діагностики – максимально точна і достовірна оцінка його поточного і майбутнього стану. Тому, зокрема, на етапах 1 і 2 спрощення виду і структури моделі не може і не повинно бути визначальним фактором для дослідника, а на етапах 5 і 6 при оцінці адекватності моделі статистичні оцінки параметрів моделі повинні, безумовно, бути ефективними, вірними і незміщеними з дуже високим ступенем точності (ймовірності).

Список літератури

1. Системи, додатки та продукти, центр новин. URL: <https://news.sap.com> (дата звернення 21.04.2020).
2. Консультативний дослідницький центр, консультативна група. URL: <https://www.arcweb.com> (дата звернення: 21.04.2020).
3. McCarthy R. V. *Applying Predictive Analytics. Finding Value in Data*. Springer-Verlag, 2019. P. 2-5. doi:10.1007/978-3-030-14038-0.
4. Кутуков С. Е. *Информационно-аналитические системы магистральных трубопроводов*. М.: СІП РІА, 2002. 324с.
5. Pirc J., Desanto D., Davison I., Gragido W. *Threat Forecasting*. Elsevier. 2016. P. 17-27. doi:10.1007/978-3-030-14038-0.
6. Fischetti T., Mayor E., Miguel R. R. *Predictive Analysis*. UK, Packt Publishing, 2017. 1261 p.
7. Саркисян С. А., Голованов Л. В. *Прогнозирование развития больших систем*. М.: Статистика, 1975. 192 с.
8. Winters R. R. *Practical Predictive Analytics*. UK, Packt Publishing, 2017. 651 p.
9. Abbot D. *Applied Predictive Analytics*. Wiley Publishing, 2014. 427 p. doi: 10.5555/2670086.
10. Махутов Н. А., Пермяков В. Н., Ахметханов Р. С. *Диагностика и мониторинг состояния сложных технических систем*. Тюмень: ТИУ, 2017. 632 с.

References (transliterated)

1. Systems, Applications and Products News Center. Available at: <https://news.sap.com> (accessed 21.04.2020).
2. Advisory Research Center Advisory Group. Available at: <https://www.arcweb.com> (accessed 21.04.2020).
3. McCarthy R. V. *Applying Predictive Analytics. Finding Value in Data*. Springer-Verlag, 2019. p. 2-5, doi:10.1007/978-3-030-14038-0.
4. Kutukov S. E. *Informatsionno-analiticheskie sistemyi magistralnykh truboprovodov* [Information and analytical systems of trunk pipelines]. M.: SAP RIA, 2002. 332 p.
5. Pirc J., Desanto D., Davison I., Gragido W. *Threat Forecasting*. Elsevier, 2016. pp. 17-27, doi:10.1016/B978-0-12-800006-9.00002-1.
6. Fischetti T., Mayor E., Miguel R. R. *Predictive Analysis*. UK, Packt Publishing, 2017. 1261 p.
7. Sargsyan S. A., Golovanov L. V. *Prognostirovanie razvitiya bolshih sistem* [Prediction of the development of large systems]. M.: Statistics, 1975. 192 p.
8. Winters R. R. *Practical Predictive Analytics*. UK, Packt Publishing, 2017. 651 p.
9. Abbot D. *Applied Predictive Analytics*. Wiley Publishing, 2014. 427 p., doi: 10.5555/2670086.
10. Makhutov N. A., Permyakov V. N., Akhmetkhanov R. S. *Diagnostika i monitoring sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem* [Diagnosis and monitoring of complex technical systems]. Tyumen: TIU, 2017. 632 p.

Відомості про авторів (About authors)

Колдун Максим Миколайович – бакалавр, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», студент; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-7398-5056; e-mail: koldun.maks@gmail.com.

Maksym Koldun – Bachelor Degree (Bc. D.), Student, Department ATEP, NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7398-5056; e-mail: koldun.maks@gmail.com.

Грудзинський Юліан Євгенійович – старший викладач кафедри АТЕП, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-9220-0621; e-mail: jug@sonettele.com.

Julian Hrudzynskiy - Senior Lecturer, Department АТЕP, NTUU "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9220-0621; e-mail: jug@sonettele.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Колдун М. М., Грудзинський Ю. Є. Побудова алгоритму прогностичної моделі при створенні предиктивного модуля передбачення нештатних ситуацій в роботі автоматизованої системи керування технологічними процесами. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 58-63. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.08.

Please cite this article as:

Koldun M., Hrudzynskiy J. Construction of the algorithm of the forecast model at creation of the module of prediction of emergency situations in work of the industrial automation and control systems. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 58-63, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.08.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Колдун М. М., Грудзинский Ю. Е. Построение алгоритма прогностической модели при создании предиктивного модуля предсказания нештатных ситуаций в работе автоматизированной системы управления технологическими процессами. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 58-63. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.08.

АННОТАЦІЯ В статті пропонується методологія створення моделі роботи прогнозирующей системи для технологічних об'єктів управління складними або критичними виробствами. Для цього пропонується використовувати ітеративний алгоритм прогнозування технічного стану об'єкта, побудований на використанні статистичних методів обробки часових рядів показань об'єктових датчиків і включаючий в себе кілька кроків. Кроки алгоритму реалізують: формалізацію апріорних даних, які мають відношення до побудові моделі, в вигляді входного управляючого фактора X і вихідного контролюваного вектора параметрів y ; висунення гіпотези про структуру моделі за результатами ранжування входних управляючих факторів; вибір алгоритму отримання інформації з об'єкта управління в відповідності до структурою моделі і ітеративним алгоритмом; вибір реалізації алгоритму зняття інформації в відповідності з вимогами точності вимірювань входних параметрів управляючих факторів і оцінки впливу збурюючих впливів; оцінку параметрів моделі, використовуючи стандартні математичні процедури статистичної обробки даних з виключенням слабо значущих параметрів; перевірку адекватності моделі з можливим повторенням всієї процедури з метою покращення характеристик моделі. Представлена агрегована процедура побудови моделі поведінки об'єкта дослідження придатна для дослідження поведінки більшості потенційно небезпечних технологічних об'єктів управління. Процедура дозволяє удешевити і упростити розробку моделі потенційно небезпечних об'єктів, забезпечити безпечний режим їх функціонування і оцінку їх поточного і майбутнього стану, знизити витрати на експлуатацію.

Ключевые слова: теплоенергетика; формалізація; оцінка; прогнозування; моделювання; виробство; агрегування; параметри; ітеративний алгоритм

Надійшла (received) 22.05.2020

УДК 004.051

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.09

КВАЗИСТЕРЕОСКОПИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ОБНАРУЖЕНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ ДЛЯ СЛЕПЫХ НА БАЗЕ RASPBERRY PI 3 И STM8L

В. Л. КОСТЕНКО^{1*}, С. Б. КОНДРАТЬЕВ², М. В. ЯДРОВА³, Д. Е. СТЕЛЬМАХ³

¹ кафедра металлорежущих станков, метрологии и сертификации, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

² кафедра проектного обучения в информационных технологиях, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

³ кафедра информационных систем, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

*e-mail: kvl777@ukr.net

АННОТАЦИЯ Разработана квазистереоскопическая система обнаружения препятствий для слепых с повышенной информативностью. Повышение информативности осуществляется за счет применения одноплатного компьютера Raspberry Pi 3 и микроконтроллера STM8L. Подсистема панорамного ультразвукового обнаружения позволяет определять наличие препятствий и их удаленность по частоте следования звукового сигнала, а подсистема создания тактильного рельефа – по интенсивности тактильной информации. В устройстве предусмотрена возможность коммутации подсистем с источником питания в соответствии с режимом обнаружения препятствий. С помощью кнопки подачи питания осуществляется отключение подсистемы создания тактильного рельефа, ток потребления которой не менее 500 мА, с сохранением работы подсистемы ультразвукового обнаружения препятствий, ток потребления которой не более 20 мА, при этом обеспечивается экономия заряда элемента автономного питания, продление срока его работы без подзарядки. Приведены результаты разработки программной модели – алгоритм работы системы, код программы построения кадра с картой глубин в реальном времени, код программы работы вибромоторов, модульные тесты для тестирования программного кода подсистемы создания тактильного рельефа. На основе данных исследований был собран и испытан макет устройства. После определенного цикла тренировок, слабовидящий человек приобретает способность к лучшей ориентации в пространстве. Автономность системы обеспечивается экономным энергопотреблением за счет применения разработанного алгоритма работы системы и современной энергоэффективной аппаратной части.

Ключевые слова: видеокамера; Raspberry Pi; ШИМ контроллер; вибромотор; ультразвуковой датчик; карта глубин

QUASISTEREOSCOPIC OBSTACLE DETECTION SYSTEM FOR THE BLIND ON THE BASIS RASPBERRY PI 3 AND STM8L

V. KOSTENKO¹, S. KONDRATYEV², M. YADROVA³, D. STELMAKH³

¹ Department of Metal-cutting machines Metrology and Certification, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

² Department of Project Training in Information Technology, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

³ Department of Information Systems, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT Quasi-stereoscopic obstacle detection system for blind people with increased information content has been developed. Increasing information content is carried out through the use of a single-board computer Raspberry Pi 3 and STM8L microcontroller. The subsystem of panoramic ultrasonic detection allows you to determine the presence of obstacles and their remoteness by the frequency pulses of the sound signal, and the subsystem of creating a tactile relief – by the intensity of tactile information. The device provides the ability to switch subsystems with a power source in accordance with the obstacle detection mode. Using the power supply button, the tactile relief subsystem is turned off, the consumption current of which is not less than 500 mA, while the operation of the ultrasonic obstacle detection subsystem, the consumption current of which is not more than 20 mA, is saved, while the charge of the autonomous power element is saved, and its life is extended without recharge. The results of developing a program model are presented – the system operation algorithm, the program for constructing a frame with a real-time depth map, the code for the vibration motor program, unit tests for testing the program code of the tactile relief subsystem. Based on the research data, a mock device was assembled and tested. After a certain training cycle, a visually impaired person acquires the ability to better orientate in space. The autonomy of the system is ensured by economical energy consumption through the application of the developed algorithm of the system and modern energy-efficient hardware.

Keywords: videocamera; Raspberry Pi; PWM controller; vibration motor; ultrasonic sensor; depth map

Введение

По данным Всемирной организации здравоохранения, ежегодно количество слепых в мире увеличивается на 1 млн. человек. По данным специалистов, на земле больше 270 млн. человек с серьезными проблемами со зрением. При этом ежегодно в Украине количество инвалидов

вследствие недостатков зрения возрастает на 12 тыс. человек [1]. Современные технологии проникли во все сферы человеческой жизни и активно используются для улучшения качества жизни слабовидящих людей. Большая часть успехов связана с переключением потока информации на другой канал – слуховой или тактильный. Технологии получения

информации об окружающем пространстве предоставляют людям со слабым зрением и людям с поражением зрительной системы дополнительные возможности ориентации в окружающей среде. Разработка электронных технических средств пространственного ориентирования для слабовидящих людей имеет уже полувековую историю и продолжает оставаться актуальной.

Для реабилитации людей с нарушениями зрения большое внимание уделяется созданию сенсорных вспомогательных устройств [2].

Среди известных электронных устройств обнаружения препятствий для слепых наиболее широко представлены приборы, использующие ультразвуковые и оптические датчики с тактильными и слуховыми каналами передачи информации человеку, что связано с технологичностью их изготовления, функциональными возможностями и автономностью [3,4].

Так, например, для обеспечения стереоскопического эффекта и локализации препятствия, в [5] исследовалась возможность обнаружения препятствий с помощью видеокамер, расположенных на левом и правом плечах человека. Однако такая система не обеспечивает воспроизводимость информации за счет того, что во время движения относительное положение стереокамер изменяется, что приводит к погрешностям в построении стереоизображения. Алгоритм и вычисление расстояния до наблюдаемого объекта по изображениям стереопары в системе компьютерного зрения на основе двух USB камер приведены в [6,7]. Для исключения влияния положения видеокамер, в работе [8] рассматривались система стереозрения, основанная на методе зеркального разделения изображений с видеокамеры. Однако, такие системы достаточно громоздки и чувствительны к механическим воздействиям, а также имеют большие погрешности в определении расстояния до препятствия, что ограничивает их использование на практике.

Решение проблемы может заключаться в дополнении информации, получаемой от системы видеокамер, информацией от других источников, например, ультразвуковых датчиков [9]. К таким устройствам может быть отнесена разработанная нами ранее автономная система панорамного ультразвукового обнаружения, включающая три ультразвуковых датчика *HC-SR04*, микроконтроллер *STM8L*, звуковые излучатели *Piezo Buzzer 17855* [10]. Система позволяет обеспечить панорамность «зрения» за счет расширения угла обзора и определять наличие препятствий прямо перед человеком, а также слева и справа от него в диапазоне расстояний от 0,02 до 3 м в пределах диаграммы направленности ультразвуковых датчиков. В то же время, в процессе эксплуатации системы, был выявлен такой ее недостаток, как недостаточная информативность, затрудняющая человеку с

дефектом зрения уверенно ориентироваться на местности.

Вместе с тем, одновременное использование стереозрения и ультразвуковых датчиков расстояния вызывает повышение нагрузки на каналы восприятия информации человеком, что вызывает необходимость применения специальных алгоритмов работы каналов восприятия информации. В литературе описаны различные варианты использования каналов поступления информации, в том числе от разных источников [11,12].

Однако, обработка информации от разных источников, например, видеокамер, ультразвукового сонара, применение вибромоторов, требует достаточно энергоемкого компьютера, а, следовательно, сравнительно мощного источника питания устройства, что ограничивает его автономность.

Поэтому актуальным является поиск и применение доступных, энергоэффективных микровычислительных средств и их оптимальное комбинирование для реализации автономной и надежной системы обнаружения препятствий [13]. Такой подход обеспечен тем, что, на сегодняшний день, существует большая номенклатура микрокомпьютеров, микроконтроллеров и немало multifunctional платформ, которые могут использоваться для разработки приложений, обеспечивающих перемещение слабовидящих людей.

Цель и задачи работы

Целью данной работы являются исследование и разработка квазистереоскопической системы обнаружения препятствий для слепых на базе *RASPBERRY PI 3* и *STM8L*, преимуществами которой является повышенная информативность, автономность и функциональность, путем обеспечения взаимодополняющих методов восприятия информации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

- разработка структуры системы с учетом возможности экономии заряда автономного элемента питания;
- разработка аппаратной части системы квазистереоскопического обнаружения препятствий для слепых на современной элементной базе;
- разработка алгоритма работы и программной части системы;
- тестирование программной части и макета системы.

Изложение основного материала

Разработка аппаратной части квазистереоскопической системы обнаружения препятствий для слепых

С учетом проведенных исследований была разработана структурная схема квазистереоскопической системы обнаружения препятствий для слепых, которая включает две подсистемы: подсистему панорамного ультразвукового обнаружения [14] и подсистему

создания квазистереоскопического тактильного рельефа. Особенностью устройства является возможность коммутации подсистем с автономным источником питания в соответствии с режимом обнаружения препятствий (рис. 1).

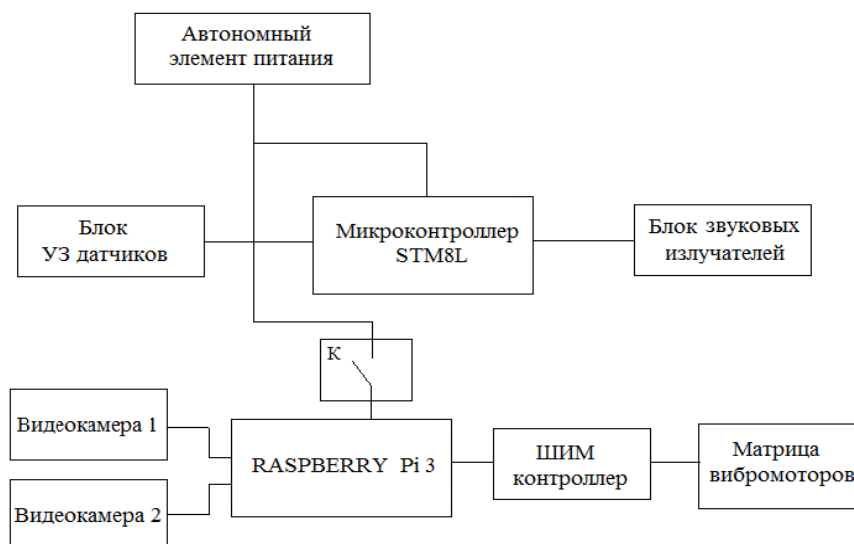


Рис. 1 – Структурная схема квазистереоскопической системы обнаружения препятствий для слепых:
К – кнопка подачи питания

Подсистема панорамного ультразвукового обнаружения включает блок ультразвуковых датчиков (три ультразвуковых датчика *HC-SR04*), микроконтроллер *STM8L*, блок звуковых излучателей (три элемента *Piezo Buzzer 17855*). Устройство позволяет определять наличие препятствий прямо перед человеком, а также слева и справа от него в диапазоне расстояний от 0,02 до 3 м в пределах диаграммы направленности ультразвуковых датчиков. Удаленность объекта можно определять на слух по частоте следования звукового сигнала.

Подсистема создания квазистереоскопического тактильного рельефа включает две видеоканеры, микрокомпьютер *Raspberry Pi 3*, ШИМ контроллер, матрицу из 25 вибромоторов. Система запитывается от автономного элемента питания [15].

В качестве микрокомпьютера был выбран одноплатный компьютер *Raspberry Pi 3* с учетом таких важных преимуществ, как цена (около 35 \$), легкая доступность на рынке, возможность разработки приложений, высокая производительность (64-битный процессор с частотой 1,2 ГГц, частота *GPU VideoCore 400* МГц, частота работы ОЗУ 900 МГц), 40 контактов ввода/вывода общего назначения (*GPIO*), интегрированный модуль *Wi-Fi*, поддерживает *Bluetooth 4.1*, имеет 5-и вольтовый разъем питания [16,17].

Из анализа соотношения цены, энергопотребления и функциональных возможностей, для стереопары были выбраны *Raspberry Pi* видеоканеры, 8 Мп, 1080 п/720 п, со следующими параметрами: напряжение питания 5 В, ток

потребления в режиме тишины 2 мА, ток потребления в рабочем режиме 15 мА, рабочий диапазон обнаружения 0,2–4 м, рабочий угол наблюдения 30°.

Расстояние до препятствия кодируется уровнем вибрации вибромоторов, чем уровень вибрации выше, тем препятствие ближе. Для обеспечения высокого КПД преобразования, сигналы на матрицу вибромоторов поступают с выходов широтно-импульсных модуляторов (ШИМ).

ШИМ контроллер представляет собой две платы *PCA9685* для подключения вибромоторов, с учетом того, что к одной плате можно подключить не более 16 вибромоторов. *PCA9685* – это 16-канальный 12-битный ШИМ/Серво модуль с *I2C* интерфейсом для управления сервоприводами [18].

Учитывая требования по весо-габаритным показателям, энергопотреблению, в качестве тактильных раздражителей были выбраны микровибромоторы типа *4X8MM*.

С помощью кнопки подачи питания К осуществляется отключение подсистемы создания тактильного рельефа, ток потребления которой не менее 500 мА [17], с сохранением работы подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения, ток потребления которой не более 20 мА [14]. При этом обеспечивается экономия заряда элемента автономного питания, продление срока его работы без подзарядки, с сохранением потока панорамной информации от ультразвукового сонара.

По разработанной структурной схеме был реализован макет системы (рис. 2).

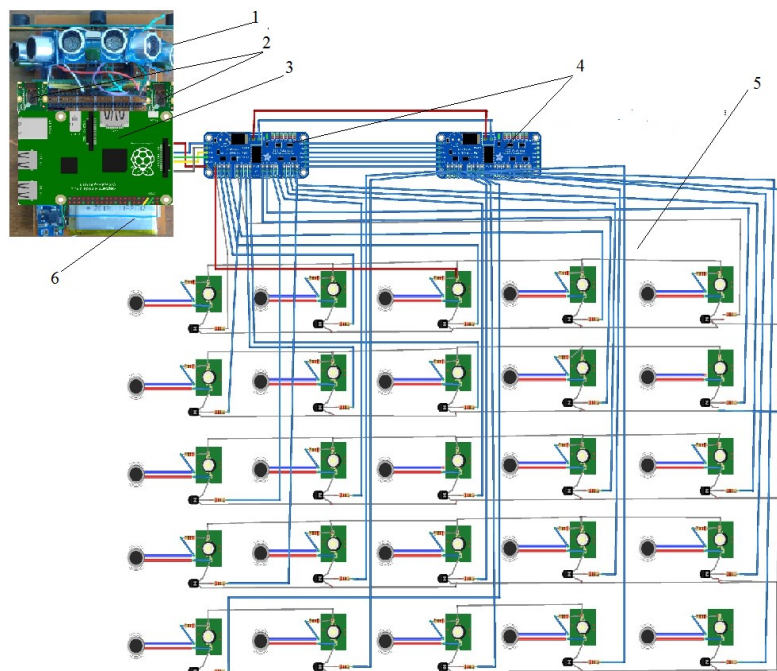


Рис. 2 – Макет системы обнаружения препятствий для слепых на основе Raspberry Pi 3 и STM8L: 1 – плата с STM8L и тремя ультразвуковыми датчиками, 2 – видеокамеры Raspberry Pi, 3 – плата Raspberry Pi 3, 4 – платы ШИМ контроллера, 5 – матрица вибромоторов, 6 – элемент питания

Каждый вибромотор (рис. 2) потребляет до 30 мА, для уменьшения потребления тока вся матрица 5*5 вибромоторов не возбуждается одновременно, а вибрационная картина создается волнами в виде 5-ти вертикальных столбцов, когда одновременно работает только один столбец. Столбцы переключаются слева направо. Один столбец, для четкого чувствования вибрации, вибрирует около 0,1 с., цикл волны примерно 0,5 с., поэтому одновременно работают не 25, а 5 вибромоторов, их ток потребления при этом не превышает $30 \times 5 = 150$ мА.

Плата с Raspberry Pi 3 и STM8L, тремя ультразвуковыми датчиками, видеокамерами, платами ШИМ контроллера и аккумулятором расположена на груди незрячего человека, а матрица вибромоторов, создающих виброрельеф, расположена на специальном жилете в области спины.

Разработка программной части системы

Алгоритм работы квазистереоскопической системы обнаружения препятствий для слепых приведен на рис. 3.

Согласно алгоритму, можно выделить три основных этапа работы с системой:

1) получение текущей информации от подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения препятствий;

2) получение разовой информации от подсистемы создания квазистереоскопического тактильного рельефа на основе стереопары;

3) принятие решения о наличии и общем характере препятствий по анализу совместного воздействия звукового и тактильного каналов информации.

Наличие кнопки «сон» позволяет в ручном режиме отключать более энергоемкую подсистему создания тактильного рельефа с целью снижения энергопотребления и повышения автономности всей системы.

Программная часть подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения препятствий реализована на языке C [14], а подсистемы создания тактильного рельефа – на языке Python. Она содержит следующие программные пакеты:

- пакет *ImageFTC* включает в себя классы, описывающие настройки камер и работу с видеопотоком;

- пакет *DepthMap* включает в себя классы, отвечающие за построение и преобразование карты глубин;

- пакет *Procedding* включает классы, отвечающие за обнаружение препятствий;

- пакет *Result* отвечает за вывод результата пользователю.

Алгоритм построения карты глубин с помощью библиотеки *StereoBM* [19] приведен на рис. 4.

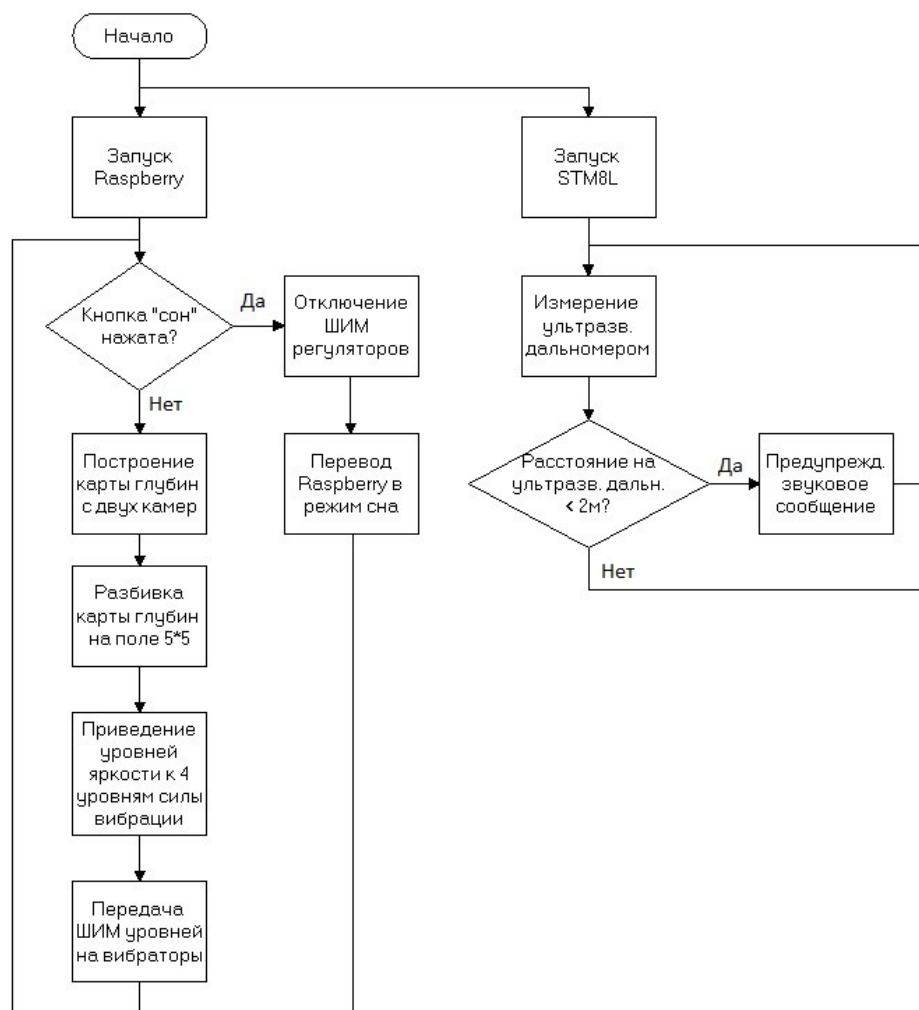


Рис. 3 – Алгоритм работы квазистереоскопической системы обнаружения препятствий для слепых

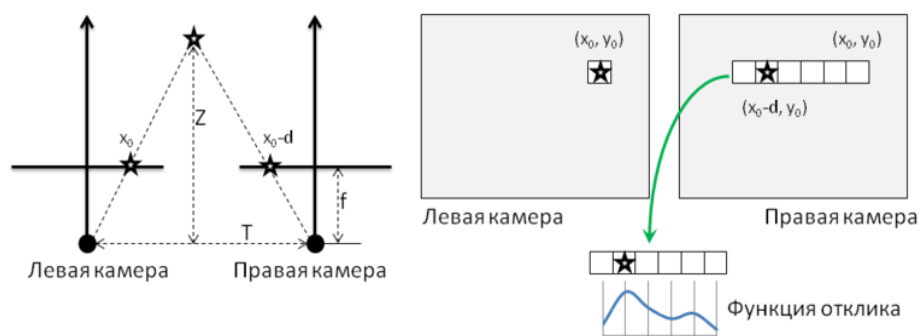


Рис. 4 – Алгоритм построения карты глубин

На входе есть два изображения одной и той же сцены, полученные с камер, находящихся рядом друг с другом, оси которых параллельны (рис. 4). Объекты, находящиеся на дальнем плане, будут на левом и правом изображении находиться практически на одном и том же месте. Изображения более близких объектов будут отличаться – на левом изображении такие объекты находятся правее, а на правом – левее.

Чем ближе объект к камере, тем сильнее будет отличаться его изображение на левом и правом

кадрах. Алгоритм *StereoBM* определяет, насколько изображение объекта смещено на левой и правой картинке. Расстояние смещения называется *disparity*. Чем больше это значение, тем ближе объект к камере.

Функция *StereoBM* берет левую картинку и начинает построчно ее анализировать. На каждой строке алгоритм берет точку или их набор и пытается найти похожий набор точек на этой же строке на правом изображении. После этого он считает,

насколько эти наборы точек смещены друг относительно друга.

Так как алгоритм ведет поиск только в очень маленьком блоке (всего несколько десятков пикселей), исходные расхождения между кадрами стереопары должны быть минимальными, поэтому необходима калибровка камер, (в том числе механическая), и ректификация изображений.

Калибровка камер стереопары с получением фокусных расстояний, построение карты глубин осуществлялась нами с помощью библиотечных функций *OpenCV* [20].

В процессе исследований, были разработаны семь модульных тестов для тестирования программного кода подсистемы создания тактильного рельефа.

Пример теста приведен на рис. 5.

```
class TestClass:
    def test_arraytoff(arr):
        all((arr[:, :, x].T == arr[:, :, x]).all() for x in range(arr.shape[2]))
        (arr.transpose(1, 0, 2) == arr).all()
    def test_tot(p, q):
        R = np.empty((p.shape[0], q.shape[1]))
        for i in range(p.shape[0]):
            for j in range(q.shape[1]):
                rx = p[i, 0] - q[0, j]
                ry = p[i, 1] - q[1, j]
                rz = p[i, 2] - q[2, j]
                R[i, j] = 1 / (1 + math.sqrt(rx * rx + ry * ry + rz * rz))
        return R
```

Рис. 5 – Тестирование программного кода подсистемы создания тактильного рельефа

После калибровки на вход функции *StereoBM* подаются два изображения и два параметра – *numDisparities* и *blockSize* (рис. 6). Первый параметр *numDisparities* указывает, насколько "далеко" алгоритм должен просмотреть строчку правой

картинки в поисках нужного ему фрагмента. Если указать *numDisparities* = 10, то это будет означать, что алгоритм будет "заглядывать" правее на 10 точек. Параметр *blockSize* – это размер блока точек (пятно), в которое алгоритм будет искать корреляцию.

```
disparity = np.zeros((img_width, img_height), np.uint8)
sbm = cv2.StereoBM_create(numDisparities=10, blockSize=21)
```

```
def stereo_depth_map(rectified_pair):
    dmLeft = rectified_pair[0]
    dmRight = rectified_pair[1]
    disparity = sbm.compute(dmLeft, dmRight)
    local_max = disparity.max()
    local_min = disparity.min()
    disparity_grayscale = (disparity - local_min) * (65535.0 / (local_max - local_min))
    disparity_fixtype = cv2.convertScaleAbs(disparity_grayscale, alpha=(255.0 / 65535.0))
    disparity_color = cv2.applyColorMap(disparity_fixtype, cv2.COLORMAP_JET)
    cv2.imshow("Image", disparity_color)
    key = cv2.waitKey(1) & 0xFF
    if key == ord("q"):
        quit()
    return disparity_color
```

Рис. 6 – Инициализация библиотек (*StereoBM*) карты глубин и построение карты смещений

Для визуализации тактильного рельефа в процессе испытаний системы приведен основной цикл программы построения кадра с картой глубин в реальном времени (рис. 7).

Карта глубин строится на основе карты смещений *disparity = stereo_depth_map(rectified_pair)*. Чем больше смещение, тем ближе объект и тем выше его яркость.

```

# capture frames from the camera
for frame in camera.capture_continuous(capture, format="bgra", use_video_port=True,
resize=(img_width,img_height)):
    t1 = datetime.now()
    pair_img = cv2.cvtColor (frame, cv2.COLOR_BGR2GRAY)
    imgLeft = pair_img [0:img_height,0:int(img_width/2)] #Y+H and X+W
    imgRight = pair_img [0:img_height,int(img_width/2):img_width] #Y+H and X+W
    rectified_pair = calibration.rectify((imgLeft, imgRight))
    disparity = stereo_depth_map(rectified_pair)
    # show the frame
    cv2.imshow("left", imgLeft)
    cv2.imshow("right", imgRight)
    t2 = datetime.now()
    print ("DM build time: " + str(t2-t1))

```

Рис. 7 – Код программы построения кадра с картой глубин в реальном времени

После получения карты глубин необходимо отправить информацию с этой карты на матрицу вибромоторов. Код программы, обеспечивающей работу матрицы вибромоторов для реализации тактильного рельефа, приведен на рис. 8.

Итоговая картинка карты глубин имеет разрешение всего 5*5 точек и, по сути, представляет собой массив из 25 переменных *pulse1–pulse25*. Каждая переменная несет информацию о яркости

(близости) до точки препятствия. Значение этой переменной передается в ШИМ контроллер, вызывая вибрацию вибромоторов пропорционально близости до препятствия. Чем ближе препятствие, тем интенсивнее вибрация.

Результат работы программы построения кадра с картой глубин в реальном времени приведен на рис. 9.

```

#Подключение библиотек
import time #Библиотека для работы с таймерами
import smbus #Библиотека для работы с шиной I2C
import PCA9685 #Библиотека для работы с 16 канальной платой ШИМ
import ServoPCA9685

i2cBus = smbus.SMBus(0)
pca9685 = PCA9685.PCA9685(i2cBus)
vibro_motor_00 = ServoPCA9685.ServoPCA9685(pca9685, PCA9685.CHANNEL00)
vibro_motor_01 = ServoPCA9685.ServoPCA9685(pca9685, PCA9685.CHANNEL01)
vibro_motor_02 = ServoPCA9685.ServoPCA9685(pca9685, PCA9685.CHANNEL02)
vibro_motor_03 = ServoPCA9685.ServoPCA9685(pca9685, PCA9685.CHANNEL03)
vibro_motor_04 = ServoPCA9685.ServoPCA9685(pca9685, PCA9685.CHANNEL04)
# Загрузка скважности ШИМ в переменных pulse1–5 для вибромоторов 1-го столбца
for pulse in range(ServoPCA9685.servo_min, ServoPCA9685.servo_max + 1):
    vibro_motor_00.set_pulse(pulse1) #Загрузка ШИМ в вибромотор 1
    vibro_motor_01.set_pulse(pulse2) #Загрузка ШИМ в вибромотор 2
    vibro_motor_02.set_pulse(pulse3) #Загрузка ШИМ в вибромотор 3
    vibro_motor_03.set_pulse(pulse4) #Загрузка ШИМ в вибромотор 4
    vibro_motor_04.set_pulse(pulse5) #Загрузка ШИМ в вибромотор 5
    time.sleep(0.3) #Пауза 0.3 секунды для работы вибромоторов

# Отключение вибромоторов 1-го столбца
vibro_motor_00.disable()
vibro_motor_01.disable()
vibro_motor_02.disable()
vibro_motor_03.disable()
vibro_motor_04.disable()

```

Рис. 8 – Код программы работы вибромоторов 1-го столбца

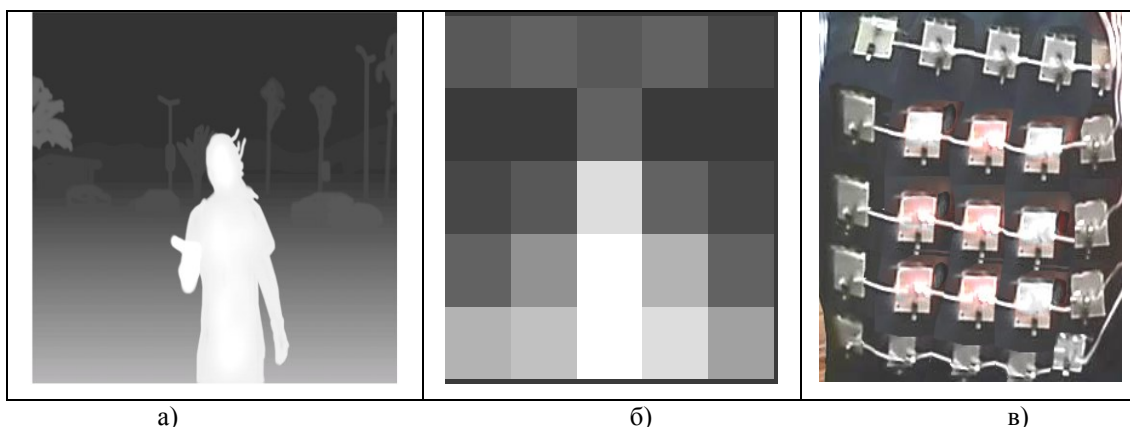


Рис. 9 – Результат работы программы построения кадра с картой глубин в реальном времени: а) кадр карты глубин, на котором более светлые объекты расположены ближе; б) разбивка карты глубин на поле 5*5; в) работа вибромоторов на спине человека, чем ближе объект, тем выше уровень вибрации

Результаты тестирования подтвердили соответствие программного кода общим требованиям к системе.

После тестирования системы проводилась калибровка вибромоторов, при этом к каждому вибромотору был подключен светодиод и вибродатчик, сигналы с которых дублируют и количественно характеризуют уровень сигналов подаваемых на вибромоторы, а также интенсивность вибрации.

Полученные данные позволили провести тренировку человека для приобретения навыков ориентации с помощью вибросигналов.

Анализ результатов исследования

Разработана система квазистереоскопического обнаружения препятствий для слепых с повышенной информативностью, которая состоит из двух подсистем: подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения и подсистемы создания квазистереоскопического тактильного рельефа. Особенностью устройства является возможность коммутации подсистем с автономным источником питания в соответствии с режимом обнаружения препятствий.

Подсистема панорамного ультразвукового обнаружения включает блок ультразвуковых датчиков (три ультразвуковых датчика HC-SR04), микроконтроллер STM8L, блок звуковых излучателей (три элемента Piezo Buzzer 17855). Устройство позволяет определять наличие препятствий прямо перед человеком, а также слева и справа от него в диапазоне расстояний от 0,02 до 3 м в пределах диаграммы направленности ультразвуковых датчиков. Удаленность объекта можно определять на слух по частоте следования звукового сигнала.

Подсистема создания квазистереоскопического тактильного рельефа включает две видеокамеры, микрокомпьютер Raspberry Pi 3, ШИМ контроллер, матрицу из 25 вибромоторов.

Из анализа соотношения цены, энергопотребления и функциональных возможностей, для стереопары были выбраны Raspberry Pi видеокамеры, 8 Мп, 1080 п/720 п, со следующими параметрами: напряжение питания 5 В, ток потребления в режиме тишины 2 мА, ток потребления в рабочем режиме 15 мА, рабочий диапазон обнаружения 0,2–4 м, рабочий угол наблюдения 30°.

В качестве микрокомпьютера был выбран одноплатный компьютер Raspberry Pi 3, с учетом таких важных преимуществ для предлагаемой системы, как цена (около 35 \$), легкая доступность на рынке, возможность разработки приложений, высокая производительность (64-битный процессор с частотой 1,2 ГГц, частота GPU VideoCore 400 МГц, частота работы ОЗУ 900 МГц), интегрированный модуль Wi-Fi, поддерживает Bluetooth 4.1.

Для обеспечения высокого КПД преобразования, сигналы на матрицу вибромоторов поступают с выходов широтно-импульсных модуляторов (ШИМ). ШИМ контроллер представляет собой две платы PCA9685 для подключения вибромоторов. PCA9685 – это 16-канальный 12-битный ШИМ/Серво модуль с I2C интерфейсом для управления сервоприводами.

С учетом требований по весо-габаритным показателям, энергопотреблению, в качестве тактильных раздражителей были выбраны микровибромоторы типа 4X8MM.

С помощью кнопки подачи питания осуществляется отключение подсистемы создания тактильного рельефа, ток потребления которой не менее 500 мА [17], с сохранением работы подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения, ток потребления которой не более 20 мА [14]. Включать подсистему создания тактильного рельефа необходимо на время, достаточное для получения тактильной информации. При этом обеспечивается экономия заряда элемента автономного питания, продление срока его работы без подзарядки, с

сохранением потока панорамной информации от ультразвукового сонара.

Программная часть подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения препятствий реализована на языке *C*, а подсистемы создания тактильного рельефа – на языке *Python*.

Плата с *Raspberry Pi 3* и *STM8L*, тремя ультразвуковыми датчиками, видеокамерами, платами ШИМ контроллера и аккумулятором расположена на груди незрячего человека, а матрица вибромоторов, создающих виброрельеф, расположена на специальном жилете в области спины. Расстояние до препятствия кодируется уровнем вибрации вибромоторов, чем ближе объект, тем интенсивнее вибрация.

Фотография, иллюстрирующая работу системы и расположение матрицы вибромоторов на спине человека, приведена на рис. 9.

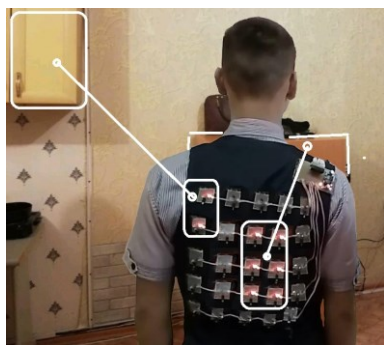


Рис. 9 – Иллюстрация работы квазистереоскопической системы обнаружения препятствий для слепых

На основе анализа результатов исследований установлено, что информативность системы повышается по сравнению с аналогами, при незначительном увеличении энергопотребления системы, которое может регулироваться самим пользователем.

Наличие двух подсистем, подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения и подсистемы создания квазистереоскопического тактильного рельефа, позволяет расширить информативность обнаружения, получать дополнительно к ультразвуковому панорамному, возможность квазистереоскопического обнаружения препятствий, т.е. возможность оценить не только наличие препятствия и расстояние до него, но и получить общую картину нахождения различных предметов в поле зрения системы. По звуковому каналу можно получить информацию о наличии препятствия и расстоянию до него, а по тактильной информации – общую квазистереоскопическую картину местности.

Выводы

Проведен анализ систем обнаружения препятствий для слепых.

Разработана система квазистереоскопического обнаружения препятствий для слепых с повышенной информативностью, которая состоит из двух подсистем: подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения и подсистемы создания квазистереоскопического тактильного рельефа. Повышение информативности обнаружения препятствий осуществляется за счет применения доступных, энергоэффективных микровычислительных средств, таких как одноплатный компьютер *Raspberry Pi 3* и микроконтроллер *STM8L*. Подсистема панорамного ультразвукового обнаружения позволяет определять наличие препятствий и их удаленность по частоте следования звукового сигнала, а подсистема создания квазистереоскопического тактильного рельефа – по интенсивности тактильной информации.

Особенностью устройства является возможность коммутации подсистем с автономным источником питания в соответствии с режимом обнаружения препятствий. С помощью кнопки подачи питания осуществляется отключение подсистемы создания тактильного рельефа на основе одноплатного компьютера *Raspberry Pi 3*, ток потребления которой не менее 500 мА, с сохранением работы подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения на основе микроконтроллера *STM8L*, ток потребления которой не более 20 мА. При этом обеспечивается экономия заряда элемента автономного питания, продление срока его работы без подзарядки.

Разработан алгоритм работы системы квазистереоскопического зрения, включающий алгоритмы работы подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения и подсистемы создания квазистереоскопического тактильного рельефа. Программная часть подсистемы панорамного ультразвукового обнаружения препятствий реализована на языке *C*, а подсистемы создания тактильного рельефа – на языке *Python*. Программная часть подсистемы создания квазистереоскопического тактильного рельефа базируется на четырех основных пакетах, которые обеспечивают достижение поставленной в работе цели. Программным путем формируется совместная работа двух подсистем с целью получения расширенной информации о наличии препятствий и их удаленности.

На основе данных исследований был собран и испытан макет устройства, которое включает и автономный элемент питания на 5 В, в качестве которого может использоваться, на усмотрение пользователя, стандартный *Power Bank*, портативный блок питания, внешний аккумулятор.

Наличие трех ультразвуковых датчиков и двух видеокамер, а также микрокомп'ютера *Raspberry Pi 3* и микроконтроллера *STM8L* позволяет обеспечить квазистереоскопичность и панорамность «зрения», т.е. возможность определять наличие препятствий и

их удаленность, а также получить общую картину в поле «зрения» системы.

На основании анализа результатов исследований установлено, что, после определенного цикла тренировок, слабовидящий человек приобретает способность к лучшей ориентации в пространстве в пределах диаграммы направленности ультразвуковых датчиков и панорамы видеокамер, при этом автономность системы обеспечивается экономным энергопотреблением за счет применения разработанного алгоритма работы системы и современной энергоэффективной аппаратной части.

Список литературы

1. Ежегодно количество слепых в мире растет. URL: <https://www.unian.net/health/country/152550-ejagodno-kolichestvo-slepyih-v-mire-rastet.html> (дата обращения: 03.02.2020).
2. Elmannai W., Elleithy K. Sensor-based assistive devices for visually-impaired people: current status, challenges and future directions. *Sensors (Basel, Switzerland)*. 2017. 17 (3): pii: E565. Published online. doi: 10.3390/s17030565. PMID: 28287451.
3. Ершов С. О., Мейер П., Баки-Бородов Е. Л. Локальные и глобальные программно-аппаратные средства позиционирования и навигации для слепых. *Информатизация и связь*. 2011. № 1. С. 58–62.
4. Ong SK, Zhang J, Nee AY. Assistive obstacle detection and navigation devices for vision-impaired users. *Disability and rehabilitation. Assistive technology*. 2013. 8(5). 409-16. doi: 10.3109/17483107.2012.756946.
5. Cardin S., Thalmann D., Vexo F. Wearable obstacle detection system for visually impaired people. *Virtual Reality Laboratory (VRlab), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*. CH-1015 Lausanne, Switzerland. @epfl.ch.
6. Ильясов Э. С. Вычисление расстояния до наблюдаемого объекта по изображениям со стереопары. *Молодой учёный. Международный научный журнал*. 2016. № 14 (118). С. 146–151.
7. Caraiman S., Zvoristeanu O., Burlacu A., Hergelegiu P. Stereo Vision Based Sensory Substitution for the Visually Impaired. *Sensors (Basel)*. 2019. 19(12). 2771. doi: 10.3390/s19122771.
8. Алтухов, В. Г. Колкер А. Б. Вычисление расстояния до объекта на основе карты глубин полученной методом зеркального разделения изображений. *Автоматика и программная инженерия*. 2017. №1 (19). С. 65–69.
9. Mahdi, Safaa A., Muhsin Asaad H., Al-Mosawi Ali I. Using ultrasonic sensor for blind and deaf persons combines voicealert and vibration properties. *Research Journal of Recent Sciences*. 2012. Vol. 1 (11). P. 50–52.
10. Попов Д. А., Костенко В. Л., Ядрова М. В., Кондратьев С. Б. Разработка мультисенсорного сонара для слепых на основе микроконтроллера STM8L. *Комп'ютерно-інтегровані технології: освіта, наука, виробництво*. Луцьк. 2018. Вип. № 30–31. С. 126–131.
11. Ершов С. О., Майер П. Системы технического зрения с невизуальным представлением пространственной информации. *Известия вузов. Приборостроение*. 2008. Т. 51, № 1. С. 42–47. doi:10.1109/ICDSC.2007.4357528.
12. Brown FE, Sutton J, Yuen HM, Green D. [et al.]. A novel, wearable, electronic visual aid to assist those with reduced peripheral vision. *PLoS One*. 2019. 14(10). e0223755. doi: 10.1371/journal.pone.0223755.
13. Budrionis A, Plukynas D, Daniušis P, Indrulionis A. Smartphone-based computer vision travelling aids for blind and visually impaired individuals: A systematic review. *Assistive Technology*. 2020. 1–17. doi: 10.1080/10400435.2020.1743381.
14. Костенко В. Л., Кондратьев С. Б., Ядрова М. В., Попов Д. О. Энергоэффективная система панорамного ультразвукового обнаружения препятствий для слепых. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: «Нові рішення в сучасних технологіях»*. – Харків НТУ «ХПІ». 2018. №16 (1292). С. 47–56. doi:10.20998/2413-4295.2018.16.07.
15. Кондратьев С. Б., Сіроштан М. В., Костенко В. Л., Ядрова М. В. Комп'ютеризована система орієнтації для людей з вадами зору. *Матеріали VII Міжнародної науково-практичної конференції «Інформація, культура, технології» ІКТ-2019*. Одеса: ОНПУ. 2019. С. 79–80.
16. Одноплатные компьютеры: обзор и сравнение моделей. URL: <https://my-multi.ru/android/odnoplattnye-kompyutery-obzor-i-sravnenie-modelei-odnoplattnye.html> (дата обращения: 03.02.2020).
17. Raspberry Pi – описание, установка ОС, настройка и аксессуары. URL: <https://www.terraelectronica.ru/pdf> (дата обращения: 01.03.2020).
18. PCA9685 – 16-канальный 12-битный PWM/Servo модуль с I2C интерфейсом. URL: <https://micro-pi.ru/pca9685-16-kanalnyy-rwm-servo-i2c> (дата обращения: 01.03.2020).
19. База изображений сравнения различных методов построения карты глубины. URL: <http://vision.middlebury.edu/stereo> (дата обращения: 01.02.2020).
20. Raspberry Pi 3: OpenCV + Python (#1) – установка библиотеки для использования с Python. URL: <http://codius.ru/articles> (дата обращения: 01.02.2020).

References (transliterated)

1. Ezhegodno kolichestvo slepyih v mire rastet [Every year, the number of blind people in the world is growing] Available at: <https://www.unian.net/health/country/152550-ejagodno-kolichestvo-slepyih-v-mire-rastet.html> (accessed 03.02.2020).
2. Elmannai W., Elleithy K. Sensor-based assistive devices for visually-impaired people: current status, challenges and future directions. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 2017, 17 (3), pii: E565, Published online, doi: 10.3390/s17030565, PMID: 28287451.
3. Ershov S. O., Mayer P., Baki-Borodov E. L. Lokalnye i globalnye programmno-apparatnye sredstva pozitsionirovaniya i navigatsii dlya slepyih [Local and global positioning and navigation software and hardware for the blind], *Informatizatsiya i svyaz [Informatization and communication]*, 2011, no. 1, p. 58–62.
4. Ong SK, Zhang J, Nee AY. Assistive obstacle detection and navigation devices for vision-impaired users. *Disability and rehabilitation. Assistive technology*, 2013, 8 (5), 409-16, doi: 10.3109/17483107.2012.756946.
5. Cardin S., Thalmann D., Vexo F. Wearable obstacle detection system for visually impaired people. *Virtual Reality Laboratory (VRlab), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL)*, CH-1015, Lausanne, Switzerland, @epfl.ch.
6. Ilyasov E. S. Vyichislenie rassstoyaniya do nablyudaemogo ob'ekta po izobrazheniyam so stereoparyi, *Molodoy*

- uchYonyiy. *Mezhdunarodnyy nauchnyy zhurnal*, 2016, no. 14 (118), p. 146–151.
7. Caraiman S., Zvoristeanu O., Burlacu A., Hergelegiu P. Stereo Vision Based Sensory Substitution for the Visually Impaired. *Sensors (Basel)*, 2019, 19 (12), 2771, doi: 10.3390/s19122771.
 8. Altuhov V. G., Kolker A. B. Vyichislenie rasstoyaniya do ob'ekta na osnove kartyi glubin poluchennoy metodom zerkalnogo razdeleniya izobrazheniy [Calculation of the distance to the object based on the depth map obtained by mirror image division.] *Avtomatika i programnaya inzheneriya [Automation and software engineering]*, 2017, no. 1 (19), p. 65–69.
 9. Mahdi Safaa A., Muhsin Asaad H. Al-Mosawi Ali I. Using ultrasonic sensor for blind and deaf persons combines voicealert and vibration properties. *Research Journal of Recent Sciences*, 2012, Vol. 1 (11), p. 50–52.
 10. Popov D. A., Kostenko V. L., Yadrova M. V., Kondratev S. B. Razrabotka multisensornogo sonara dlya slepyih na osnove mikrokontrollera STM8L [Development of a multisensory sonar for the blind based on the STM8L microcontroller]. *Komp'yuterno Integrovani tehnologiyi: osvita, nauka, virobnitstvo [Computer-integrated technologies: education, science, production]*, 2018, no. 30–31, Lutsk, p. 126–131.
 11. Ershov S. O., Mayer P. Sistemyi tehnikeskogo zreniya s nevizualnyim predstavleniem prostranstvennoy informatsii [Vision systems with non-visual representation of spatial information]. *Izvestiya vuzov. Priborostroenie [University News. Instrumentation]*, 2008, V. 51, no.1, p. 42–47, doi: 10.1109/ICDSC.2007.4357528.
 12. Brown FE, Sutton J, Yuen HM, Green D. [et al.]. A novel, wearable, electronic visual aid to assist those with reduced peripheral vision. *PLoS One*, 2019, 14 (10), e0223755, doi: 10.1371/journal.pone.0223755.
 13. Budrionis A, Plikynas D, Daniušis P, Indrulis A. Smartphone-based computer vision travelling aids for blind and visually impaired individuals: A systematic review. *Assistive Technology*, 2020, 1–17, doi: 10.1080/10400435.2020.1743381.
 14. Kostenko V. L., Kondratev S. B., Yadrova M. V., Popov D. A. Energoeffektivnaya sistema panoramnogo ultrazvukovogo obnaruzheni preyatstviy dlya slepyih [Energy-efficient panoramic ultrasonic obstacle detection system for the blind] *Visnik NTU «HPI». Seriya: «Novi rishennya v suchasni tehnologiyah» [Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technologies]*, Harkiv NTU «HPI», 2018, no. 16 (1292), p. 47–56, doi:10.20998/2413-4295.2018.16.07.
 15. Kondratev S. B., Siroshstan M. V., Kostenko V. L., Yadrova M. V. Komp'yuterizovana sistema orientatsiyi dlya lyudey z vadami zoru [Computerized orientation system for the visually impaired]. *Materlali VII Mizhnarodnoyi naukovopraktichnoyi konferentsiyi «Informatsiya, Kultura, tehnologiyi» IKT 2019 [Proceedings of the VII International Scientific and Practical Conference "Information, Culture, Technology" ICT 2019]*, Odesa: ONPU, 2019, p. 79–80.
 16. Odnoplatnye kompyutery: obzor i sravnenie modeley [Single-board computers: review and comparison of models]. Available at: <https://my-multi.ru/android/odnoplanye-kompyutery-obzor-i-sravnenie-modelei-odnoplanye.html> (accessed 03.02.2020).
 17. Raspberry Pi – opisanie, ustanovka OS, nastroyka i aksessuary [Raspberry Pi - description, OS installation, setup and accessories]. Available at: <https://www.tterraelectronica.ru/pdf> (accessed 01.03.2020).
 18. PCA9685 – 16-kanalnyy 12-bitnyy PWM/Servo modul s I2C interfeysom [PCA9685 - 16-channel 12-bit PWM/Servo module with I2C interface]. Available at: <https://micro-pi.ru/pca9685-16-kanalnyy-pwm-servo-i2c> (accessed 01.03.2020).
 19. Baza izobrazheniy sravneniya razlichnykh metodov postroyeniya kartyi glubiny [Database comparing different methods of constructing a depth map]. Available at: <http://vision.middlebury.edu/stereo> (accessed 01.02.2020).
 20. Raspberry Pi 3: OpenCV Python – ustanovka biblioteki dlya ispolzovaniya s Python [Raspberry Pi 3: OpenCV + Python (# 1) – installation of a library for use with Python]. Available at: <http://codius.ru/articles> (accessed 01.02.2020).

Сведения об авторах (About authors)

Костенко Виталий Леонидович – доктор технических наук, профессор, Одесский национальный политехнический университет, профессор кафедры металлорежущих станков, метрологии и сертификации; Одесса, Украина; ORCID: 0000-0002-8922-4232; e-mail: kv1777@ukr.net.

Vitaliy Kostenko – doctor of Technical Sciences, Professor, Odessa National Polytechnic University, department of Metal-cutting machines Metrology and Certification; Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8922-4232; e-mail: kv1777@ukr.net.

Кондратьев Сергей Борисович – старший преподаватель, Одесский национальный политехнический университет, кафедра проектного обучения в информационных технологиях; Одесса, Украина; ORCID: 0000-0003-4975-5757; e-mail: kondratiev@onu.ua

Sergey Kondratyev – major teacher, Odessa National Polytechnic University, department of Project Training in Information Technology, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4975-5757; e-mail: kondratiev@onu.ua.

Ядрова Марина Васильевна – кандидат технических наук, доцент, Одесский национальный политехнический университет, доцент кафедры информационных систем, Одесса, Украина; ORCID: 0000-0001-7517-496X; e-mail: yadrova@onu.ua

Marina Yadrova – Associate Professor, Odessa National Polytechnic University, Department of Information Systems, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0001-7517-496X; e-mail: yadrova@onu.ua

Стельмах Диана Евгеньевна – магистрант, Одесский национальный политехнический университет, кафедра информационных систем, Одесса, Украина; e-mail: rebeldi98@gmail.com

Diana Stelmakh – Graduate Student, Odessa National Polytechnic University, Department of Information Systems, Odessa, Ukraine; e-mail: rebeldi98@gmail.com

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Костенко В. Л., Кондратьев С. Б., Ядрова М. В., Стельмах Д. Е. Квазистереоскопическая система обнаружения препятствий для слепых на базе RASPBERRY PI 3 и STM8L. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 6 - 5. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.09.

Please cite this article as:

Kostenko, V., Kondratyev, S., Yadrova, M., Stelmakh, D. Quasistereoscopic obstacle detection system for the blind on the basis RASPBERRY PI 3 and STM8L. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 6 - 5, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.09.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Костенко В. Л., Кондратьев С. Б., Ядрова М. В., Стельмах Д. Е. Квазістереоскопічна система виявлення перешкод для сліпих на базі RASPBERRY PI 3 і STM8L. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 6 - 5. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.09.

АНОТАЦІЯ Розроблено квазістереоскопічну систему для виявлення перешкод для сліпих з підвищеною інформативністю. Підвищення інформативності здійснюється за рахунок застосування одноплатного комп'ютера Raspberry Pi 3 і мікроконтролера STM8L. Підсистема панорамного ультразвукового виявлення дозволяє визначати наявність перешкод і їхню віддаленість за частотою проходження звукового сигналу, а підсистема створення тактильного рельєфу – за інтенсивністю тактильної інформації. У пристрої передбачена можливість комутації підсистем з джерелом живлення відповідно до режиму виявлення перешкод. За допомогою кнопки подачі живлення здійснюється відключення підсистеми створення тактильного рельєфу, струм споживання якої не менше 500 мА, зі збереженням роботи підсистеми ультразвукового виявлення перешкод, струм споживання якої не більше 20 мА, при цьому забезпечується економія заряду елемента автономного живлення, продовження терміну його роботи без підзарядки. Наведено результати розробки програмної моделі – алгоритм роботи системи, код програми побудови кадру з картою глибин у реальному часі, код програми роботи вібромоторів, модульні тести для тестування програмного коду підсистеми створення тактильного рельєфу. На основі даних досліджень був зібраний і випробуваний макет пристрою. Після певного циклу тренувань, слабовидюча людина набуває здатності до кращої орієнтації в просторі. Автономність системи забезпечується економним енергоспоживанням за рахунок застосування розробленого алгоритму роботи системи і сучасної енергоефективної апаратної частини.

Ключові слова: відеокамера; Raspberry Pi; ШІМ контролер; вібромотор; ультразвуковий датчик; карта глибин

Поступила (received) 08.05.2020

УДК 004.94

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.10

MATHEMATICAL MODEL OF SERVER REQUESTS INTENSITY DESCRIPTION

P. PUSTOVOITOV^{1*}, K. KOSTYK², V. KOMPANIETS¹, V. VORONETS¹, H. HAIDAR¹¹Information Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE²Foundry Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

*e-mail: p.pustovoitov@gmail.com

ABSTRACT The paper is devoted to the mathematical model development of non-stationary flow of requests from clients to the database in order to modulate the quality of service. The mathematical model of the queries number fluctuations to the database has the form of a regression equation and allows more accurate modeling of the connections pool size in the servlet. Connection pool is a pattern that helps to reduce responding time for queries to databases. To another hand the extra used memory wasting server resources. The task of calculating the optimal connection pool size could be solved by verity of mathematical apparatuses that demand information about intensity of stationary incoming queries flow. It is known, that real incoming queries flow is non-stationary. In the paper was suggested mathematical model of flow intensity fluctuations with daily and hourly harmonic vibrations. Statistics analyses of model adequacy was made, homogeneity of variances is checked, the significance of the coefficients of the regression equation was estimated. The obtained mathematical model describes fluctuations in the intensity of clients' requests to the servlet during the week. The mathematical model can be used to predict the load on the server or to build a simulation model of the query service system. The adequacy of the model is checked, the homogeneity of variances is checked, the significance of the coefficients of the regression equation is estimated, the adequacy of the regression equation is checked, the analysis of the autocorrelation of the residues is carried out. The results obtained in the article give further development for modeling process technologies in the field of information systems and can be used to calculate the load on the server with a non-stationary flow of requests from clients to the database.

Keywords: connection pool simulation; query intensity fluctuation; regression equation; statistic analyses

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ОПИСУ ІНТЕНСИВНОСТІ ЗАПИТІВ ДО СЕРВЕРА

П. Є. ПУСТОВОЙТОВ^{1*}, К. О. КОСТИК², В. О. КОМПАНИЄЦЬ¹, В. М. ВОРОНЕЦЬ¹,
Х. ХАЙДАР¹¹Кафедра «Системи інформації», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА²Кафедра «Ливарне виробництво», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

АНОТАЦІЯ Робота присвячена побудові математичної моделі нестационарного потоку запитів клієнтів до бази даних із метою подальшого моделювання показників якості обслуговування. Математична модель коливання кількості запитів до бази даних має вигляд рівняння регресії та дозволяє більш точно проводити моделювання розміру пулу з'єднань у сервлеті. Пул з'єднань - це схема, яка допомагає скоротити час відповіді на запити до баз даних. З іншого боку, додатково використовуються серверні ресурси, що витрачають пам'ять. Завдання обчислення оптимального розміру пулу підключень могло бути вирішене достовірно за допомогою математичних апаратів, які вимагають інформації про інтенсивність потоку стаціонарних вхідних запитів. Відомо, що потік реальних вхідних запитів є нестационарним. У статті запропонована математична модель коливань інтенсивності потоку з добовими та погодинними гармонічними коливаннями. Проведено статистичний аналіз адекватності моделі, перевірено однорідність дисперсій, оцінено значення коефіцієнтів рівняння регресії. Отримана математична модель описує коливання інтенсивності запитів клієнтів до сервлету протягом тижня. Математичну модель можна використовувати для прогнозування навантаження на сервер або для побудови імітаційної моделі системи обслуговування запитів. Перевірено адекватність моделі, перевірено однорідність дисперсій, оцінено значущість коефіцієнтів рівняння регресії, перевірено адекватність рівняння регресії, проведено аналіз автокореляції залишків. Отримані у статті результати дають подальший розвиток технологіям моделювання процесів у інформаційних системах та можуть бути використані при обчисленні навантаження на сервер при нестационарному потоку запитів від клієнтів до бази даних.

Ключові слова: моделювання пулу підключень; коливання інтенсивності запитів; рівняння регресії; статистичний аналіз

Introduction

Connection pool in servlet is a cache of database connections maintained in memory so that the connections can be reused when future requests to the database are required. Separate database connection is fairly expensive operation; here are the sequences of steps involved into a typical database connection life cycle:

1. Opening a connection to the database using the database driver.
2. Opening a TCP socket for data manipulating (reading/writing).
3. Data manipulating (reading/writing) over the socket.

4. Closing the connection.
5. Closing the socket.

Instead of performing this list of operations every time when client sends a request, it is better to implement a database connection pool, which allows to reuse a number of existing connections, the cost of performing a huge number of expensive database trips can be effectively saved, boosting the overall performance of implemented database-driven application.

Connection pools can be tuned to maximize performance, while keeping resource utilization below the point where application will start to fail rather than just run slower. It is very good concept for those web application

where number of users operate at the same time, where many connections are required at the same time, this process of creating new connection every time makes server too be busy so that performance decreases, although connection pooling method manages all the connection required by users [1].

The aim of the study

Construction of a mathematical model of non-stationary flow of user requests to the database based on the obtained statistical information about the intensity of queries and time of their execution.

Statement of the main material

Literature review. Database connection as a key resource to interact with the database is particularly important in the applications especially, in web application of multi-user. Database connection pool technology is proposed to solve the problem of frequently creating and releasing database connection that reduces the system performance in software system. An important problem in database connection pool technology is how to configure the parameters of the connection pool in order to make the software system at the optimal performance [2].

The purpose of connection pools is to enhance the performance of executing queries on database, but connection pool requires extra memory size for every extra connection kept long time in memory. In this way arises the task to find out the optimal number of opened connections in connection pool. This task can be solved, for example, using queuing theory [3] under the assumption that the intensity of the incoming and outgoing query flows [4] are known. The intensity of queries can be estimated using statistics from server but their intensities very in day time and in days of the week [5-6]. So, the task of the paper is to develop the mathematical model of query flows intensity depending on a time.

In [7] is given a quantitative data about the improvement of the performance of the database access based on the connection pool through performance contrast tests under three different kinds of database access modes. In [8] was proposed the optimal allocation method of database connection pool based on the log file records. In [9] was given the configuration method in detail for database connection pool parameter configuration based on XML under J2EE frame study. In [10 -14] was made a study and have obtained some significant results from database connection pool technology.

The performance analysis methods of database connection pool technology can be divided into three categories: Experimental data analysis [15], simulation study method [16] and mathematical model analysis methods [17]. In this study [18], the mathematical model analysis method is used for the database connection pool technology to establish a discrete-time multi-server queuing model. The analysis of classical discrete-time queuing model is shown in [19].

Connection pools include a set of properties that are used to control the size of the pool [20]. The properties

allow the number of connections in the pool to increase and decrease as demand increases and decreases. This dynamic behavior helps conserve system resources that are otherwise lost [21] on maintaining unnecessary connections [22].

Model developing. The actual incoming request flows from the client to the servlet are non-stationary. A direct analysis of the observations of the calls reveals the presence of weekly and daily fluctuations in the intensity of calls. Let's divide the entire observation interval into a set of subintervals of length Δ (for example, $\Delta = 1 \text{ hour}$). Let's calculate the number of calls received within each sub-interval. Let's process the aggregate random requests number which arrive at the same time-point of day and on the same day of the week (for example, all time intervals from 10:00 till 11:00 every Monday). Let's calculate the average value and variance of the number of servlet calls that arrive during each of the sub-intervals. In this case, we obtain the totality of the average values m_1, m_2, \dots, m_n of the number of requests and their variances $\sigma_1^2, \sigma_2^2, \dots, \sigma_n^2$, $n = 24 \cdot 7 = 168$.

Let's input b_0 - the average number of requests to the server during the day, b_1 - the amplitude of the daily fluctuations of the number of requests, b_2 - the amplitude of the weekly fluctuations of the number of requests. Then, the model which describes the dependence of the average intensity of incoming requests on time is represented by relation (1).

$$\begin{aligned} \lambda(t) &= \\ &= \left(b_0 + b_1 \sin \frac{2\pi}{24} t \right) \left(1 + b_2 \sin \frac{2\pi}{168} t \right) \\ &= b_0 + b_1 \sin \frac{2\pi}{24} t + b_2 b_0 \sin \frac{2\pi}{168} t \\ &+ b_1 b_2 \sin \frac{2\pi}{24} t \sin \frac{2\pi}{168} t = \\ &= a_0 + a_2 \sin \frac{2\pi}{24} t + a_2 \sin \frac{2\pi}{168} t \\ &+ a_3 \sin \frac{2\pi}{24} t \sin \frac{2\pi}{168} t \end{aligned} \quad (1)$$

Model (1) parameters a_0, a_1, a_2 are calculated using data from real observations by least squares method. Let's input the functional

$$\begin{aligned} J &= \sum_{k=1}^n [m_k - \lambda(t_k)]^2 \\ &= \sum_{k=1}^n \left[m_k \right. \\ &- \left(a_0 + a_2 \sin \frac{2\pi}{24} t_k + a_2 \sin \frac{2\pi}{168} t_k \right. \\ &\left. \left. + a_3 \sin \frac{2\pi}{24} t_k \sin \frac{2\pi}{168} t_k \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2)$$

The adequacy of the model is checked according to the Fisher criterion [23], taking into account the analysis of residues autocorrelation [23].

Model parameters calculating. Let's rewrite the functional (2) in matrix form. Let's input the matrix H and vectors A, M :

$$H = \begin{pmatrix} 1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 & \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 \sin \frac{2\pi}{168} t_1 \\ 1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_2 & \sin \frac{2\pi}{168} t_2 & \sin \frac{2\pi}{24} t_2 \sin \frac{2\pi}{168} t_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_n & \sin \frac{2\pi}{168} t_n & \sin \frac{2\pi}{24} t_n \sin \frac{2\pi}{168} t_n \end{pmatrix},$$

$$A = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix}, M = \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \dots \\ m_n \end{pmatrix}.$$

Then

$$J = (HA - M)^T (HA - M). \quad (3)$$

Minimizing (3) over the vector A , the desired vector of regression equation estimates is obtained

$$A = (H^T H)^{-1} H^T M. \quad (4)$$

Moreover, so as

$$H^T H = \begin{pmatrix} 1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 & \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 \sin \frac{2\pi}{168} t_1 \\ \sin \frac{2\pi}{24} t_1 & \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_1 \sin \frac{2\pi}{168} t_1 \\ \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_1 \\ \sin \frac{2\pi}{24} t_1 \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_1 \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_1 \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_1 \end{pmatrix} \times$$

$$\times \begin{pmatrix} 1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 & \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_1 \sin \frac{2\pi}{168} t_1 \\ 1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_2 & \sin \frac{2\pi}{168} t_2 & \sin \frac{2\pi}{24} t_2 \sin \frac{2\pi}{168} t_2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_n & \sin \frac{2\pi}{168} t_n & \sin \frac{2\pi}{24} t_n \sin \frac{2\pi}{168} t_n \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} n & \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{24} t_k & \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{24} t_k \sin \frac{2\pi}{168} t_k \\ \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{24} t_k & \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_k & \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{24} t_k \sin \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_k \sin \frac{2\pi}{168} t_k \\ \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{24} t_k \sin \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{24} t_k \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_k \\ \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{24} t_k \sin \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_k \sin \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin \frac{2\pi}{24} t_k \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_k \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_k \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} n & 0 & 0 & 0 \\ \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_k & \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_k \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_k & \sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_k \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_k \end{pmatrix},$$

then

$$(H^T H)^{-1} = \begin{pmatrix} n^{-1} & 0 & 0 & 0 \\ \left(\sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_k \right)^{-1} & \left(\sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_k \right)^{-1} & \left(\sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_k \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_k \right)^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} \eta_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \eta_{22} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \eta_{33} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \eta_{44} \end{pmatrix}.$$

Then

$$\begin{aligned}
 A &= \begin{pmatrix} \eta_{11} & & & 0 \\ & \eta_{22} & & \\ & & \eta_{33} & \\ 0 & & & \eta_{44} \end{pmatrix} \times \\
 &\times \begin{pmatrix} 1 & 1 & \dots & 1 \\ \sin \frac{2\pi}{24} t_1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_2 & \dots & \sin \frac{2\pi}{24} t_n \\ \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin \frac{2\pi}{168} t_2 & \dots & \sin \frac{2\pi}{168} t_n \\ \sin \frac{2\pi}{24} t_1 \sin \frac{2\pi}{168} t_1 & \sin \frac{2\pi}{24} t_2 \sin \frac{2\pi}{168} t_2 & \dots & \sin \frac{2\pi}{24} t_n \sin \frac{2\pi}{168} t_n \end{pmatrix} \begin{pmatrix} m_1 \\ m_2 \\ \dots \\ m_4 \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} \eta_{11} & & & 0 \\ & \eta_{22} & & \\ & & \eta_{33} & \\ 0 & & & \eta_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sum_{k=1}^n m_k \\ \sum_{k=1}^n m_k \sin \frac{2\pi}{24} t_n \\ \sum_{k=1}^n m_k \sin \frac{2\pi}{168} t_n \\ \sum_{k=1}^n m_k \sin \frac{2\pi}{24} t_n \sin \frac{2\pi}{168} t_n \end{pmatrix} = \\
 &= \begin{pmatrix} \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n m_k \\ \frac{1}{\sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_n} \sum_{k=1}^n m_k \sin \frac{2\pi}{24} t_n \\ \frac{1}{\sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_n} \sum_{k=1}^n m_k \sin \frac{2\pi}{168} t_n \\ \frac{1}{\sum_{k=1}^n \sin^2 \frac{2\pi}{24} t_n \sin^2 \frac{2\pi}{168} t_n} \sum_{k=1}^n m_k \sin \frac{2\pi}{24} t_n \sin \frac{2\pi}{168} t_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{pmatrix} \quad (5)
 \end{aligned}$$

As a result of calculations according to formula (5), taking into account real values of m_k , $k = 1, 2, \dots, n$, we obtain

$$A = \begin{pmatrix} 3.16 \cdot 10^5 \\ 1.28 \cdot 10^5 \\ 0.46 \cdot 10^5 \\ 0.21 \cdot 10^5 \end{pmatrix}.$$

Let us make a statistical analysis of the observations processing results. This procedure contains several steps.

The discussion of the results

Dispersions homogeneity checking. As at each point in the factor space of the variable t_k , $k = 1, 2, \dots, m$ possible values a series of observations was carried out containing 6 repeated experiments, the experiments results have the form:

$$X = \begin{pmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1m} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2m} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{61} & x_{62} & \dots & x_{6m} \end{pmatrix}.$$

Here we have:

x_{ik} - random value of the observed variable at the k -th point of the experiment, obtained at the i -th week, $i = 1, 2, \dots, 6$, $k = 1, 2, \dots, m$.

For each column of the matrix X , let's average the results of repeated experiments for the observed variable and calculate the variances of these results

$$m_k = \frac{1}{q} \sum_{i=1}^6 x_{ik}, \quad \sigma_k^2 = \frac{1}{q-1} \sum_{i=1}^6 (x_{ik} - M_k)^2, \\ k = 1, 2, \dots, m, \quad q = 6.$$

The dispersions homogeneity is checked by the Fisher criterion. For this let's find out

$$\sigma_{\max}^2 = \max_k \{\sigma_k^2\}, \sigma_{\min}^2 = \min_k \{\sigma_k^2\}$$

and calculate

$$F_p = \frac{\sigma_{\max}^2}{\sigma_{\min}^2}.$$

The obtained value of the F_p criterion let's compare with the critical in the Fisher distribution table for a given significance level $\alpha = 0.05$ and the number of degrees of freedom ν_1 and ν_2 of the numerator and denominator, which is equal to the number of repeated experiments minus the number of estimated parameters (in this case we have $\nu_1 = \nu_2 = q - 1$).

Moreover, if $F_p < F_{kp}$, then the hypothesis of homogeneity is accepted, otherwise it should be rejected and steps for homogeneity improvement should be done (for example, to make additional experiments at a point with maximum dispersion) [24].

In the considering problem eliminating of the dispersions heterogeneity by providing additional experiments is impossible. Moreover, to evaluate the parameters of the regression equations in the case of dispersion heterogeneity, the usage of least square method in the form (4) is incorrect. In order to take into account, the differences in the experimental variances, let's input the dispersion matrix

$$D = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & & & 0 \\ & \sigma_2^2 & & \\ & & \ddots & \\ 0 & & & \sigma_n^2 \end{pmatrix}.$$

Using it the functional on least squares (3) transforms to

$$J = (HA - M)^T D^{-1} (HA - M).$$

This functional minimization on model parameters vector A leads to equation

$$\hat{A} = (H^T D^{-1} H)^{-1} H^T D^{-1} M. \quad (6)$$

If the homogeneity hypothesis is accepted, then the variance of the experiments is averaged by the formula

$$s_0^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sigma_k^2 \quad (7)$$

and thus, a dispersion of reproducibility of the experiment is obtained. Moreover, here $f_0 = n(q - 1)$ - is the number of degrees of freedom.

So, if during the calculation of the variance reproducibility of the experiment, the homogeneity of the variances at different points of the factor space was established, then using the relations (4), the coefficients of the regression equation (1) are calculated. If the heterogeneity of dispersions is revealed, then for evaluating the components of the vector A is necessary to use formula (6).

In current task we have $\sigma_{\max}^2 \sigma_{\min}^2$. Wherein $F_p = 1,516$. According to the table of critical points of Student

distribution for the significance level $\alpha = 0,05$ and the number of degrees of freedom $q - 1 = 5$, we obtain $F_{kp} = 2,57$. So, as $F_p < F_{kp}$ the experiment is homogeneous. After averaging the variances, we obtain the reproducibility dispersion $s_0^2 = 3.74 \cdot 10^5$.

After calculating the coefficients of the regression equation, let's proceed directly to the statistical analysis of the results, which is carried out in two stages:

1. Assessment of the coefficients significance of the regression equation.

2. Assessment of the model adequacy.

Let's run into their consideration.

Assessment of the coefficients significance of the regression equation. Firstly, let's calculate the accuracy variance of the regression coefficient estimates. For this let's calculate the covariance matrix of calculating errors of the regression equation parameters by the formula:

$$\Psi = s_0^2 (H^T H)^{-1} = s_0^2 \begin{pmatrix} \sigma_{a_0}^2 & cov(a_0, a_1) & \dots & cov(a_0, a_m) \\ cov(a_1, a_0) & \sigma_{a_1}^2 & \dots & cov(a_1, a_m) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ cov(a_m, a_0) & cov(a_m, a_1) & \dots & \sigma_{a_m}^2 \end{pmatrix}.$$

In current task

$$(H^T H)^{-1} = \begin{pmatrix} \eta_{11} & & 0 \\ & \eta_{22} & \\ 0 & & \eta_{33} \\ & & & \eta_{44} \end{pmatrix}.$$

So

$$\Psi = \begin{pmatrix} s_0^2 \eta_{11} & & 0 \\ & s_0^2 \eta_{22} & \\ & & s_0^2 \eta_{33} \\ 0 & & & s_0^2 \eta_{44} \end{pmatrix}.$$

Lets

a_i - is the real value of the i -th coefficient of the regression equation,

\hat{a}_i - assessment of this value according to the experiment results.

Then the random variable

$$T_i = \frac{|\hat{a}_i - a_i|}{\sigma_{a_i}}. \quad (8)$$

is distributed according to Student's law with $\sum_{j=1}^n (q_j - 1)$ degrees of freedom. Let's create the confidence interval for a_i . Let ε_{a_i} - will be a half of this interval. Let's take ε_{a_i} so that $P(|\hat{a}_i - a_i| < \varepsilon_{a_i}) = \gamma$, where γ is the confidence probability. Let's consider the left part of this equation to a random variable T_i :

$$P\left(\frac{|\hat{a}_i - a_i|}{\sigma_{a_i}} < \frac{\varepsilon_{a_i}}{\sigma_{a_i}}\right) = \gamma$$

or

$$P\left(T_i < \frac{\varepsilon_{a_i}}{\sigma_{a_i}}\right) = \gamma.$$

Using tables of T-distribution, let's find t_{a_i} so, that

$$P(T_i < t_{a_i}) = \gamma.$$

Then

$$\frac{\varepsilon_{a_i}}{\sigma_{a_i}} = t_{a_i}.$$

Wherein $\varepsilon_{a_i} = \sigma_{a_i} t_{a_i}$ and $|\hat{a}_i - a_i| < \sigma_{a_i} t_{a_i}$ or

$$\hat{a}_i - \sigma_{a_i} t_{a_i} < a_i < \hat{a}_i + \sigma_{a_i} t_{a_i}. \quad (9)$$

Thus, a confidence interval is found $[\hat{a}_i - \sigma_{a_i} t_{a_i}, \hat{a}_i + \sigma_{a_i} t_{a_i}]$, which cover the real value of coefficient a_i with probability not less than γ .

Further, it is believed that a_i coefficient is significant with reliability γ if the corresponding confidence interval does not cover zero. Otherwise, this coefficient should be considered as insignificant and equal it to zero. The corresponding factor should be excluded from the regression equation.

In current task we have

$$(H^T H)^{-1} = \begin{pmatrix} 6,9 \cdot 10^{-3} & & & 0 \\ & 2,1 \cdot 10^{-3} & & \\ & & 1,4 \cdot 10^{-3} & \\ 0 & & & 0,72 \cdot 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Then

$$\Psi = \begin{pmatrix} 2,59 \cdot 10^3 & & & 0 \\ & 7,88 \cdot 10^2 & & \\ & & 5,25 \cdot 10^2 & \\ 0 & & & 2,62 \cdot 10^2 \end{pmatrix}$$

So, as critical value $t_a = 1.98$ (with confidence probability $\gamma = 0.95$), then

$$\begin{aligned} \varepsilon_{a_0} &= \sigma_{a_0} \cdot t_a = 100.8, \\ \varepsilon_{a_1} &= \sigma_{a_1} \cdot t_a = 55.59, \\ \varepsilon_{a_2} &= \sigma_{a_2} \cdot t_a = 45.37, \\ \varepsilon_{a_3} &= \sigma_{a_3} \cdot t_a = 32.05. \end{aligned}$$

Moreover, in all cases, the confidence interval does not cover zero and, therefore, all the coefficients of the regression equation (1) are significant.

Checking the adequacy of the regression equation.

To check the adequacy of the regression equation obtained after discarding insignificant factors, it is necessary, in addition to reproducibility variance, to calculate the adequacy variance which characterizes the degree of deviation of the regression line from the value of the response function at the points of the factor space corresponding to the performed experiments. The adequacy variance is calculated by the formula

$$\begin{aligned} s_{ad}^2 &= \frac{1}{n-\ell} \sum_{j=1}^n (\bar{y}_j - \\ \sum_{i=0}^{\ell-1} \hat{a}_i x_{ji})^2 &= \frac{1}{n-\ell} \sum_{j=1}^n (m_k - \lambda(t_k))^2. \end{aligned} \quad (10)$$

For the s_{ad}^2 calculation, let's use the response function values averaged over the results of repeated experiments \bar{y}_j , $j = 1, \dots, n$. Therefore, the variance of the adequacy does not depend on the variance of the measurement errors. In relation (10) ℓ - is the number of terms in the regression equation remaining after the significance assessment. Thus, the adequacy variance characterizes the residual sum of squares of the results deflection of real experiments from the created regression equation per one free experiment (i.e., one degree of freedom). Now, the adequacy of the obtained regression equation is checked according to the Fisher test, comparing the equation

$$F_P = \frac{s_{ad}^2}{s_0^2}$$

with critical value

$$F_P < F_{kp}. \quad (11)$$

For the number of degrees of freedom $f_{ad} = n - \ell$ и $f_0 = \sum_{j=1}^n (q_j - 1)$ set value of significance α .

If inequality (11) holds, then the regression equation is considered as adequate; otherwise, it is not.

Adopting the hypothesis of adequacy is equivalent to accepting the hypothesis of equality of variances of adequacy and reproducibility. The adequacy of the regression equation shows that the scattering of experimental data relative to the regression equation is of the same order as the scattering associated with experimental accuracy. Moreover, the deviation of the experimental points relative to the constructed regression equation is explained precisely by these errors, and not by the erroneous hypothesis about the structure of the model. In the considered problem a direct calculation of the variance of adequacy by formula (10) gave the following result $\sigma_{ad}^2 = 4,17 \cdot 10^5$. In this case, the calculated value of the Fisher test

$$F_p = \frac{4,17 \cdot 10^5}{3,75 \cdot 10^5} = 1,083.$$

So, as a critical value of Fisher's criterion for $\alpha = 0,05$ equals to $F_{kp} = 2,38$, and $F_p < F_{kp}$, consequently current model is adequate.

The residuals autocorrelation analyses. The residuals autocorrelation in the trend deflections could be detected using the Darbin-Watson statistic, which can be calculated by the formula

$$d = \frac{\sum_{j=1}^n (\xi_{j+1} - \xi_1)^2}{\sum_{j=1}^n \xi_j^2}. \quad (12)$$

Where ξ_j - deflection from trend in j -th observation.

The values distribution of the Darbin-Watson statistic is given in the table.

Let's compare the calculated value of the criterion d with the tabular d_1, d_2 . The following cases are possible:

- if $d < d_1$, the hypothesis of the autocorrelation absence is rejected (positive correlation is present);

- if $d_2 < d < 4 - d_2$, the hypothesis of the autocorrelation absence is accepted;
- if $d_1 \leq d \leq d_2$ or $4 - d_2 \leq d \leq 4 - d_1$, then further researches are necessary (for example, on a larger number of observations);
- if $d > 4 - d_1$, then the hypothesis of the correlation absence is rejected (negative correlation is present).

Relation (12) directly follows from the relation used to detect the random process autocorrelation presence $\xi(t)$. This equation has the form

$$r(t) = \frac{M[(\xi(t+1)-m(t+1))-(\xi(t)-m(t))]^2}{M[(\xi(t)-m(t))^2]}. \quad (13)$$

Let's rewrite (13) as a follow

$$\begin{aligned} r(t) &= \frac{M[(\xi(t) - m(t))^2] + M[(\xi(t+1) - m(t+1))^2]}{M[(\xi(t) - m(t))^2]} - \\ &- \frac{2M[(\xi(t) - m(t))(\xi(t+1) - m(t+1))]}{M[(\xi(t) - m(t))^2]} = \\ &= \frac{D(t+1) + D(t) - 2K(t, t+1)}{D(t)}. \end{aligned} \quad (14)$$

Here $D(t)$, $D(t+1)$ - process variation at time points t and $t+1$; $K(t, t+1)$ - covariation between random values of process at time points t and $t+1$.

If the process is stationary, then $D(t) \cong D(t+1)$ and (14) can be approximately changed as follows:

$$r(t) \cong 2 - 2k(t, t+1),$$

where $k(t, t+1)$ - correlation coefficient between random process values at time points t and $t+1$.

Concerning to this fact, it is clear that if the correlation between these random values is absent (or small), then the value of $r(t)$ is approximately equals to 2.

If the correlation coefficient increases, the value of $r(t)$ decreases, approaching to zero (for a positive correlation), or four (for a negative correlation).

It is clear that (12) is a special case of (13) when the process is observed at discrete time instants $j = 1, 2, \dots, n$ and obtained residues autocorrelation after trend exclusion is analyzed.

In considered problem $d_1 = 1,41$, $d_2 = 1,72$, and the value of the Darbin-Watson statistic $d = 1,87$. Therefore, it should be considered that there is no autocorrelation of residues, confirming the conclusion about the adequacy of the model.

Conclusions

The obtained mathematical model describes fluctuations in the intensity of clients' requests to the servlet during the week. The mathematical model can be used to predict the load on the server or to build a simulation model of the query service system. The adequacy of the model is checked, the homogeneity of variances is checked, the significance of the coefficients of the regression equation is estimated, the adequacy of the regression equation is checked, the analysis of the autocorrelation of the residues is carried out.

Список літератури

1. Ankit Kr. Tiwari, Surendra Yadav, Manish Mathuria, Manish Sharma, Hemlata Chaudhary. Performance Optimization of Web Applications using Connection Pooling. *Proceedings of International Conference on Innovations in information Embedded and Communication Systems (ICIECS'16)*. 2016.
2. Chen S., Liu Y., Gorton I., Liu A. Performance prediction of component-based applications. *Journal of Systems and Software*. 2005. 74(1). P. 35-43. doi: 10.1016/j.jss.2003.05.005.
3. Donald Gross, John F. Shortle, James M. Thompson, Carl M. Harris. *Fundamentals of Queueing Theory 4th Edition*. New Jersey: Wiley, 2008.
4. Ancans A., Petersons E., Ipatovs A. Vehicular wireless network access controller parameter estimation. In *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL) IEEE (2017, November)*. p. 2152-2159. doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293496.
5. Pustovoitov P., Sokol G., Hroza P., Tyrtysnikov O., Rvachova N. Mathematical Model of Single-Channel Infocommunication Node with Several Packet Flows. *Proceedings of 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology*. 2018. P. 166-170. doi: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632128.
6. Pustovoitov P., Sokol G. The model of dual channel network node with shared memory. *Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies*. 2017. P. 266-269. doi: 10.1109/AIACT.2017.8020116.
7. Li B. Z., Wu F. S., Jing Z. J. and Huang H. J. Self-adaptive database connection pool technology in NVMS. *Comput. Eng.* 2008. No. 23. P. 41-43.
8. Liang Q. H., Shen Z. F., Luo J. C., Fan H., Ming D. P., Li J. L. Study of database connection pool in LBS platform. *Comput. Eng.* 2006. No. 32. P. 39-41.
9. Liu F. A method of design and optimization of database connection pool. *Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, August 26-27 2012, Nanchang, Jiangxi*. 2012. V. 2. P. 272-274.
10. Lv J. B., Dai G. Z. and Mu D. J. Implementation of absolute delay guarantee in database connection pool in Web application servers. *Appl. Res. Comput.* 2012. No. 29. P. 1838-1841.
11. Meng P. C., Hu S. B., Shu H. and Yan F. Y. Optimization strategy of connection pool based on ADO. *Comput. Eng. Design*. 2013. No. 34. P. 1706-1710.
12. Tian N., Zhang Z. G. *Vacation Queueing Models: Theory and Applications*. Springer, New York, 2006.

13. Wang Y. J., Wang F., Yang W. B. Performance comparison test of database access based on database connection pool. *Ind. Control Comput.* 2010. No. 6. P. 92-94.
14. Zeng G. L., Fu X. F. A new model of database connection pool. *Comput. Digital Eng.* 2011. No. 39. P. 163-166.
15. Silva F. D. A. E., Azevedo C. D. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. *African Journal of Agricultural Research.* 2016. No. 11(39). P. 3733-3740.
16. Latimer N. R., Abrams K. R., Lambert P. C., Crowther M. J., Wailoo A. J., Morden J. P., Campbell M. J. Adjusting for treatment switching in randomised controlled trials—a simulation study and a simplified two-stage method. *Statistical methods in medical research.* 2017. No. 26(2). P. 724-751. doi: 10.1177/0962280214557578.
17. Arregui I., Salvador B., Ševčovič D., Vázquez C. Total value adjustment for European options with two stochastic factors. Mathematical model, analysis and numerical simulation. *Computers & Mathematics with Applications.* 2018. No. 76(4). P. 725-740. doi: 10.1016/j.camwa.2018.05.012.
18. Wu J., Huo Z. Performance Analysis of Database Connection Pool Technology Based on Queueing Model with Mixed Waiting and Loss. *Journal of Software Engineering.* 2016. 10(4). P. 383-391. doi: 10.3923/jse.2016.383.391.
19. Zhu C. S. and Shane Y. F. Study on self-adaptive database connection pool. *Comput. Eng. Applic.* 2003. No. 36. P. 187-209.
20. Jain R., Ramachandra A. G. M. Merging connection pools to form a logical pool of connections during a preset period of time thereby more efficiently utilizing connections in connection pools. U.S. Patent Application No. 16/260,565, 2019.
21. Ghosh S., Varakantham P., Adulyasak Y., Jaillet P. Dynamic repositioning to reduce lost demand in bike sharing systems. *Journal of Artificial Intelligence Research.* 2017. No. 58. P. 387-430.
22. Murphy B. A. *The Brandeis-Frankfurter Connection: The Secret Political Activities of Two Supreme Court Justices.* Plunkett Lake Press, 2019.
23. Durrett R. *Probability: theory and examples.* V. 49. Cambridge university press, 2019.
24. Greenwood J. A., Hartley H. O. *Guide to tables in mathematical statistics.* Princeton University Press, 2017.
1. Ankit Kr. Tiwari, Surendra Yadav, Manish Mathuria, Manish Sharma, Hemlata Chaudhary. Performance Optimization of Web Applications using Connection Pooling. *Proceedings of International Conference on Innovations in information Embedded and Communication Systems (ICIIECS'16)*, 2016.
2. Chen S., Liu Y., Gorton I., Liu A. Performance prediction of component-based applications. *Journal of Systems and Software,* 2005, 74(1), p. 35-43, doi: 10.1016/j.jss.2003.05.005.
3. Donald Gross, John F. Shortle, James M. Thompson, Carl M. Harris. *Fundamentals of Queueing Theory 4th Edition.* New Jersey, Wiley, 2008.
4. Ancans A., Petersons E., Ipatovs A. Vehicular wireless network access controller parameter estimation. In *2017 Progress in Electromagnetics Research Symposium-Fall (PIERS-FALL) IEEE (2017, November)*, p. 2152-2159, doi: 10.1109/PIERS-FALL.2017.8293496.
5. Pustovoitov P., Sokol G., Hroza P., Tyrtysnikov O., Rvachova N. Mathematical Model of Single-Channel Infocommunication Node with Several Packet Flows. *Proceedings of 2018 International Scientific-Practical Conference on Problems of Infocommunications. Science and Technology.* 2018, p. 166-170, doi: 10.1109/INFOCOMMST.2018.8632128.
6. Pustovoitov P., Sokol G. The model of dual channel network node with shared memory. *Proceedings of 2nd International Conference on Advanced Information and Communication Technologies,* 2017, p. 266-269, doi: 10.1109/AIACT.2017.8020116.
7. Li B. Z., Wu F. S., Jing Z. J. and Huang H. J. Self-adaptive database connection pool technology in NVMS. *Comput. Eng.*, 2008, No. 23, p. 41-43.
8. Liang Q. H., Shen Z. F., Luo J. C., Fan H., Ming D. P., Li J. L. Study of database connection pool in LBS platform. *Comput. Eng.*, 2006, No. 32, p. 39-41.
9. Liu F. A method of design and optimization of database connection pool. *Proceedings of the 4th International Conference on Intelligent Human-Machine Systems and Cybernetics, August 26-27 2012, Nanchang, Jiangxi,* 2012, V. 2, p. 272-274.
10. Lv J. B., Dai G. Z. and Mu D. J. Implementation of absolute delay guarantee in database connection pool in Web application servers. *Appl. Res. Comput.*, 2012, No. 29, p. 1838-1841.
11. Meng P. C., Hu S. B., Shu H. and Yan F. Y. Optimization strategy of connection pool based on ADO. *Comput. Eng. Design.*, 2013, No. 34, p. 1706-1710.
12. Tian N., Zhang Z. G. *Vacation Queueing Models: Theory and Applications.* Springer, New York, 2006.
13. Wang Y. J., Wang F., Yang W. B. Performance comparison test of database access based on database connection pool. *Ind. Control Comput.*, 2010, No. 6, p. 92-94.
14. Zeng G. L., Fu X. F. A new model of database connection pool. *Comput. Digital Eng.*, 2011, No. 39, p. 163-166.
15. Silva F. D. A. E., Azevedo C. D. The Assistat Software Version 7.7 and its use in the analysis of experimental data. *African Journal of Agricultural Research,* 2016, No. 11(39), p. 3733-3740.
16. Latimer N. R., Abrams K. R., Lambert p. C., Crowther M. J., Wailoo A. J., Morden J. P., Campbell M. J. Adjusting for treatment switching in randomised controlled trials—a simulation study and a simplified two-stage method. *Statistical methods in medical research,* 2017, No. 26(2), p. 724-751, doi: 10.1177/0962280214557578.
17. Arregui I., Salvador B., Ševčovič D., Vázquez C. Total value adjustment for European options with two stochastic factors. Mathematical model, analysis and numerical simulation. *Computers & Mathematics with Applications,* 2018, No. 76(4), p. 725-740, doi: 10.1016/j.camwa.2018.05.012.
18. Wu J., Huo Z. Performance Analysis of Database Connection Pool Technology Based on Queueing Model with Mixed Waiting and Loss. *Journal of Software Engineering,* 2016, 10(4), p. 383-391, doi: 10.3923/jse.2016.383.391.
19. Zhu C. S. and Shane Y. F. Study on self-adaptive database connection pool. *Comput. Eng. Applic.*, 2003, No. 36, p. 187-209.
20. Jain R., Ramachandra A. G. M. Merging connection pools to form a logical pool of connections during a preset period of time thereby more efficiently utilizing connections in connection pools. U.S. Patent Application No. 16/260, 565, 2019.
21. Ghosh S., Varakantham P., Adulyasak Y., Jaillet p. Dynamic repositioning to reduce lost demand in bike sharing systems. *Journal of Artificial Intelligence Research,* 2017, No. 58, p. 387-430.

22. Murphy B. A. *The Brandeis-Frankfurter Connection: The Secret Political Activities of Two Supreme Court Justices*. Plunkett Lake Press, 2019.
23. Durrett R. *Probability: theory and examples*, V. 49, Cambridge university press, 2019.
24. Greenwood J. A., Hartley H. O. *Guide to tables in mathematical statistics*. Princeton University Press, 2017.

Сведения об авторах (About authors)

Pavlo Pustovoitov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department, Information Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-3884-0200; e-mail: p.pustovoitov@gmail.com.

Пустовойтов Павло Євгенович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри «Системи інформації», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-3884-0200; e-mail: p.pustovoitov@gmail.com.

Kateryna Kostyk – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Foundry Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4139-9970; e-mail: eklitus@gmail.com.

Костик Катерина Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри «Ливарне виробництво», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4139-9970; e-mail: eklitus@gmail.com.

Volodimir Kompaniets – Senior Lecturer, Information Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-2909-6993; e-mail: kompaniets33@gmail.com.

Компанієць Володимир Олександрович – старший викладач, кафедра «Системи інформації», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2909-6993; e-mail: kompaniets33@gmail.com.

Vitalii Voronets – Postgraduate Student, Information Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7793-3824; e-mail: voronets.vitaliy@gmail.com.

Воронець Віталій Миколайович – аспірант, кафедра «Системи інформації», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-7793-3824; e-mail: voronets.vitaliy@gmail.com.

Hasan Haidar – Postgraduate Student, Information Systems Department, National Technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8272-2960>; e-mail: hasanhaidar229@gmail.com.

Хайдар Хасан – аспірант, кафедра «Системи інформації», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-8272-2960; e-mail: hasanhaidar229@gmail.com.

Please cite this article as:

Pustovoitov P., Kostyk K., Kompaniets V., Voronets V., Haidar H. Mathematical model of server requests intensity description. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 6-8, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.10.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Пустовойтов П. С., Костик К. О., Компанієць В. О., Воронець В. М., Хайдар Х. Математична модель опису інтенсивності запитів до сервера. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 6-8. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.10.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Пустовойтов П. Е., Костик Е. А., Компанієць В. А., Воронець В. Н., Хайдар Х. Математическая модель описания интенсивности запросов к серверу. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 6-8. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.10.

АННОТАЦІЯ Робота присвячена побудові математичної моделі нестационарного потоку запитів клієнтів к базі даних з метою подальшого моделювання показників якості обслуговування. Математична модель коливання кількості запитів к базі даних має вигляд рівняння регресії і дозволяє більш точно проводити моделювання розміру пула з'єдинень в сервері. Пул з'єдинень - це схема, яка допомагає скоротити час відповіді на запити к базам даних. С іншої сторони, додатково використовуються серверні ресурси, витрачається пам'ять. Задача визначення оптимального розміру пула підключення могла бути вирішена достовірно з допомогою математичних апаратів, які потребують інформації об інтенсивності потоку стаціонарних входять запитів. Відомо, що потік реальних входять запитів є нестационарним. В статті запропонована математична модель коливань інтенсивності потоку з суточними і почасовими гармонічними коливаннями. Проведено статистичний аналіз адекватності моделі, перевірено однорідність дисперсій, оцінені значення коефіцієнтів рівняння регресії. Отримана математична модель описує коливання інтенсивності запитів клієнтів к серверу впродовж тижня. Математичну модель можна використовувати для прогнозування навантаження на сервер або для побудови імітаційної моделі системи обслуговування запитів. Перевірено адекватність моделі, перевірено однорідність дисперсій, оцінено значимість коефіцієнтів рівняння регресії, перевірено адекватність рівняння регресії, проведено аналіз автокореляції залишків. Отримані в статті результати дають подальше розвиток технологіям моделювання процесів в інформаційних системах і можуть бути використані при визначенні навантаження на сервер при нестационарному потоку запитів від клієнтів к базі даних.

Ключові слова: моделювання пула підключень; коливання інтенсивності запитів; рівняння регресії; статистичний аналіз

Received 15.05.2020

УДК 65.012.3

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.11

МЕТОД ЕКСПРЕС-ВИМІРЮВАННЯ СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ЗА ДОПОМОГОЮ ПАРАМЕТРИЧНОГО ПОКАЗНИКА

І. І. СТАНОВСЬКА^{1*}, О. Л. СТАНОВСЬКИЙ², І. В. ПРОКОПОВИЧ³, Є. О. НАУМЕНКО²

¹ кафедра вищої математики та моделювання систем, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА

² кафедра нафтогазового та хімічного машинобудування, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА

³ інститут медичної інженерії, Одеський національний політехнічний університет, Одеса, УКРАЇНА

*e-mail: stanovskairaida@gmail.com

АНОТАЦІЯ Кожне антикризове втручання в життєвий цикл складної системи фактично руйнує його початковий план, – останній все більше відрізняється від реальності, а якщо таких втручань багато, то від первісного плану може взагалі нічого не залишитися! Моделі, які використовувалися при первинному плануванні життєвого циклу складної системи стають неадекватними, що миттєво та негативно відбивається на точності та ефективності антикризових параметричних рішень. Команда проекту після кожного значного параметричного втручання повинна швидко розпочати створення нового плану, для чого їй необхідно забезпечити новою методологією антикризового управління проектами на основі параметричного експрес-аналізу організаційно-технічних систем для оцінювання поточного стану проекту. Для антикризового управління будь-яким об'єктом за зворотним зв'язком необхідно мати можливість відносно швидко вимірювати параметри стану цього об'єкту як реакції на управлінське втручання. Тому метою наукового дослідження, в якому складним об'єктом був проектний менеджмент, стало створення методу експрес-вимірювання стану проекту за допомогою вперше запропонованого параметричного показника. Побудовано систему управління антикризовою діяльністю складних технічних систем на основі зворотного зв'язку по відхиленню поточного плину проекту від планового. Запропоновано новий комплексний параметр, який однозначно та репрезентативно відбиває відхилення параметрів поточного плину проекту від планового. Показник представляє собою безрозмірну частку, де в чисельнику – сума приведених вартостей втрачених параметрів, в знаменнику – сума приведених вартостей параметрів взагалі. Це дозволило використовувати цей показник в якості критерію необхідності початку процесу протидії відповідним кризам. Визначені методи їхнього експрес-вимірювання та розрахунку. На підставі проведених досліджень розроблено схему підсистеми комп'ютерної підтримки прийняття проектних рішень з планування і виконання антикризового управління.

Ключові слова: життєвий цикл; антикризове управління; складна система; параметричний показник; зворотний зв'язок; критерій початку протидії; комп'ютерна підтримка

EXPRESS METHOD OF THE COMPLEX SYSTEMS STATE MEASUREMENT USING THE PARAMETRIC INDICATOR

I. STANOVSKA¹, O. STANOVSKYI², I. PROKOPOVICH³, Y. NAUMENKO²

¹ Department of Higher Mathematics and Systems Modeling, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

² Department of Petroleum and Chemical Engineering, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

³ Institute of medical engineering, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT Each anti-crisis intervention in the life cycle of a complex system actually destroys its original plan – the last one is more and more different from reality, and if there are many such interventions, then there may be nothing left of the original plan! The models used in the initial planning of a complex system life cycle become inadequate, which instantly and negatively affects the accuracy and efficiency of anti-crisis parametric solutions. After each significant parametric intervention, the project team must quickly start creating a new plan, for which it must be provided with a new methodology of crisis project management based on parametric rapid analysis of organizational and technical systems to assess the current state of the project. For crisis management of any object, it is necessary to be able to measure the parameters of the state of this object relatively quickly in response to managerial intervention. Therefore, the purpose of research, in which the complex object was project management, was to create a method of rapid measurement of the project using the first proposed parametric indicator. An anti-crisis management system for complex technical systems has been built on the basis of feedback on the deviation of the current course of the project from the planned one. A new complex parameter is proposed, which unambiguously and representatively reflects the deviation of the parameters of the current course of the project from the planned one. The indicator is a dimensionless fraction, where in the numerator – the sum of the reduced values of the lost parameters, in the denominator – the sum of the reduced values of the parameters in general. This allowed us to use this indicator as a criterion for the need to start the process of countering the relevant crises. Methods of their express measurement and calculation are determined. On the basis of the conducted researches the scheme of the subsystem of computer support of decision-making on planning and execution of anti-crisis project development is developed.

Keywords: life cycle; crisis management; complex system; parametric indicator; feedback; criterion of the counteraction beginning; computer support

Вступ

Відомо, що управління розвитком динамічних

складних систем – технічних, медичних, організаційних, тощо, завжди є антикризовим, в яких кризи спричиняються несподіваним впливом

внутрішніх або зовнішніх дій на такі системи [1]. З іншого боку будь-яке антикризове управління складними системами, особливо в точках вимушеної біфуркації життєвого циклу, потребує інформації про те, як ті або інші втручання в складну систему відібраються на її подальшому розвитку [2,3]. Ця інформація може бути отримана або прогнозними розрахунками, або безпосередньою оцінюванням (вимірюванням) «перших кроків» розвитку системи після кризової «катастрофи» та її виправлення.

Зрозуміло, що таке управління необхідно розраховувати та здійснювати в найкоротші строки та в умовах, коли не зовсім однозначно вирішено, що «будемо рятувати»: гроші, час, ресурси, довкілля, тощо. Головними залишаються лише місія та ціль функціонування складної системи.

При управлінні будь-якою складною системою із збільшенням кількості параметрів, що враховуються лавинно зростає так зване «прокляття розмірності», зводячи усі зусилля менеджерів такого управління нанівець [4].

При антикризовому управлінні складними системами велике значення набувають вхідні та вихідні параметри такого управління та методи їх визначення. Оскільки в організаційному управлінні перелік параметрів, які можна безпосередньо та швидко виміряти, вельми малий (час, кошторис, дієві методи та ін.), важливою складовою антикризового управління є методи та моделі, що дозволяють оцінити результати антикризових дій менеджерів за непрямими комплексними показниками, наприклад такими, як комплексний параметричний показник [5], пов'язаний виключно із вимірюваними властивостями об'єкта та процесів управління останнім.

Таких показників для одного й того ж об'єкта завжди існує безліч, але будь-який конкретний з них користувач обирає самовільно, не завжди маючи можливість чисельно обґрунтувати цей вибір, що часто-густо позначається на якості управління у цілому.

Аналіз літературних джерел

Аналіз літературних даних дозволив виявити окремі понятійні групи загального напрямку: «оцінювання або вимірювання стану складних систем»:

- засади та особливості оцінювання стану складних систем [6–13];
- комплексні параметри та методи їхнього використання в процесах управління складними системами [14–20].
- приклади практичного використання комплексних функціоналів Π та оцінка їхньої ефективності [21–28].

Розглянемо змістовне наповнення таких груп більш детально.

Засади та особливості оцінювання стану складних систем. Пошук напрямку розвитку

складної системи після чергової управлінської дії по суті є задачею оптимізаційного вибору, оскільки таких напрямків може бути дуже багато. Цільовою функцією такого вибору можуть бути різні техніко-економічні характеристики, – найчастіше в технологічних системах за цільову параметричну функцію обирають час, за який побудова системи добігає кінця, в управлінні проектами – вартість завершення процесу [8], в медицині – параметри якості життя, тощо.

Підтримка динамічного ЖЦСС в сучасних технологіях ведеться, зазвичай, за деяким планом. Також відомо, що цей план ніколи не вдається витримати. Цьому заважають обов'язкові кризи, які спіткають ЖЦ. Управління складними системами, також, як і автоматичне управління будь-якою «простою» системою, може бути організовано за відомими схемами: стабілізаційною, програмною, слідкуючою, компенсаційною, за оберненим зв'язком, тощо [12,13].

Зважимо також на те, що в дослідженні мова йде про параметричне управління взагалі, під час якого у відповідному об'єкті можна змінювати будь-які параметри елементів систем.

Управління будь-якою системою за оберненим зв'язком передбачає постійний моніторинг за станом цієї системи. Цей стан при такій схемі управління є функцією двох процесів: природного розвитку та реакції на управлінську дію.

Головною перешкодою на цьому шляху є багатопараметричність та стохастичність задіяних процесів, систем: людей, технологій, машин та матеріалів, а також, як наслідок, неможливість он-лайн із життєвим циклом об'єкта управління вимірювати або якось оцінювати ці параметри та відслідковувати їхні зміни при внутрішніх та зовнішніх втручаннях в процес.

При змінюванні складності об'єкта в процесі управління враховують розподіл складності по групах: технічна, організаційна, екологічна [7]. Але вимірювання стану не може бути виконано однозначно. Головна причина – відсутність, як правило, єдиного (узагальнюючого, комплексного) метрологічного параметра для поточного оцінювання складності об'єкта управління [10,11].

При управлінні складними, багатофакторними процесами така сумарна оцінка зазвичай можлива тільки безпосереднім вимірюванням деякого набору «прямих» параметрів та подальшого розрахунку деякого непрямого комплексного параметра, за яким можна, по-перше, оцінювати поточний стан, а, по-друге, визначати напрямок та величину «найкращої» управляючої дії [6]. На жаль, будь-який комплексний параметр – це вибір користувача, від якого залежать і отриманий результат і наслідки вибору подальших дій за допомогою останнього [9].

Комплексні параметри та методи їхнього використання в процесах управління складними системами. Як відомо, комплексні параметри

складаються (за деякими правилами) з окремих характеристик, які можуть бути безпосередньо виміряні або обчислені [14, 15]. Зрозуміло, що обрання таких правил саме по собі процес суб'єктивний, а отже комплексні параметри завжди стохастичні з декількох причин: стохастичність обрання правил; стохастичність вимірювань окремих характеристик; стохастичність обробки результатів.

Тому моделі, які використовуються при побудові такого показника повинні бути компактними [18] та мінімально залежними від турбулентного оточення об'єкта моделювання [19].

Для побудови одного з варіантів такого комплексного параметра розглянемо параметричне насичення об'єкта управління з точки зору теорії множин [20], зокрема, із застосуванням поняття «топологічний простір».

Топологічний простір складної системи (ТП СС) – це впорядкована пара множин (X, Γ) , де X – деяка множина, а Γ – система підмножин множини X (їх називають відкритими), що задовольняє таким умовам [16].

1. Порожня множина \emptyset та множина X належать Γ .

2. Об'єднання довільного набору множин з Γ також належить Γ .

3. Будь-який перетин скінченного набору множин з Γ також належить Γ .

Множина Γ називається топологією над множиною X , а її елементи X є *точками*. Множини в Γ називають відкритими, їхнє доповнення відповідно замкненими множинами.

Поняття топологічного простору успішно застосовується у багатьох розділах сучасної математики як спільне, об'єднувальне поняття. Вивченням топологічних просторів займається топологія.

Нехай над деякою множиною X визначено різні топології Γ_1 та Γ_2 . Якщо будь-яка множина з топології Γ_1 належить також Γ_2 , то кажуть, що топологія Γ_1 грубіша за топологію Γ_2 , відповідно, топологія Γ_2 тонша за топологію Γ_1 .

Найтоншою топологією на множині X є топологія, в якій всі множини є відкритими (тобто топологія яка складається із усіх підмножин множини X). Така топологія називається *дискретною*.

Найгрубішою є топологія $\Gamma = \{\emptyset, X\}$ (*антидискретна топологія*) [17].

Приклади практичного використання комплексних функціоналів Π та оцінка їхньої ефективності. Підтверджена можливість ефективного використання проектно-орієнтованих методів і моделей розвитку небажаних подій у системах управління ризиками програми супроводу систем автоматизованого захисту (САЗ) АЕС.

Розроблений ППП «КАТАSTOP» для використання в підсистемі управління ризиками програми супроводу САЗ АЕС [21].

Існують програми і, відповідно, організації, які їх розробляють та реалізують, в яких місія «безпека за всяку ціну» стає філософією програми взагалі, що відбиває її основну роль. Наприклад, безпека АЕС є не тільки місією, але й цілями верхніх рівнів процесу створення-реалізації проектів, що входять до програми, – усіх елементів циклу Шухарта-Демінга (PDCA).

Безпека тісно пов'язана з поняттям «ризик проекту». Коли мова йде про безпеку АЕС, існує дві групи ризиків: ризики зовнішніх впливів (наприклад, землетрусу) і ризики внутрішніх процесів (наприклад, старіння обладнання та засобів контролю, тестові втручання в роботу систем, помилки персоналу, тощо). Тому й програма супроводу систем захисту АЕС повинна оперативно реагувати на ризики обох груп, оперативно «перемикатися» між ними [22].

Головна проблема першої групи ризиків – їх раптовість, а головна проблема другої полягає в тому, що будь-яке планове вторгнення у роботу системи аварійного захисту атомної електростанції (САЗ АЕС) пов'язане зі зниженням безпеки. Тому, при виконанні програми – реалізації всіх її проектів – необхідно на кількісному рівні та у реальному часі управляти ризиками зниження безпеки АЕС, надійністю її систем, не дозволяючи їм опускатися нижче припустимого рівня.

На жаль, очевидність такої концепції не гарантує виконання місії: згадаємо, що аварія на ЧАЕС відбулася саме в процесі «вторгнення» у її роботу виконавців проекту, покликаного контролювати і підтримувати систему її захисту! Кількісне управління ризиками може бути здійснене тільки з використанням адекватних математичних моделей, наявність яких на сучасному етапі не цілком задовольняє вимогам повноти врахування всіх чинників, що впливають на надійність роботи АЕС, у тому числі, зовнішніх.

САЗ АЕС має, як мінімум, три особливості, що різко ускладнюють її обслуговування протягом життєвого циклу: по-перше, як і будь-яка технічна система, вона старіє (втрачає працездатність), по-друге, її неможливо зупинити навіть на короткий час для проведення профілактики та ремонту і, по-третє, відповідальність за недопущення катастрофи настільки велика, що її неможливо виміряти в будь-яких еквівалентних одиницях, використовуваних у суспільстві.

Сюди слід додати динамічне оточення програми: під час її здійснення постійно змінюється зовнішнє і внутрішнє середовище, багато дій доводиться здійснювати в умовах невизначеності та загрози надзвичайних ситуацій.

У цих умовах програма супроводу САЗ АЕС складається з послідовних проектів моніторингу працездатності та, при необхідності, її відновлення; їх доводиться робити в процесі функціонування САЗ в динамічному оточенні, при цьому, кожний цикл роботи, є самостійним проектом: він має явно

виражені унікальність, зміст і цілі, час початку та закінчення і обмежені ресурси [23].

Отримані знання дозволили створити нормативні документи, розроблені в результаті виконання планових проектних робіт. У відділі продовження строку експлуатації АЕС проектною організацією ТОВ «Інститут підтримки експлуатації АЕС» (м. Київ) було проведено випробування розробленої в ОНПУ системи управління програмою супроводу кваліфікації обладнання захисту АЕС у динамічному оточенні.

Реалізація програми модернізації систем аварійного захисту енергоблоків № 2 ОП «Хмельницька АЕС» і № 4 ОП «Рівненська АЕС» із застосуванням розробленого ППП «KATASTOP» дозволила знизити час моделювання систем аварійного захисту в середньому на 25 – 30 % без втрат надійності систем, що підтвердило досягнення мети роботи.

Інший приклад управління розвитком складного об'єкта – це управління медичним втручанням в організм людини.

У деяких випадках до цих факторів додається висока ризикова небезпека та відповідальність, яка супроводжує проект. При цьому обидва чинники ризику – ймовірність настання і вартість ризикових втрат – знаходяться на дуже високому рівні. У роботі такі проекти називали «швидкоплинними з підвищеною ризиковою небезпекою і об'єктивною відповідальністю за результати їх виконання». Найбільш яскравими представниками таких проектів є медичні, зокрема, хірургічні операції.

Актуальність роботи в даному напрямку визначається також тим, що хірургічні операції постійно ускладнюються за рахунок застосування сучасних приладів і інструментів, управляти якими без сучасних інформаційних технологій стає все складніше. Управління такими операціями як проектом дозволяє передбачити більший відсоток ризиків, оперативного попереджати і протидіяти їм.

Перш за все, – це швидкоплинність процесу. Якщо «звичайні» процеси, наприклад в будівництві, можуть тривати роками, то тривалість швидкоплинних процесів, як правило, обмежується годинами, а іноді – хвилинами. Тому неправильний вибір структури і змісту процесу на всіх етапах його реалізації може мати незворотні наслідки [24].

По-друге, – це висока відповідальність за результат управління такими процесами. Де б не виконувалися такі проекти, – в енергетиці, на транспорті, в процесі боротьби з надзвичайними ситуаціями, – як правило, їх місією є збереження людського життя [25].

Третьою особливістю розглянутих процесів є підвищений в порівнянні зі «звичайними» процесами рівень кризових подій, що такий процес супроводжує. У подібних проектах найчастіше зустрічаються латентні, несподівані кризи, які неможливо передбачити заздалегідь. Тому заходи по їх

недопущенню або компенсації їх наслідків доводиться приймати в найкоротший час, використовуючи всі наявні ресурси [26].

У поєднанні зі значними ризиками і високою відповідальністю, це ускладнює звичайні методи дослідження управління проектами, залучаючи до них існуючі в медицині методи статистичних порівняльних експериментів над значною кількістю пацієнтів [27]. Проект починається з аналізу поточного стану параметрів об'єкта. Далі зі списку того, що повинно бути реалізовано, вибираються завдання, зобов'язання щодо виконання яких бере на себе Команда. На основі обраних завдань створюється функціональність окремих проектних робіт. Всі функції розбиті за завданнями, кожна з яких оцінюється Командою.

Команда постійно з урахуванням кризового оточення оцінює обсяг роботи, який необхідно провести для завершення завдання. При реалізації чергового етапу відбувається своєрідне перетворення інформації: вхідна «переробляється» в вихідну за допомогою виконаних Командою робіт і під впливом внутрішніх і зовнішніх кризових подій, які мали місце [28].

Наведені приклади, попри принципово різні об'єкт та методи його супроводження, поєднують такі чинники: висока відповідальність, швидкоплинність та багатопараметричність, що, в свою чергу, потребує нових сучасних моделей та методів для побудови організаційно-технічних систем антикризового управління складними об'єктами, зокрема, деякого єдиного показника-функціонала стану складної системи.

Тому головною проблемою, яка розв'язується в представленому дослідженні, є низька ефективність існуючих організаційно-технічних систем антикризового управління складним об'єктом.

Мета роботи

Метою роботи є розробка та впровадження нових моделей та методів *параметричного* аналізу організаційно-технічних систем антикризового управління складними динамічними об'єктами для підвищення ефективності такого управління. Під ефективністю управління розуміли поліпшення в порівнянні з планом таких основних характеристик об'єкта, як час, вартість, параметри якості продукту, взаємодія із навколишнім середовищем, взаємовідносини в Команді менеджерів та інше або, принаймні, збереження планових показників в умовах кризових подій.

Для досягнення цієї мети в роботі були розв'язані **наступні задачі**.

1. Побудувати систему управління антикризовою діяльністю складних організаційно-технічних систем на основі зворотного зв'язку по відхиленню поточного плину розвитку ЖЦ об'єкта від планового.

2. Запропонувати новий **комплексний параметричний показник – динамічний функціонал** (показник **П**), який однозначно та репрезентативно відбиває параметричне відхилення поточного плин у проекту від планового.

3. Виконати практичне випробування результатів дослідження та оцінити їхню ефективність.

Наукова новизна роботи полягає в тому, що *вперше запропонований* показник та метод його вимірювання для оцінювання результатів антикризового управління складними системами в частині параметричного відхилення реального стану об'єкта від запланованого. Показник представляє собою відношення оцінки ресурсів, які на момент вимірювання в об'єкті вже не використовуються з різних причин, до загальної оцінки усіх ресурсів об'єкта. Це дозволило використовувати цей показник в якості критерію обрання напрямку антикризової діяльності або в якості цільової функції при розв'язанні задач оптимізації управлінських рішень.

Виклад основного матеріалу

1. Система управління антикризовою діяльністю складних організаційно-технічних систем на основі зворотного зв'язку по відхиленню поточного плин розвитку ЖЦ об'єкта від планового. Хай є деяка багато-параметрична динамічна складна система, яка рухається у просторі своїх параметрів від запланованого стану 1 до стану 2 (рис. 1). В точці 3 відбувається відхилення хоча б одного параметру від запланованого значення, що діагностується як криза.

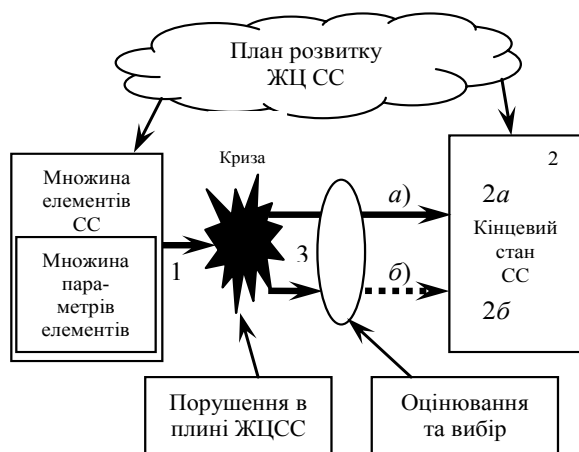


Рис. 1 – Структурна схема системи управління антикризовою діяльністю складних технічних систем на основі зворотного зв'язку по відхиленню поточного плин проекту від планового

Після цього управляючий рухом системи повинен прийняти рішення щодо подальшого руху: вздовж траєкторії *а* або траєкторії *б* (рис. 1).

Крім обрання нової траєкторії (морфологічна зміна), слід очікувати і зміни деяких параметрів процесу (параметрична зміна), що у сукупності призведе до потрапляння траєкторії руху життєвого циклу в точку *2а* або *2б*.

Додамо, що приймати рішення, яким шляхом рухатися, треба *on-line* та якомога швидше, оскільки навіть невелика затримка може виявитися для об'єкта роковою.

Для прийняття рішення у менеджера зазвичай є два інструменти: по-перше, за наявною моделлю розвитку процесів в об'єкті управління розрахувати його стан в деяких точках *3а* або *3б* або виміряти цей стан у тих же точках та на підставі цих розрахунків або вимірювань прийняти морфологічне рішення про траєкторію подальшого руху після кризи та параметричні рішення про умови, в яких цей рух буде відбуватися.

Одразу ж відзначимо, що жоден з інструментів вибору не забезпечує стовідсоткову ефективність будь-яких рішень, оскільки у розпорядженні менеджера немає ані абсолютно точних розрахункових моделей, ані репрезентативних методів та результатів вимірювання.

Крім того, в багатопараметричних системах не завжди відомо, що взагалі вимірювати під час швидкоплинної кризи, яким з цих результатів та в якій мірі можна довіряти, та як з багатьох різнорідних результатів отримати єдине рятівне рішення про напрямок руху системи та його характеристики.

Як правило, в таких умовах, менеджер руху вдається до оцінювання нових найчастіше комплексних параметрів які підвищують ефективність його рішень.

Наприклад, при управлінні процесом «лікування хворого» лікар може не задовольнятися його «прямими» характеристиками (температура, тиск) та зробити додатковий комплексний аналіз (наприклад, як «психологічний стан хворого»).

2. Комплексний параметричний показник – динамічний функціонал **П**.

В якості параметричного показника-функціоналу **П** пропонується обрати будь-яку динамічну залежність між відповідними властивостями двох елементів топологій Γ_1 та Γ_2 , які входять до динамічної (залежної від часу) множини **X** параметрів об'єкта, що оцінюється

$$\mathbf{P}(\mathbf{X}) = \mathbf{P}(\Gamma_1; \Gamma_2; \tau), \quad (1)$$

де **П** – параметричний функціонал, Γ_1 , Γ_2 – параметри відповідних топологій.

Введемо в (1) динамічну складову:

$$\mathbf{P}[\mathbf{X}(\tau)] = \mathbf{P}[\Gamma_1(\tau); \Gamma_2(\tau)], \quad (2)$$

а також зазначимо, що при належному підборі змісту функціоналу **П** та складових властивостей топологій Γ_1 та Γ_2 такий функціонал буде безрозмірним, що виключно зручно для порівняння процесів, які займають окремі підмножини у просторі та часі.

Як було зазначено вище серед загальної множини X показників деякої складної системи (рис. 2) можуть бути виділені підмножини множини X , які характеризують стан окремих елементів останньої. На рисунку 2 для спрощення опису обрані дві такі підмножини: Γ_1 та Γ_2 .

В будь-якому разі, кількість параметрів в кожній множині повинна бути скінченною, а усі їхні характеристики вимірюваними.

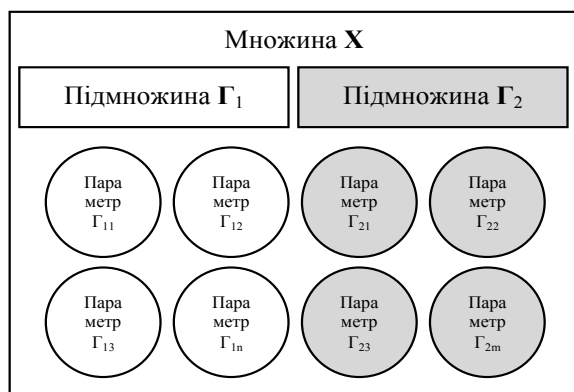


Рис. 2 – Схема розбиття множини X параметрів складної системи із параметрами підсистем (підмножин) Γ_1 та Γ_2

В такому разі, поєднуючи параметри усіх підмножин за деяким алгоритмом можна отримувати єдине число – характеристику усіх можливих станів множин у сукупності.

Хай маємо модель деякого процесу яка містить X параметрів їхніх окремих підмножин (рис. 2).

Якщо сумарна кількість параметрів підмножин множини X скінченна (з урахуванням можливих перехрещень), та визначений алгоритм їх об'єднання існує, можна отримати єдиний показник $\Pi(\tau)$, який дозволяє оцінити миттєвий стан системи X .

Розглянемо конкретний приклад. В ньому об'єктом є процес управління проектом, а цільовою функцією управління – вартість окремих проектних елементів (робіт, обладнання, матеріалів, енергії, тощо). Приклад взаємодії окремих топологій загального топологічного простору наведений на рис. 3.

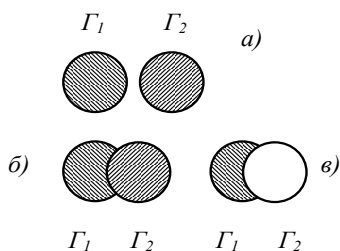


Рис. 3 – Варіанти топологічного простору X , який містить дві топології – Γ_1 та Γ_2 :

а – незалежні топології; б – об'єднання двох топологій; в – різниця між двома топологіями

Ці підмножини можуть бути незалежними одна від одної (а, рис. 3) або будь-яким чином перехрещуватися (б, в, з рис. 3).

При незалежних топологіях Γ_1 та Γ_2 (рис. 3 а) втрачені вартості цих підсистем (підмножин) при розрахунку втрат підсумовуються, об'єднання топологій призводить до зменшення сумарних втрат (рис. 3 б, в).

Відхилення вартості проекту від планової може бути спровоковано двома головними чинниками:

- зміною вартості «обслуговування» кожного параметру окремо, наприклад, зміною курсу валют, вартості постачання ресурсів, тощо;

- припиненням деяких робіт, спричиненим антикризовим втручанням, та початком нових робіт на заміну вилюченим з плану, наприклад, прокладання комунікацій не в траншеї, а на стовпах.

В наведеній моделі вилючені проектні роботи залишають після себе в 2-вимірному перерізі плинну проекту зони втрат або «чорні плями» (рис. 4).

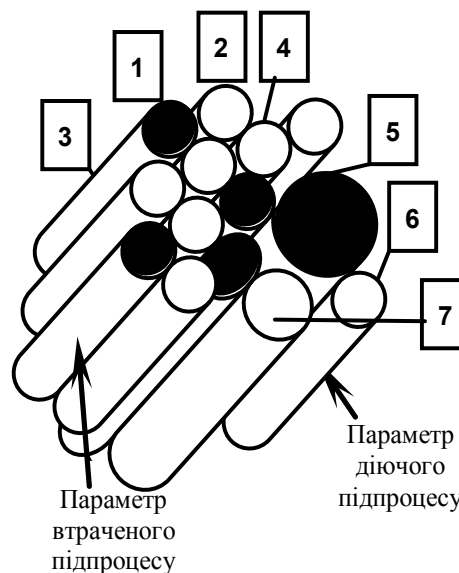


Рис. 4 – Приклад схеми перерізу проектної діяльності для розрахунку показника Π :

Сутності (параметри): 1 – енергія; 2 – матеріали; 3 – люди; 4 – кошти; 5 – обладнання; 6 – договір із постачальником; 7 – витрати на зміну планової структури проекту

«Вартість» таких плям не завжди дорівнює вартості вилюченого елемента. Адже, як було зазначено вище, матеріальні цінності, які залишаються після вилучення окремих елементів, можна кинути, а можна й продати, врятувавши частину їх вартості.

Якщо маємо багатовимірну модель, 2-вимірний переріз отримується при перерізі m -вимірного простору ($m-2$)-вимірною «площиною». Їхня сумарна «площа», віднесена до «площі» усіх параметрів проекту, характеризує незворотні параметричні втрати.

Для їхньої оцінки й було застосовано параметричний показник Π :

$$\Pi = \frac{\sum_{v=1}^V B_{\text{вил } v}}{\sum_{p=1}^P B_{\text{заг } p}}, \quad (3)$$

де $B_{\text{вил } v}$ – приведена вартість вилученого параметру, $B_{\text{заг } p}$ – приведена вартість загального параметру, V – кількість вилучених параметрів, P – загальна кількість параметрів.

Перед підсумовуванням значення усіх параметрів приводяться до єдиної загальної розмірності, наприклад, до гривень.

Повна параметрична модель ефективності антикризового проектного управління Π складається з усіх моделей окремих елементарних перерізів по усіх вузлах декомпозиції об'єкта проектного управління. В роботі елементарні моделі як зорові образи попіксельно підсумовували, а результат використовували для розрахунку параметричного показника для кожного параметру за формулою (3).

На дискретній за часом моделі можливо виконати кілька таких перерізів по кожному каналу.

Це схоже на томографію – отримання пошарових зображень внутрішньої структури об'єкта. Їхній набір саме й буде проміжною дискретною моделлю життєвого циклу проектного менеджменту.

До такого перерізу можуть потрапляти, окрім параметрів основної проектно-технології, також й паралельні AGILE-технології, а також «чорні плями» які моделюють «відмирання» відпрацьованих поточних та минулих фрагментів проектного менеджменту на шляху до завершення плинного керованого процесу (див. рис. 1).

Двовимірний переріз має статус «зображення», до якого застосовні усі види обробки останніх, зокрема, первинна обробка та сегментація, виділення та опис контурів сегментів, аналіз «зображень», заснований, наприклад, на використанні спектральних дескрипторів в різних ортогональних базисах, а також апарату моментних функцій. Певні зображення можна перетворювати в число або в інші згортки, які можна оцінювати та порівнювати між собою за цією оцінкою.

Повна динамічна морфологічна модель життєвого циклу складного об'єкта складається з усіх елементарних моделей окремих перерізів по усіх вузлах дискретизації об'єкта.

3. Практичне випробування результатів дослідження та оцінка їхньої ефективності.

Розглянемо приклад використання показника Π для оцінювання та прогнозування залишкової гнучкості антикризового управління проектом.

Управління проектами і програмами передбачає нестандартну, креативну реакцію проектного менеджменту на різноманітні події-виклики, які виходять із внутрішніх та зовнішніх

факторів. Саме тому проектна діяльність найчастіше парадоксальна, – іноді навіть негативні події, пов'язані із втратами засобів, матеріалів, документації, персоналу, обладнання, сприятливого оточення, тощо, виявляються, у підсумку, менш небезпечними, ніж повна їхня відсутність, тобто такий стан «проектного штилю», який призводить до поступового виродження креативної проектно-діяльності в операційну або технологічну.

Яскравим прикладом такої проектно-діяльності є медична хірургічна операція, яка містить всі описані вище процедури і, безумовно, є швидкоплинним проектом з високим ступенем кризогенності і відповідальності.

Перший фактор відноситься до професійної діяльності членів Команди проекту; залишається сподіватися, що кваліфікація членів Команди максимально відповідає накладеним на неї функцій. Серйозні помилки в цій сфері можна ідентифікувати як кризу і віднести до другого фактору.

Другий фактор – ризикові події проекту. В роботі їх розглядали з двох сторін: ризики, що не вилилися в проектні кризи, і ризикові події, які відбулися (наприклад, позапланова кровотеча) і які потребують їх компенсації. Перші оцінювали в параметрах ймовірності, а другі – в медичній і фінансовій «вартості питання».

Третій фактор – менеджерський супровід або, власне, антикризове управління проектом

Як випливає з досвіду хірургічних втручань, однією з найважливіших характеристик, по якій можна оцінювати ефективність медичного проекту, є час. Природно, що при цьому повинні зберігатися або навіть поліпшуватися медичні характеристики операції. Йдеться про збереження життєвих показників організму хворого (температури, тиску, частоти серцебиття) в межах допустимої норми. Крім того, повинні згодом поліпшуватися щодо контрольної групи хворих, для яких антикризова технологія управління проектом «хірургічна операція» не застосовувалася.

Швидкість операції в цілому залежить від швидкості окремих етапів, а решта – заручники багатьох ризиків, з якими стикаються процес, як з боку пацієнта, так і з боку хірургічної бригади, зовнішніх зв'язків, фармацевтичного забезпечення, медичної апаратури тощо.

Головна відмінність управління проектами від цього механізму є те, що після кожного етапу в плановому порядку і в будь-який момент часу при надзвичайній ситуації здійснюється екстрений перехід до нового антикризового.

У Центрі реконструктивної та відновної медицини (Університетській клініці) Одеського національного медичного університету були проведені випробування розробленої в ОНПУ антикризової системи «CRIMEDPROM» (*anti-crisis medical projects management*) оптимізації процесу прийняття проектних рішень при управлінні

проектами та програмами в медичній практиці.

Система «CRIMEDPROM» була задіяна для управління антикризовою програмою вибору лікувальної тактики та проведення спеціального лікування (оперативного та хіміотерапевтичного) у пацієнтів з використанням циторедуктивних оперативних втручань, системної поліхіміотерапії та методики внутрішньочеревинної високо-температурної хіміоперфузії (HIPEC).

Випробування системи «CRIMEDPROM» показали, що її використання дозволило досягти таких результатів:

– стосовно взаємодії з турбулентним навколишнім середовищем:

- розроблено показання та протипоказання до використання методики HIPEC при дисемінованих пухлинах черевної порожнини;

- удосконалено оперативні доступи для встановлення дренажних систем для хіміоперфузії у черевну порожнину;

- розроблено критичні параметри температури та часу впливу перфузійної рідини на пухлинні клітини та органи черевної порожнини;

– стосовно якості медичного обслуговування:

- збільшилась до 65 % (у 2,3 рази у порівнянні з контрольною групою) резектабельність первинної пухлини;

- на 43 % за даними опитувальника SF-36 покращилась якість життя у післяопераційному періоді;

- на 23 % збільшилась кількість хворих, тривалість життя яких перевищила 1 рік після встановлення діагнозу та початку спеціального лікування.

Обговорення результатів

Об'єктом дослідження в роботі є складні багатопараметричні організаційно-технічні системи, найчастіше, – процеси, розвиток яких описується моделями, що містять сотні різних параметрів. До таких об'єктів можна віднести великі технічні явища, організаційні процеси типу проектів та програм, складні медичні втручання до організму людини, тощо.

Навіть коли розвиток таких систем відбувається точно за прийнятим планом, менеджменту, який цим розвитком управляє, вкрай складно оцінити, а тим більш, передбачити відхилення усіх згаданих параметрів від планових значень.

Коли ж до планового руху додаються всілякі відхилення, спричинені внутрішніми та зовнішніми явищами, то спостерігаються кризи, які можуть зруйнувати об'єкт в цілому.

Зрозуміло, що в таких умовах неможливо ані планувати, ані здійснювати точну підтримку згаданих процесів та об'єктів, як це часто відбувається в одно-двох параметричних «простих» об'єктах управління.

Додамо до цього, що вимірювання повинні відбуватися в он-лайн режимі прийняття антикризових рішень.

Тому в роботі зроблено спробу знайти такі метрологічні засоби, які можуть наблизити результати вимірювання параметрів складних об'єктів управління до їхніх реальних значень.

Розвиток цього напрямку, вочевидь, буде пов'язаний із пошуком та імплементацією нових моделей та методів для зазначеного вимірювання параметрів складних систем.

Висновки

Побудовано систему управління життєвим циклом складних технічних, медичних та організаційних систем на основі зворотного зв'язку по відхиленню параметрів поточного плину життєвого циклу після антикризового втручання від планового.

Запропоновано метод експрес-вимірювання стану складних систем за допомогою параметричного показника-функціонала Π , який відбиває ступінь параметричного відхилення поточного плину життєвого циклу об'єкта від планового. В якості такого показника-функціонала для оцінювання стану складного об'єкта управління пропонується застосовувати будь-яку динамічну залежність між відповідними властивостями двох елементів топологій Γ_1 та Γ_2 , які входять до динамічної (залежної від часу) множини X параметрів об'єкта, що оцінюється

Для дослідження складних об'єктів у медицині в рамках створеної системи «CRIMEDPROM» запропоновано комплексний параметр у вигляді співвідношення між єдиними параметрами вилучених (втрачених) елементів об'єкта управління та усіх планових елементів об'єкта взагалі. Показник може використовуватися в якості безрозмірного функціоналу для порівняння варіантів антикризових дій при призначенні вердиктів та в якості міри ефективності антикризового управління плином хірургічного втручання.

Випробування системи «CRIMEDPROM» в лікувальній практиці хірургічних втручань показали, що її використання дозволило досягти таких результатів:

– стосовно взаємодії з турбулентним навколишнім середовищем: розроблено показання та протипоказання до використання методики HIPEC при дисемінованих пухлинах черевної порожнини; удосконалено оперативні доступи для встановлення дренажних систем для хіміоперфузії у черевну порожнину; розроблено критичні параметри температури та часу впливу перфузійної рідини на пухлинні клітини та органи черевної порожнини;

– щодо якості медичного обслуговування: збільшилась резектабельність первинної пухлини; покращилась якість життя у післяопераційному

періоді; збільшилась кількість хворих, тривалість життя яких перевищила 1 рік після встановлення діагнозу та початку спеціального лікування.

Список літератури

1. Ковалев І. В., Тынченко С. В., Завьялова О. И., Лайков А. Н. Система поддержки многоатрибутивного принятия решений при управлении сложными системами. *Программные продукты и системы*. 2009. № 2. С. 142 – 144.
2. Бушуєв С. Д., Ярошенко Ю. Ф. Антикризове управління фінансовими установами в умовах турбулентності. *Управління розвитком складних систем*. 2013. 15, 5-10.
3. Bakhshi J., Ireland, V., Gorod A. Clarifying the project complexity construct: past, present and future. *Int J Project Manage.* 2016. 34 (7). P. 1199–1213. doi: 10.1016/j.ijproman.2016.06.002.
4. Zimek A., Schubert E., Kriegel H. P. A survey on unsupervised outlier detection in high-dimensional numerical data. *Statistical Analysis and Data Mining*. 2012. 5 (5). P. 363–387. doi:10.1002/sam.11161.
5. Становська І. І. Колеснікова К. В. Стратифікація індивідуальних компетенцій з метою побудови динамічних морфологічних моделей проектного управління. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. Харків, НТУ «ХПІ». 2019. № 1 (1326). С. 30–36.
6. Haas E. J., Yorio P. Exploring the state of health and safety management system performance measurement in mining organizations. *Saf Sci.* 2016. 83. P. 48–58. doi: 10.1016/j.ssci.2015.11.009.
7. Bosch-Rekveltda M., Jongkindb Y., Mooia H., Bakker H., Verbraeckb A. Grasping project complexity in large engineering projects: the TOE (technical, organizational, and environmental) framework. *Int J Project Manage.* 2011. Iss. 29(6). P. 728–739. doi: 10.1016/j.ijproman.2010.07.008.
8. Badri A. The challenge of integrating OHS into industrial project risk management: proposal of a methodological approach to guide future research (case of mining project in Quebec). *Minerals*. 2015. Vol. 5(2). P. 314–334. doi: 10.3390/min5020314.
9. Становський А. Л., Прокопович І. В., Духанина М. А. Неразрушаючий метод измерения плотности фрагментов песчаных литейных форм. *Збірник наукових праць. «Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві»*. Херсон. 2013. Вип 4(5). С. 104–110.
10. Lambrechts O., Demeulemeester E., Herroelen W. Proactive and reactive strategies for resourceconstrained project scheduling with uncertain resource availabilities. *Journal of scheduling*. 2008. Vol. 11(2). P. 121–136. doi: 10.2139/ssrn.950917.
11. Gerald J., Maylor H., Williams T. Now, let's make it really complex (complicated): a systematic review of the complexities of projects. *Int J Oper Prod Manage.* 2011. Vol. 31(9). P. 966–990. doi: 10.1108/01443571111165848.
12. Папушин Ю. Л., Білецький В. С. *Основи автоматизації гірничого виробництва*. Донецьк : Східний видавничий дім. 2007. 168 с.
13. Іванов А. О. *Теорія автоматичного керування*. Дніпропетровськ: Національний гірничий університет. – 2003. 250 с.
14. Савельєва О. С., Прокопович І. В., Шмараєв А. В. Разработка метрологического обеспечения системы управления технологическим процессом литья под давлением биметаллических отливок. *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. 2015. № 2/1(74). С. 32–37.
15. Оборский Г. А., Прокопович И. В., Коряченко А. А. Интегральные датчики динамических характеристик песчаных литейных форм. *Збірник наукових праць «Інформаційні технології в освіті, науці та виробництві»*. Одеса. 2012. Вип. 1. С. 12–17.
16. Пришляк О. О. *Основи сучасної топології*: навчальний посібник. К. : Київський національний університет імені Тараса Шевченка. 2006. 78 с.
17. Городецький В. В., Житарюк І. В., Мартинюк О. В. *Основи топології в теоремах і задачах*. Ч.: Прут. 2010. 544 с.
18. Становська І. І. Компактність динамічної моделі розвитку проектного управління як міра його ефективності. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. Харків, НТУ «ХПІ». 2019. № 10 (1335). С. 70–76. doi: 10.20998/2413-4295.2019.10.09.
19. Домбровський М. З., Саченко А. О. Модель проектного управління проектом стратегічного розвитку енергопостачальних компаній в турбулентному оточенні. *Вісник Нац. техн. ун-ту «ХПІ»: зб. наук. пр. Сер.: Стратегічне управління, управління портфелями, програмами та проектами*. Харків: НТУ «ХПІ». 2017. № 2 (1224). С. 41–45.
20. Емелин А. Множества. Операции над множествами. *Отображение множеств. Мощности множеств*. URL: <http://mathprofi.ru/mnozhestva.html>. (дата звернення 05.01.2020)
21. Гогунский В. Д., Бирик Т. В., Становская И. И. Управление комплексными рисками проекта сопровождения систем аварийной защиты объектов ответственного назначения. *Вестник Национального университета кораблестроения*. 2012. № 3. С. 104-108.
22. Становський А. Л., Савельєва О. С., Бирик Т. В. Оценка работоспособности сложных технических систем, связанных с повышенной опасностью в эксплуатации. *Матеріали I Всеукраїнської науково-практичної конференції «Сучасні тенденції розвитку інформаційних технологій в освіті»*. Херсон: ХПТК ОНПУ, 14 –15 травня 2009. Ч. 1. С. 46–52.
23. Становський А. Л., Тонконогий В. М., Бирик Т. В. Автоматизация управления объектами повышенной опасности. *Материалы Международной научно-технической конференции «Автоматизация: проблемы, идеи, решения»*. Севастополь: СХТУ, 07–12 сентября 2009. С. 30–33.
24. Fleming Q. W., Hoppelman J. M. *Earned value Project Management*. Project Management Institute. 1996. N.Y. 141p.
25. Зачко О. Б. *Моделі, механізми та інформаційні технології портфельного управління розвитком складних регіональних систем безпеки життєдіяльності*. Монографія. Львів : Вид-во ЛДУ БЖД. 2015. 126 с.
26. Колеснікова К. В., Монова Д. А., Торопенко А. В., Торопенко О. В., Абу Шена Осама Мохаммед Алі. Управління проектом реінжинірингу будівельних конструкцій по обмеженнях у всіх функціональних областях. *Технологічний аудит та резерви виробництва*. 2016. № 5/2 (31). С. 18–23.
27. Yang Y., Xie X. Dual stimulus of hyperthermia and intracellular redox environment triggered release of siRNA for tumor-specific therapy. *Int. J. Pharm.* 2016. Vol. 506 (1–2). P. 158–173. doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.04.035.

28. Lotti Marco, Capponi Michela Giulii, Piazzalunga Dario, Poiasina Elia, Pisano Michele, Manfredi Roberto, Ansaloni, Luca. Laparoscopic HIPEC: A bridge between open and closed-techniques. *Journal of Minimal Access Surgery*. 2016. Vol. 12(1). P. 86–89. doi: 10.4103/0972-9941.158965.

References (transliterated)

1. Kovalev I. V., Tynchenko C. V., Zavyalova O. I., Laikov A. N. Support system for multi-attribute decision making when managing complex systems. *Software products and systems*, 2009. no. 2, p. 142–144.
2. Bushuiev S. D., Yaroshenko Yu. F. Antykryzove upravlinnia finansovymy ustanovamy v umovakh turbulentnosti [Anti-crisis management of financial institutions in conditions of turbulence]. *Upravlinnia rozvytkom skladnykh system [Management of complex systems development]*, 2013, no. 15, p. 5–10, doi: 10.1016/j.ijproman.2016.06.002.
3. Bakhshi J., Ireland V., Gorod A. Clarifying the project complexity construct: past, present and future. *Int J Project Manage.*, 2016, 34(7), p. 1199–1213.
4. Zimek A., Schubert E., Kriegel H. P. A survey on unsupervised outlier detection in high-dimensional numerical data. *Statistical Analysis and Data Mining*, 2012, 5 (5), p. 363–387, doi:10.1002/sam.11161.
5. Stanovska I. I., Kolesnikova K. V. Stratification of individual competencies in order to build dynamic morphological models of project management. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: Strategic management, portfolio management, programs and projects*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2019, no. 1 (1326), p. 30–36.
6. Haas E. J., Yorio P. Exploring the state of health and safety management system performance measurement in mining organizations. *Saf Sci*, 2016, Vol. 83, p. 48–58, doi: 10.1016/j.ssci.2015.11.009.
7. Bosch-Rekveltda M., Jongkindb Y., Mooia H., Bakker H., Verbraeckb A. Grasping project complexity in large engineering projects: the TOE (technical, organizational, and environmental) framework. *Int J Project, Manage.*, 2011, 29 (6), p. 728–739, doi: 10.1016/j.ijproman.2010.07.008.
8. Badri A. The challenge of integrating OHS into industrial project risk management: proposal of a methodological approach to guide future research (case of mining project in Quebec). *Minerals*, 2015, Vol. 5(2), p. 314–334, doi: 10.3390/min5020314.
9. Stanovsky A. L., Prokopovich I. V., Dukhanina M. A. Non-destructive method for measuring the density of fragments of sand foundry molds. *Zbirnik naukovykh prac. "Information technology in the field of science and technology" [Collection of scientific works. "Information technology in education, science and industry"]*, Kherson, 2013, no. 4 (5), p. 104–110.
10. Lambrechts O., Demeulemeester E., Herroelen W. Proactive and reactive strategies for resourceconstrained project scheduling with uncertain resource availabilities. *Journal of scheduling*, 2008, Vol. 11(2), p. 121–136, doi: 10.2139/ssrn.950917.
11. Gerald J., Maylor H., Williams, T. Now, let's make it really complex (complicated): a systematic review of the complexities of projects. *Int J Oper Prod Manage.*, 2011, Vol. 31(9), p. 966–990, doi: 10.1108/01443571111165848.
12. Papushin Y. L., Biletsky V. S. *Fundamentals of automation of mining*. Donetsk: Eastern Publishing House, 2007, 168 p.
13. Ivanov A. A. *Theory of automatic control*. Dnepropetrovsk: National Mining University, 2003, 250 p.
14. Savelyeva O. S., Prokopovich I. V., Shmaraev A. V. Development of metrological support for the process control system for injection molding of bimetallic castings. *East European Journal of Advanced Technology*, 2015, no. 2/1 (74), p. 32–37.
15. Oborsky G. A., Prokopovich I. V., Koryachenko A. A. Integrated sensors of dynamic characteristics of sand foundry molds. *Collection of scientific works "Information technologies in education, science and production"*, Odessa, 2012, 1, p. 12–17.
16. Pryshlyak O. O. *Fundamentals of modern topology: a textbook*. Kyiv: Taras Shevchenko National University of Kyiv, 2006, 78 p.
17. Gorodetsky V. V., Zhitaryuk I. V., Martyniuk O. V. *Fundamentals of topology in theorems and problems*. Ch.: Prut, 2010, 544 p.
18. Stanovska I. I. Compactness of the dynamic model of project management development as a measure of its efficiency. *Bulletin of NTU "KhPI", Series: New solutions in modern technologies*. Kharkiv, NTU "KhPI", 2019, no. 10 (1335), p. 70–76, doi: 10.20998/2413-4295.2019.10.09.
19. Dombrovsky M. Z., Sachenko A. A. Model of proactive project management of strategic development of energy supply companies in a turbulent environment. *Bulletin of National Technical University "KhPI": coll. of sci. papers. Ser.: Strategic management, portfolio, program and project management*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2017, no. 2 (1224), p. 41–45.
20. Emelin A. Sets. *Operations on sets. Display sets. The power of the set*. Available at: <http://mathprofi.ru/mnozhestva.html> (accessed 05.01.2020).
21. Gogunsky V. D., Bibik T. V., Stanovskaya I. I. Integrated risk management for the project of escorting emergency protection systems for critical facilities. *Bulletin of the National University of Shipbuilding*, 2012, No. 3, 104–108.
22. Stanovsky A. L., Savelyeva O. S., Bibik T. V. Evaluation of the performance of complex technical systems associated with increased danger in operation. *Proceedings of the First All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "Modern Trends in the Development of Information Technologies in Education"*. Kherson: KhPTK ONPU, 14–15 May, 2009, Part 1, p. 46–52.
23. Stanovsky A. L., Tonkonog V. M., Bibik T. V. Automation of management of hazardous facilities. *Materials of the International scientific and technical conference "Automation: problems, ideas, solutions"*, Sevastopol: SNTU, September 7–12, 2009, p. 30–33.
24. Fleming Q. W., Hoppelman J. M. Earned value Project Management. *Project Management Institute*, 1996, N.Y., 141 p.
25. Zachko O. B. *Models, mechanisms and information technologies of portfolio management of complex regional life safety systems*. Monograph, Lviv: LSU BJD Publishing House, 2015, 126 p.
26. Kolesnikova K. V., Monova D. A., Toropenko A. V., Toropenko O. V., Abu Shen Osama Mohammed Ali. Project management of reengineering of building structures on restrictions in all functional areas. *Technological audit and production reserves*, 2016, no. 5/2 (31), p. 18–23.
27. Yang Y., Yang Y., Xie X. Dual stimulus of hyperthermia and intracellular redox environment triggered release of siRNA for tumor-specific therapy. *Int. J. Pharm.*, 2016, Vol. 506 (1–2), p. 158–173, doi: 10.1016/j.ijpharm.2016.04.035.
28. Lotti Marco, Capponi Michela Giulii, Piazzalunga Dario,

Poiasina Elia, Pisano Michele, Manfredi Roberto, Ansaloni, Luca. Laparoscopic HIPEC: A bridge between open and

closed-techniques. *Journal of Minimal Access Surgery*, 2016, Vol. 12(1), p. 86–89, doi: 10.4103/0972-9941.158965.

Відомості про авторів (About authors)

Становська Іраїда Іванівна – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, професор кафедри вищої математики та моделювання систем, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0003-0601-7658; e-mail stanovskairaida@gmail.com.

Iraida Stanovska – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Professor of Higher Mathematics and Modeling Systems Department, Odessa National Polytechnic University Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0601-7658; e-mail stanovskairaida@gmail.com.

Становський Олександр Леонідович – доктор технічних наук, професор, Одеський національний політехнічний університет, завідувач кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0002-0360-1173; e-mail ostanovskyi@gmail.com.

Oleksandr Stanovskyi – Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0002-0360-1173; e-mail ostanovskyi@gmail.com.

Прокопович Ігор Валентинович – доктор технічних наук, доцент, Одеський національний політехнічний університет, директор інституту медичної інженерії, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0002-8059-6507; e-mail: igor.prokopovich@gmail.com.

Igor Prokopovich – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Director of the Institute of Medical Engineering, Odessa National Polytechnic University Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0002-8059-6507; e-mail: igor.prokopovich@gmail.com.

Науменко Євгенія Олександрівна – кандидат технічних наук, Одеський національний політехнічний університет, старший викладач кафедри нафтогазового та хімічного машинобудування, м. Одеса, Україна; ORCID: 0000-0002-6963-3995; e-mail naumenko.e.o@opu.ua

Ievgeniia Naumenko – Candidate of Technical Sciences, Senior Lecturer of Oil, Gas and Chemical Mechanical Engineering Department, Odessa National Polytechnic University, Odessa, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6963-3995; e-mail naumenko.e.o@opu.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Становська І. І., Становський О. Л., Прокопович І. В., Науменко Є. О. Метод експрес-вимірювання стану складних систем за допомогою параметричного показника. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 85– 5. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.11.

Please cite this article as:

Stanovska I., Stanovskyi O., Prokopovich I., Naumenko I. Express method of the complex systems state measurement using the parametric indicator. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 85– 5, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.11.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Становская И. И., Становский А. Л., Прокопович И. В., Науменко Е. А. Метод экспресс-измерения состояния сложных систем с помощью параметрического показателя. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 85– 5. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.11.

АННОТАЦІЯ Кожне антикризисне втручання в життєвий цикл складної системи (ЖЦСС) фактично руйнує його первинний план – останній все більше відрізняється від реальності, а якщо таких втручань багато, то від первинного плану може залишитися нічого! Моделі, які використовувалися при первинному плануванні ЖЦСС стають неадекватними, миттєво і негативно впливають на точність і ефективність антикризисних параметричних рішень. Команда проекту після кожного значущого параметричного втручання повинна швидко приступити до створення нового плану, для чого необхідно забезпечити нову методологію антикризисного управління проектами на основі параметричного експрес-аналізу організаційно-технічних систем для оцінки поточного стану проекту. Для антикризисного управління будь-яким об'єктом з зворотним зв'язком необхідно мати можливість відносно швидко вимірювати параметри стану цього об'єкта як реакції на управлінське втручання. Тому, метою наукового дослідження, в якому складним об'єктом був проектний менеджмент, стало створення методу експрес-вимірювання стану проекту з використанням запропонованого параметричного показника. Побудована система управління антикризисною діяльністю складних технічних систем на основі зворотного зв'язку по відхиленню поточного ходу проекту від планового. Представлено новий комплексний параметр Π , однозначно і репрезентативно відображає відхилення параметрів поточного ходу проекту від планового. Показатель представляє собою безрозмірну частину, де в чисельнику – сума приведених вартостей втрачених параметрів, в знаменнику – сума приведених вартостей параметрів загалом. Це дозволило використовувати цей показник як критерій необхідності початку процесу протидії відповідним кризам. Визначено методи їх експрес-вимірювання і розрахунку. На основі проведених досліджень розроблено схему підсистеми комп'ютерної підтримки прийняття проектних рішень по плануванню і виконанню антикризисного управління.

Ключові слова: життєвий цикл; антикризисне управління; стан складної системи; параметричний показник

Надійшла (received) 15.02.2020

УДК 338.27/ 637.51

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.12

ОПТИМІЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ М'ЯСА ПТИЦІ ЗА ТЕХНОЛОГІЄЮ SOUS VIDE ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФОСФАТНОЇ СУМІШІ

Д. В. ГАРМАШ^{*1}, В. М. ПАСІЧНИЙ²

¹ Проблемна науково-дослідна лабораторія Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА

² кафедра технологій м'яса та м'ясопродуктів Національного Університету Харчових Технологій, Київ, УКРАЇНА

*e-mail: garmash93@gmail.com

АНОТАЦІЯ У статті висвітлюється вплив різних режимів термічної обробки за технологією *Sous Vide* продуктів з м'яса птиці (філе та стегна курчат-бройлерів) на основні функціонально-технологічні характеристики готового продукту. Усі дослідні зразки отримані з торгових мереж і мали ознаки порушення автолітичних процесів PSE з рівнем pH продукту 5,6-5,8. Зразки було піддано ін'єктуванню фосфатно-сольовим розчином з метою підвищення рівня pH та збільшення функціонально-технологічних характеристик. Рецептури усіх зразків включали в себе 85% основної м'ясної сировини (філе та стегна курчат-бройлерів) та 15 % розчину функціональної суміші на основі фосфатів та клітковини. Для визначення оптимальних режимів термічної обробки продукту було побудовано повний двох факторний експеримент. В якості факторів обрано час та температуру термічної обробки, які варіювалися за межовими значеннями на рівнях 68 °C та 120 хв та 62 °C протягом 100 хв відповідно. Внесення функціональної суміші проводили однаковою методом за мінімального тиску 0,15 Бар, після чого сировину вміщали у вакуумні пакети, створювали розрідження при герметизації та витримували протягом 90 хв для ініціювання процесів зв'язування вологи інгредієнтами суміші. Температура розчину функціональної суміші перед ін'єктуванням – 4 °C, а температура сировини у товщі м'язів – 6 °C. В якості дослідних показників було обрано вологосв'язуючу здатність, вихід та pH готового продукту, кількість та pH відділеного в процесі термічної обробки бульйону та пластичність готового продукту. Згідно отриманих результатів оптимальною визнано температуру обробки 62 °C при тривалості обробки 120 хв. Попри це, обробка за температури 68 °C протягом 100 хв дозволяє отримати значення рівнів досліджуваних характеристик в близькому діапазоні. Дані режими обробки дозволяють досягнути значень вологосв'язуючої здатності 80-82% для філе курчат-бройлерів та 79-80 °C для стегна. Різниця між рівнем показників для стегна та філе курчат-бройлерів знаходилась в межах 5% для усіх характеристик окрім пластичності, яка була значно більшою для готового стегна курчат-бройлерів.

Ключові слова: технологія *Sous Vide*; вакуум; м'ясо курчат-бройлерів; фосфати; функціонально-технологічні властивості; термічна обробка

OPTIMIZATION OF THE POULTRY MEAT HEAT TREATMENT PROCESS WITH PHOSPHATE MIXTURE APPLICATION

D. GARMASH^{*1}, V. PASICHNYI²

¹ Problematic scientific-research laboratory of NUFT, Kyiv, UKRAINE

² Head of Department of meat and meat products technology of NUFT, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT This article highlights the impact of different heat treatment modes on *Sous Vide* of poultry meat products (fillets and thighs of broiler chickens) on the main functional and technological characteristics of the finished product. All prototypes were obtained from commercial networks and showed signs of impaired PSE autolytic processes with a product pH of 5.6-5.8. Samples were injected with phosphate solution to increase pH and to increase functional and technological characteristics. The formulations of all the samples included 85% of the main raw meat (fillets and thighs of broiler chickens) and 15% solution of a functional mixture based on phosphate and fiber. A complete two-factor experiment was constructed to determine the optimal modes of product heat treatment. The factors chosen were the time and temperature of the heat treatment, which varied, respectively, along the upper limit of values at 68 °C and 120 min and 62 °C for 100 min at the lower limit of values. The introduction of the functional mixture was carried out by the same method at a minimum pressure of 0.15 Bar, after which the raw material was placed in vacuum bags, created a vacuum and kept for 90 minutes to initiate the processes of binding of moisture by the ingredients of the mixture. The solution temperature of the functional mixture before injection is 4 °C, and the temperature of the raw material in the muscle thickness is 6 °C. Water holding capacity, yield and pH of the finished product, the amount and pH of the broth separated during the heat treatment, and the plasticity of the finished product were selected as experimental parameters. According to the obtained results, the treatment temperature of 62 °C is considered optimal with treatment duration of 120 min. These treatment regimes allow achieving the values of water holding capacity at 80-82% for broiler chicken fillets and 79-80 °C for the thigh. The difference between the level of indicators for the thigh and the broiler chicken fillet was within 5% for all characteristics except plasticity, which was significantly greater for the finished thigh of the broiler chickens.

Keywords: *Sous Vide* technology; vacuum; poultry meat; phosphates; functional and technological properties; heat treatment

Вступ

Виробництво якісних і безпечних виробів є основним завданням діяльності будь-якого

промислового та ресторанного господарства. В даний час тільки одиничні підприємства серед усіх виробників м'ясопереробної галузі реалізують

продукти, що пройшли термічне оброблення в вакуумованих термопакетах. Застосування такої технології дозволяє не тільки отримати продукцію високої якості, а й зменшити втрати сировини під час термічного оброблення. На термічному обробленні напівфабрикатів у вакуумованих термопакетах при низьких температурах із наступним їх швидким охолодженням і подальшою регенерацією заснована технологія *Sous Vide*, яка вважається математично точним методом термічної обробки, що вимагає підтримання постійної температури протягом всього часу приготування. Описана технологія максимально забезпечує збереження усіх смако-ароматичних сполук, властивих природному флейвору м'ясної сировини в процесі ферментації [1-3].

Хоча обробка при різних температурах із застосуванням бар'єрних [4] плівок покращує органолептичні характеристики продукції, виникають певні застереження з точки зору мікробіологічної безпеки даного виду обробки [4]. Загальновідомим є те, що летальність впливу термічної обробки на мікроорганізми є прямо пропорційною до температури, що досягається у товщі продукту та часу, за якого дана температура підтримується [5]. Загалом, температура обробки визначає критичний вплив і є основною величиною, від якої залежить мікробіологічна стабільність готового продукту [6]. За умови достатньої санітарії виробництва (особливо на етапі первинної обробки сировини) та тривалого в часі процесу термічного оброблення, *Sous Vide* може забезпечити достатню летальність для більшості патогенних мікроорганізмів. Проте деякі види таких організмів та летальність впливу на них даного виду обробки потребують детального дослідження [7]. Особливо актуальним є питання мікробіологічної безпеки виробів із м'яса птиці, зважаючи на два фактори, що підвищують ризик при їх переробці. Першим фактором є більший вміст вологи у м'ясі курчат-бройлерів, порівняно з іншими видами м'яса, що є наслідком як і природної морфології даного виду птиці, так і суто технологічних маніпуляцій, притаманних багатьом виробникам м'яса курчат-бройлерів [8]. Другим фактором є те, що мікрофлора м'яса курчат-бройлерів є відмінною від аналогічної характеристики яловичини і свинини [9].

Так автори [10] досліджували термостійкість коктейлю з п'яти штамів сальмонел і п'яти штамів *L. monocytogenes* в курячих грудках, попередньо маринованих у соусі теріякі. Ін'єктоване м'ясо, упаковане в непроникну плівку, повністю занурювали у водяну баню з циркуляцією і піддавали тепловій обробці до кінцевої температури 55, 57,5 або 60 ° С протягом 1 години, а потім витримували протягом попередньо визначеного часу. Після остигання виробу відбирали проби для мікробіологічних досліджень.

Живі клітини мікроорганізмів *Salmonella* і *L. monocytogenes* підраховували шляхом поверхневого висіву на агарному середовищі XLD і агарі Palscam відповідно. Значення кількості мікроорганізмів D, визначені за допомогою методу лінійної регресії сальмонел в м'ясній сировині, варіювалися від 47,65 млн. при 55 ° С до 7,48 млн. при 60 ° С; значення для *L. monocytogenes* варіювалися від 54,81 млн. при 55 ° С до 10,39 млн. при 60 ° С. Витримування та ін'єктування соусом дозволило збільшити чутливість патогенних організмів до летального впливу тепла навіть за низьких температур обробки [10].

Таким чином, наведені дані підводять до пошуку оптимальних режимів обробки, які давали б можливість забезпечити дотримання вимог як з боку сировини, так характеристик готового продукту.

До цих вимог можна віднести наступні:

- можливість забезпечити інактивацію патогенної та умовно-патогенної мікрофлори під впливом термічної обробки, а також достатній летальний вплив нагрівання.

- можливість використовувати для виробництва сировину з вадами автолітичних показників, низькими показниками вологозв'язуючої здатності (B33) та pH, зважаючи на те, що більшість сировини, представленої на ринку має ці відхилення [11].

- мінімізацію втрат при термічному обробленні та утворення бульйону, а також збереження якісних показників в об'ємі продукту після його готовності.

- забезпечення необхідної консистенції готового продукту та мінімізувати витрати енергоресурсів в часі теплового оброблення.

З урахуванням попередньо отриманих результатів, в якості діапазону температур та часу термічного оброблення м'яса курчат-бройлерів було обрано 62-68°C та 90-120 хв відповідно [12]. Дані режими дозволяють досягнути достатнього рівня летальності для більшості мікроорганізмів, проте з метою збільшення термінів зберігання готового продукту до складу розсолу введено антимікробний препарат на основі органічних кислот. Досліджувались 8 зразків – 4 з філе та 4 зі стегна курчат-бройлерів, які піддавались обробці за чотирма варіантами, залежно від часу та температури. З використанням плану повного факторного експерименту можна чітко встановити залежність досліджуваних функціонально-технологічних характеристик від впливу кожного з наведених факторів (часу та температури). Також важливим є забезпечення не лише мікробіологічної безпеки, але і достатнього виходу продукту, що є актуальним з огляду на велику вологість сировини та наявність відхилень значень функціонально-технологічних показників, спричинених вадами автолізу.

Мета роботи

Метою роботи є встановити залежність значень функціонально-технологічних характеристик (вихід готового продукту, значення pH, ВЗЗ, вміст вологи у готовому продукті та пластичність) від температури та часу термічного оброблення м'яса курчат-бройлерів (філе та стегна) у досліджуваному діапазоні температур (62-68 °C) та часу (100-120 хв).

Встановлення даних залежностей дозволить обрати оптимальний режим термічного оброблення для білого і червоного м'яса курчат-бройлерів.

Виклад основного матеріалу

Згідно плану експерименту було досліджено 8 зразків, за планом повного трьох факторного експерименту, в якому передбачено три фактори – час термічного оброблення, температура, а також вид досліджуваної сировини. Проте, оскільки аналіз та інтерпретація повно факторних експериментів вимагають наявності числового вираження контрольованих факторів та можливості обрахунку нульового (або середнього) значення, сформований план експерименту не можна назвати планом повного трьох факторного експерименту. Вид сировини можна виразити шляхом введення значень, які є вирішальними з точки зору різниці у фізико-хімічних властивостях продукту або сировини. Для м'яса курчат-бройлерів основна різниця між м'ясом стегна та грудини (філе) полягає у вмісті вологи, значення pH та амінокислотному складі [13]. Зважаючи на те, що дві з цих характеристик – вміст вологи та амінокислотний склад, залежать від великої кількості змінних факторів, в якості фактору, через який можна виразити вид сировини, варто обрати pH продукту. План експерименту наведено у табл. 1.

Представлення плану експерименту в стандартному вигляді, значно спрощує обрахунок та інтерпретація отриманих результатів. Аналіз отриманих результатів проводиться з метою формування бази для подальших досліджень та (за потреби) формування в подальшому математичних моделей для даного діапазону режимів обробки з урахуванням обрахунків рівняння регресії.

При аналізі результатів використовуємо приведені середні значення. При інтерпретації даних приймаємо дані як два окремих плани двох факторного експерименту окремо для філе та м'яса стегна.

Зважаючи на те, що метою даною роботи є визначити вплив факторів режимів термічної обробки для кожного виду сировини, а не обрати єдиний прийнятний вид сировини. При аналізі показників звертали увагу на найбільшу варіативність показників, а також врахувати те, наскільки важливою

є дана характеристика для формування оцінки якості продукту при визначенні його відповідності за сенсорними і функціонально-технологічними показниками.

Рецептура дослідного розсолу функціональної суміші включала в себе суміш фосфатів, клітковину, цукор та воду. Введення фосфатів є одним з основних технологічних способів нівелювання наслідків впливу автолітичних процесів з ознаками PSE, що проявляється у зниженні значень pH сировини, підвищеному вмісті вологи у сировині, а також зниженому значень ВЗЗ. Рецептuru використаного розсолу наведено у табл. 2. Важливим є також врахування вміст складових інгредієнтів розсолу на якість готового продукту. Для цього враховували рівень ін'єктування – 15% і вихід готового продукту в перерахунку вмісту інгредієнтів на фактичний рівень їх вмісту у готових виробках.

Таблиця 1 – План експерименту

Номер зразка	Сировина	Z ₁	Z ₂	Z ₃	pH	T, °C	t, хв
1	М'ясо стегна курчат-бройлерів	+	+	+	5,65	68	120
2		+	+	-	5,65	68	100
3		+	-	+	5,65	62	120
4		+	-	-	5,65	62	100
5	Філе курчат-бройлерів	-	+	+	5,8	68	120
6		-	+	-	5,8	68	100
7		-	-	+	5,8	62	120
8		-	-	-	5,8	62	100

Таблиця 2 – Рецептuru розсолу і частка інгредієнтів

Назва	Кг/100 кг розсолу	г/100 кг сировини	г/100 кг продукту
Суміш триполіфосфатів	0,22	33	38,82
Сіль кухона	8	1200	1411,8
Клітковина	1,9	285	335,3
Цукор	0,28	42	49,40
Вода	89,6	13440	-

Згідно отриманих даних про вихід аналогічних продуктів, прогнозованим виходом можна вважати 85% [14]. Розраховували вміст інгредієнтів у ін'єктованій сировині, перемножуючи фактичний вміст даної складової у розсолі на 0,15 (прийнятий рівень введення розсолу на 1 кг сировини). Фактичний вміст

складових у готовому продукті розраховували як частку від ділення значення вмісту даного інгредієнту після інектування і значення виходу в цілому вираженні (0,85). Таким чином, вміст фосфатної суміші розраховували за наступною формулою

$$Вф = Мф \cdot А \cdot 1000 / q, \quad (1)$$

де Вф – вміст фосфатів у готовому продукті, г на 100 кг, 1000 – коефіцієнт перерахунку кілограмів на грами, А – вміст суміші фосфатів у розсолі, кг на 100 кг, q – вихід готового продукту (0,85).

$$Вф = 0,22 \cdot 0,15 \cdot 1000 / 0,85 \approx 38,82 \text{ г/100 кг.}$$

Аналогічно розраховані також інші значення вмісту інгредієнтів, не включаючи воду. Після відбору сировини було визначено рівень рН для визначення впливу обробки на даний показник. Рівень рН визначали потенціометричним методом у розведенні 1 до 10, аналогічно визначали і рН бульйону, який відділився у процесі термічного оброблення. Значення ВЗЗ визначали методом пресування, як і значення пластичності [15].

Технологічний процес виробництва продукту включав в себе приготування розсолу, ін'єктування сировини, пакування та витримання сировини у посолі у вакуумних пакетах, варіння у воді при фіксованій температурі та остигання [16]. Внесення функціональної суміші проводили однаковим методом за мінімального тиску 0,15 Бар, після чого сировину пакували у вакуумні пакети, створювали розрідження та витримували протягом 90 хв для ініціювання процесів зв'язування вологи.

Температура розчину функціональної суміші перед ін'єктуванням 4 °С, а температура сировини у товщі м'язів 6 °С. Отримані результати наведено у табл. 3.

Таблиця 3 – Характеристики зразків після термічного оброблення

Номер зразка	рН, бульйону	рН	Вміст вологи, %
1	6,5	6,5	68,95
2	6,4	6,6	70,84
3	6,2	6,7	75,45
4	6,2	6,9	78,28
5	6,0	6,25	64,24
6	5,9	6,2	66,15
7	5,75	6,6	68,85
8	5,9	6,45	65,94

Обговорення результатів

Усі зразки з часом обробки 100 хв продемонстрували більший вміст вологи, проте за іншими характеристиками важко встановити однозначну залежність від часу обробки інших функціонально-технологічних показників – у різних зразках обрані характеристики демонструють як і зростання, так і падіння порівняно з характеристиками аналогічних зразків. Таким чином, сам по собі час термічного оброблення не є вирішальним щодо впливу на функціонально-технологічні характеристики.

Згідно даних табл. 4 максимальний рівень ВЗЗ зафіксовано у зразку 4, підданому обробці протягом 100 хв при 62 °С – 80,44%. Мінімальне значення ВЗЗ для даного виду сировини в той же час зафіксоване у зразку 2, який також оброблявся протягом 100 хв. Для зразків філе курчат-бройлерів максимальне значення ВЗЗ зафіксовано у зразку 6 з часом обробки 100 хв та температурою 68 °С, а мінімальне значення даної характеристики – у зразку 8 з аналогічним часом обробки, що також підтверджує відсутність залежності ВЗЗ продукту від часу термічного оброблення при заданих умовах нагрівання.

Таблиця 4 – Показники зразків після термообробки

Номер	ВЗЗ, %	Пластичність, кг/см ²	Вихід, %
1	71,38	435,1	84,4
2	70,59	402,5	90,1
3	79,12	480,2	92,5
4	80,44	462,4	86,9
5	80,32	306,8	93,4
6	82,06	320,4	97,6
7	76,57	355,6	98,9
8	72,65	342,5	91,5

Температура теплового оброблення по-різному впливає на показники білого і червоного м'яса. Значення ВЗЗ для зразків 1-2 (варіння при 68 °С) було меншим за ВЗЗ зразків 3-4, в той же час, коли значення ВЗЗ в зразках 5-8 досягало максимуму для зразків, 5-6 (варіння при 62 °С). Проте, для обох груп м'ясної сировини вплив температури на вихід пов'язаний з часом нагріву. Виходячи з цих даних, можна зробити висновок про те, що хоча температура має більший вплив на досліджувані характеристики, ніж час обробки, проте сама по собі не є вирішальним фактором у формуванні функціональних характеристик та по-

різному впливає на зміни властивостей продуктів з філе та м'яса стегна курчат-бройлерів.

З представлених даних можна зробити висновок, що максимальні значення більшості функціональних характеристик досягаються у зразках з так званими «середніми» рівнями впливу тепла. На практиці це проявляється у тому що максимум значень вмісту вологи та максимальний вихід продукту знаходяться у одному діапазоні значень для зразків, оброблених або протягом 100 хв при 68 °C, або протягом 120 хв при 62 °C.

Висновки

Визначено, що для червоного м'яса курчат-бройлерів оптимальними є тривалість обробки 120 хв за температури 62°C. Дані режими обробки дозволяють досягнути максимального виходу готового продукту, високого рівня пластичності та ВЗЗ. Для білого м'яса курчат-бройлерів високих функціональних характеристик можна досягнути при обробці протягом 100 хв при 68 °C.

Визначено, що використання фосфатних сумішей дозволяє стабілізувати значення рН готових виробів і покращує функціонально-технологічні показники продукції при використанні у кількості до 0,04% масової частки в складі готового продукту.

Список літератури

1. Jørgensen F., Sadler-Reeves L., Shore J., Aird H., Elviss N., Fox A., McLauchlin J. An assessment of the microbiological quality of lightly cooked food (including sous-vide) at the point of consumption in England. *Epidemiology & Infection*. 2017. V. 145. №. 7. P. 1500-1509. doi: 10.1017/S0950268817000048.
2. Ukrainets A., Pasichnyi V., Shvedyuk D., Matsuk Y. Investigation of proteolysis ability of functional destined minced half-finished meat products. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*. 2017. 19(75), 129-133. doi:10.15421/nvlvet7526.
3. Pasichnyi V., Ukrainets A., Khrapachov O., Marynin A. Main aspects of using multilayer polymeric materials for pasteurization and sterilization of products in the meat processing industry. *Scientific Works of National University of Food Technologies*. 2018. 24(4). 195-203.
4. Abel T., Boulaaba A., Lis K., Abdulmawjood A., Plötz M., Becker A. Inactivation of *Listeria monocytogenes* in game meat applying sous vide cooking conditions. *Meat Science*. 2020. P. 108164. doi: 10.1016/j.meatsci.2020.108164.
5. Pasichnyi V., Ukrainets A., Shvedyuk D., Al-Hashimi H. M., Matsuk Y. Determination of the Optimal Sterilization Regime of Canned Quail Meat with Hydrocolloids Application. *EUREKA: Life Sciences*. 2017. №. 4. P. 21-25. doi: 10.21303/2504-5695.2017.00379.
6. Li X., Farid M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies. *Journal of Food Engineering*. 2016. V. 182. P. 33-45. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.02.026.

7. Yadav A. S., Kolluri G., Gopi M., Karthik K., Singh Y. Exploring alternatives to antibiotics as health promoting agents in poultry - a review. *J. Exp. Biol.*. 2016. V. 4. №. 3S-10.18006. P. 3S. doi: 10.18006/2016.4(3S).368.383.
8. Petracci M., Mudalal S., Soglia F., Cavani C. Meat quality in fast-growing broiler chickens. *World's Poultry Science Journal*. 2015. V. 71. №. 2. P. 363-374. doi: 10.1017/S0043933915000367.
9. Karyotis D., Skandamis P. N., Juneja V. K. Thermal inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. in sous-vide processed marinated chicken breast. *Food Research International*. 2017. V. 100. P. 894-898. doi: 10.1016/j.foodres.2017.07.078.
10. Valenzuela-Melendres M., Pena-Ramos E. A., Juneja V. K., Camou J. P., Cumplido-Barbeitia G. Effect of Grapefruit Seed Extract on Thermal Inactivation of *Listeria monocytogenes* during Sous-Vide Processing of Two Marinated Mexican Meat Entrées. *Journal of food protection*. 2016. V. 79. №. 7. P. 1174-1180. doi: 10.4315/0362-028X.JFP-15-352.
11. Silva D. C. F., de Arruda A. M. V., Gonçalves A. A. Quality characteristics of broiler chicken meat from free-range and industrial poultry system for the consumers. *Journal of food science and technology*. 2017. V. 54. №. 7. P. 1818-1826. doi: 10.1007/s13197-017-2612-x.
12. Гармаш Д. В., Пасічний В. М. Вплив застосування технології sous vide на функціонально-технологічні характеристики продуктів на основі різних видів м'ясної сировини. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2019. № 1. С. 67-74. doi:10.20998/2413-4295.2019.01.08.
13. Chen Y., Qiao Y., Xiao Y., Chen H., Zhao L., Huang M., Zhou G. Differences in physicochemical and nutritional properties of breast and thigh meat from crossbred chickens, commercial broilers, and spent hens. *Asian-Australasian journal of animal sciences*. 2016. V. 29. №. 6. P. 855. doi: 10.5713/ajas.15.0840.
14. Kim J. H., Hong G. E., Lim K. W., Park W., Lee C. H. Influence of citric acid on the pink color and characteristics of sous vide processed chicken breasts during chill storage. *Korean journal for food science of animal resources*. 2015. V. 35. №. 5. P. 585. doi: 10.5851/kosfa.2015.35.5.585.
15. Кишенько І. І., Старцова В. М., Гончаров Г. І. *Технологія м'яса та м'ясопродуктів. Практикум: навч. Посібник*. Нац. ун-т харч. технолог. Київ: НУХТ, 2010. 367 с.
16. Пасічний В. М., Гармаш Д. В., Рамік О. С., Кохан Б. А. Вплив застосування технології sous vide на різні види м'яса птиці. *Харчові технології*. 2018. №24. С. 70-76. doi: 10.24263/2225-2916-2018-24-11.

References (transliterated)

1. Jørgensen F., Sadler-Reeves L., Shore J., Aird H., Elviss N., Fox A., McLauchlin J. An assessment of the microbiological quality of lightly cooked food (including sous-vide) at the point of consumption in England. *Epidemiology & Infection*, 2017, 145, №. 7, P. 1500-1509, doi: 10.1017/S0950268817000048.
2. Ukrainets A., Pasichnyi V., Shvedyuk D., Matsuk Y. Investigation of proteolysis ability of functional destined minced half-finished meat products. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies*, 2017, 19(75), 129-133, doi:10.15421/nvlvet7526.

3. Pasichnyi V., Ukrainets A., Khrapachov O., Marynin A. Main aspects of using multilayer polymeric materials for pasteurization and sterilization of products in the meat processing industry. *Scientific Works of National University of Food Technologies*, 2018, 24(4), 195-203.
4. Abel T., Boulaaba A., Lis K., Abdulmawjood A., Plötz M., Becker A. Inactivation of *Listeria monocytogenes* in game meat applying sous vide cooking conditions. *Meat Science*, 2020, P. 108164, doi: 10.1016/j.meatsci.2020.108164.
5. Pasichnyi V., Ukrainets A., Shvedyuk D., Al-Hashimi H. M., Matsuk Y. Determination of the Optimal Sterilization Regime of Canned Quail Meat with Hydrocolloids Application. *EUREKA: Life Sciences*, 2017, №. 4, P. 21-25, doi: 10.21303/2504-5695.2017.00379.
6. Li X., Farid M. A review on recent development in non-conventional food sterilization technologies. *Journal of Food Engineering*, 2016, V. 182, P. 33-45, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2016.02.026.
7. Yadav A. S., Kolluri G., Gopi M., Karthik K., Singh Y. Exploring alternatives to antibiotics as health promoting agents in poultry-a review. *J Exp Biol*, 2016, V. 4, №. 3S-10.18006, P. 3S, doi:10.18006/2016.4(3S).368.383.
8. Petracci M., Mudalal S., Soglia F., Cavani C. Meat quality in fast-growing broiler chickens. *World's Poultry Science Journal*, 2015, V. 71, №. 2, P. 363-374, doi: 10.1017/S0043933915000367.
9. Karyotis D., Skandamis P. N., Juneja V. K. Thermal inactivation of *Listeria monocytogenes* and *Salmonella* spp. in sous-vide processed marinated chicken breast. *Food Research International*, 2017, V. 100, P. 894-898, doi: 10.1016/j.foodres.2017.07.078.
10. Valenzuela-Melendres M., Pena-Ramos E. A., Juneja V. K., Camou J. P., Cumplido-Barbeitia G. Effect of Grapefruit Seed Extract on Thermal Inactivation of *Listeria monocytogenes* during Sous-Vide Processing of Two Marinated Mexican Meat Entrées. *Journal of food protection*, 2016, V. 79, №. 7, P. 1174-1180, doi: 10.4315/0362-028X.JFP-15-352.
11. Silva D. C. F., de Arruda A. M. V., Gonçalves A. A. Quality characteristics of broiler chicken meat from free-range and industrial poultry system for the consumers. *Journal of food science and technology*, 2017, V. 54, №. 7, P. 1818-1826, doi: 10.1007/s13197-017-2612-x.
12. Garmash D. V., Pasichnyi V. M. Vplyv zastosuvannya tekhnologii sous vide na funktsionalno-tekhnolohichni kharakterystyky produktiv na osnovi riznykh vydiv miasnoi syrovyny. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2019, No 1, S. 67-74, doi:10.20998/2413-4295.2019.01.08.
13. Chen Y., Qiao Y., Xiao Y., Chen H., Zhao L., Huang M., Zhou G. Differences in physicochemical and nutritional properties of breast and thigh meat from crossbred chickens, commercial broilers, and spent hens. *Asian-Australasian journal of animal sciences*, 2016, V. 29, №. 6, P. 855, doi: 10.5713/ajas.15.0840.
14. Kim J. H., Hong G. E., Lim K. W., Park W., Lee C. H. Influence of citric acid on the pink color and characteristics of sous vide processed chicken breasts during chill storage. *Korean journal for food science of animal resources*, 2015, V. 35, №. 5, P. 585, doi: 10.5851/kosfa.2015.35.5.585.
15. Kishen'ko I. I., Starchov V. M., Goncharov G. I. *Tekhnologija m'jasa ta m'jasoproduktiv. Praktikum: navch. Posibnik* [Technology of meat and meat products. Workshop: Teaching Manual]. National un-t food. Technol, Kyiv: NUKHT, 2010. 367.
16. Pasichnyi V. M., Harmash D. V., Ramik O. S., Kokhan B. A. Vplyv zastosuvannya tekhnologii sous vide na rizni vydy miasa ptytsi. *Kharchovi tekhnolohii*, 2018, №24, P.70-76, doi: 10.24263/2225-2916-2018-24-11.

Відомості про авторів (About authors)

Гармаш Дмитро Вікторович – аспірант, Проблемна науково-дослідна лабораторія, Національний Університет Харчових технологій, м. Київ; e-mail: garmash93@gmail.com . ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9591-9364>.

Dmytro Garmash – postgraduate, National University of Food Technologies, Problematic scientific-research laboratory, Kyiv, Ukraine; e-mail: garmash93@gmail.com. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9591-9364>.

Пасічний Василь Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний Університет Харчових технологій, професор, завідувач кафедри Технології м'яса та м'ясних продуктів, м. Київ, Україна; e-mail: pasww1@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-5590>.

Vasyl Pasichnyi – Doctor of Science, Professor, National University of Food Technologies, professor, Head of the Department of meat and meat products, Kyiv, Ukraine; e-mail: pasww1@ukr.net. ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-0138-5590>.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гармаш Д. В., Пасічний В. М. Оптимізація процесу термічної обробки м'яса птиці за технологією sous vide із застосуванням фосфатної суміші. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 6– 0 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.12.

Please cite this article as:

Garmash D., Pasichnyi V. Optimization of the poultry meat heat treatment process with phosphate mixture application. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 6– 0 , doi:10.20998/2413-4295.2020.02.12.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гармаш Д. В., Пасичный В. Н. Оптимизация процесса термической обработки мяса птицы по технологии sous vide с применением фосфатной смеси. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 6- 0 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.12.

АННОТАЦИЯ Данная статья освещает влияние различных режимов термической обработки по технологии Sous Vide продуктов на основе мяса птицы (филе и бедра цыплят-бройлеров) на основные функционально-технологические характеристики готового продукта. Все опытные образцы получены из торговых сетей и имели признаки нарушения автолитических процессов PSE с уровнем pH продукта 5,6-5,8. Образцы были подвергнуты инъектированию фосфатным раствором с целью увеличения функционально-технологических характеристик. Рецептуры всех образцов включали в себя 85% основного мясного сырья (филе и бедра цыплят-бройлеров) и 15% раствора функциональной смеси. В качестве факторов выбрано время и температуру термической обработки, которые варьировались в соответствии с верхней границей значений на уровнях 68°C и 120 мин и 62 ° C в течение 100 мин на нижней границе значений. Внесение функциональной смеси проводили одинаковым методом при минимальном давлении 0,15 бар, после чего сырье помещали в вакуумные пакеты, создавали разрежение и выдерживали в течение 90 мин для инициирования процессов связывания влаги ингредиентами смеси. Температура раствора функциональной смеси перед инъектированием - 4 ° C, а температура сырья в толще мышц - 6 ° C. В качестве исследовательских показателей был избран водосвязывающая способность (ВУС), выход и pH готового продукта, количество и pH отделенного в процессе термической обработки бульона и пластичность готового продукта. Согласно полученным результатам оптимальной признано температуру обработки 62 ° C при продолжительности оброки 120 мин. Несмотря на это, обработка при температуре 68 ° C в течение 100 мин позволяет получить значения уровней исследуемых характеристик в ближайшем диапазоне. Данные режимы обработки позволяют достичь значений ВУС 80-82% для филе цыплят-бройлеров и 79-80 % для бедра. Разница между уровнем показателей для бедра и филе цыплят бройлеров находилась в пределах 5% для всех характеристик кроме пластичности, которая была значительно больше для готового бедра цыплят-бройлеров.

Ключевые слова: технология Sous Vide; вакуум; мясо птицы; фосфаты; функционально-технологические свойства; термическая обработка

Надійшла (received) 24.05.2020

УДК 628.1.663.6

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.13

ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ВОДИ, ОБРОБЛЕНОЇ БЕЗРЕАГЕНТНИМ ЕЛЕКТРОХІМІЧНИМ МЕТОДОМ

А. І. МАРИНІН, Ю. В. БОЛЬШАК, Р. С. СВЯТНЕНКО*, Д. В. ШТЕПА

проблемна науково-дослідна лабораторія, Національний університет харчових технологій, Київ, УКРАЇНА
*e-mail: Svyatnenko@i.ua

АНОТАЦІЯ Тенденція збереження антропогенного навантаження на довкілля та гідросферу зокрема, ставить перед наукою гігієни харчування та технологій водообробки нові виклики та завдання з подолання зростаючих проблем питного водозабезпечення та технологій водообробки для харчового виробництва, де доброякісна вода повсюдно є критично важливим обов'язковим та особливим сировинним компонентом харчових продуктів. До традиційних вимог забезпечення безпеки та фізіологічної повноцінності води в умовах, коли існуючі технології водообробки практично вичерпали свої можливості вдосконалення і підвищення ефективності, додалися нові фактори, пов'язані зі створенням принципово нових можливостей зміни фізико-хімічних та медико-біологічних властивостей води без жодної зміни хімічного складу шляхом впливу ряду фізичних безреагентних чинників на воду і набуття нею зміни її структурно-енергетичного стану – нового та інтенсивно досліджуваного явища природи. Базовим ефектом в цьому напрямку є електроліз води в діафрагмовому електролізері з розділенням продуктів електрохімічних реакцій в катодній (католіт) та анодній (аноліт) зонах. Вода в процесі електрохімічної обробки набуває аномальних фізико-хімічних та біологічних властивостей, підвищується хімічна та біохімічна активність, за що вона одержала назву нового класу речовин – електрохімічної активованої води (ЕХАВ). Нині така активована вода знайшла практичне застосування в гігієнічній медицині, у вирішенні підвищення біологічної цінності питної води та створенні води з оздоровчими властивостями. Вивчення закономірностей електрохімічної активації води при цьому досі не втрачають своєї актуальності і наукової та практичної цінності, особливо в харчовій промисловості.

Ключові слова: вода; електрохімічне оброблення; аноліт; католіт; окисно-відновний потенціал

RESEARCH OF PHYSICO-CHEMICAL INDICATORS OF WATER PROCESSED BY REAGENT-FREE ELECTROCHEMICAL METHOD

A. MARYNIN, Y. BOLSHAK, R. SVYATNENKO, D. SHTEPA

Problem Research Laboratory, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE.

ABSTRACT The tendency to maintain anthropogenic load on the environment and in the hydrosphere in particular, poses new challenges and tasks to the science of food hygiene and water treatment for the growing problems of drinking water supply and water treatment for food production, where good quality water is a critical and essential raw material component of the food products. To the traditional requirements of ensuring the safety and physiological integrity of water in an environment where existing water treatment technologies have practically exhausted their possibilities of improvement and increase of efficiency, new factors have been added, connected with creation of fundamentally new possibilities of change of physicochemical and biomedical properties of water without any change of chemical composition by a number of physical reagent-free factors on water and its acquisition of its structural and energy state – a new and intensively studied phenomenon of nature. The main effect in this direction was the electrolysis of water in the diaphragm electrolyzer with the separation of the products of electrochemical reactions in the cathode (catholyte) and anode (anolyte) zones. Water in the process of electrochemical treatment acquires anomalous physicochemical and biological properties, first of all increase of chemical and biochemical activity, for which it was named the new class of substances - electrochemical activated water (ECAW). Today, such activated water has found practical application in hygienic medicine, in solving the increase in the biological value of drinking water and the creation of water with health properties. The study of the laws of electrochemical activation of water still does not lose its relevance and scientific and practical value, especially in the food industry.

Keywords: water; electrochemical treatment; anolyte; catholyte; redox potential

Вступ

Сучасна наука гігієни харчування приділяє все більшу увагу якості питної води та технологічної води для харчової промисловості. Адже вода є обов'язковим і особливим компонентом харчових

продуктів складаючи значну частку останніх, досягаючи, наприклад, у складі напоїв більше 90 %. Слід зазначити, що в Україні продовжується антропогенна руйнація гідросфери, що тягне за собою погіршення якості води природних джерел, що значно ускладнює підтримку належної якості питної води,

так і води, яка є критично важливим сировинним компонентом харчової промисловості без попередньої водопідготовки. Все це вимагає підвищення ефективності та впровадження інноваційних методів водообробки перед зростаючими викликами. В таких умовах традиційні технології водообробки у певній мірі вичерпують свої можливості забезпечувати безпеку питного водопостачання та нові вимоги підтримки фізіологічної повноцінності та біологічної цінності води, призначеної для споживання людиною. Для цільової підготовки води перед її використанням традиційно широко використовують сорбційні та баромембранні методи обробки, зокрема іонообмінне пом'якшення та зворотний осмос [1]. Вода, отримана після такої обробки, зазвичай відповідає регламентованим вимогам відповідних галузей харчових виробництв. Проте, новітні дослідження показують, що контакт з розвиненою поверхнею іонообмінних матеріалів викликає певне вторинне забруднення води органічними продуктами деструкції іонообмінних смол [2]. Це відбувається на фоні перегляду сучасною гігієнічною медициною критеріїв оцінки віддалених наслідків для здоров'я людей від використання у водопідготовці високомолекулярних полімерних реагентів, які успішно використовуються вже протягом тривалого часу.

Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є розробка та впровадження нових безреагентних екологічно досконалих методів водообробки, одним із прикладів успішного просування в цьому напрямку є використання електрохімічного діафрагмового методу очистки та активації води.

Рядом дослідників [3–7] доведено ефективність та перспективність електрохімічної обробки води для покращення якості продуктів на її основі, зокрема для виробництва пива, молочної сироватки, замісу тіста, модифікації розсолів, тощо.

Для практичного одержання води з відновними електронодонорними властивостями широко використовують електрохімічний метод [8–15] з розділенням катодних та анодних зон електропровідною мембраною, яка, проте, перешкоджає змішанню продуктів електролізу. Католіт являє собою слабо лужний розчин з відновними електронодонорними властивостями, які забезпечують чудовий електронодонорний антиоксидантний ефект. Проте електрохімічні йонатори води не відносяться до розряду широкодоступних та мають деякі медичні застереження. Механізм їхньої дії пов'язують з процесами: імовірно дисоціацією молекул води у градієнті електростатичного поля подвійного електричного прошарку катоду, або ж зі збагаченням води воднем, що електрохімічно генерується на катоді. Нами експериментально підтверджена гіпотеза, що пов'язує набуття католітом відновного стану з проявом електронодонорних властивостей аніонів хлору під дією енергійного електрополяризаційного впливу на аніон хлору

градієнту напруженості електростатичного поля в зоні подвійного електричного прошарку катоду. Це сприяє відділенню електрона від аніону хлору і переходу його в гідратований вільний стан у воді, що збагачує воду електронами без конкурентного збагачення протонами, як це має місце при електролізі води.

Мета роботи

Метою роботи є вивчення кінетичних закономірностей формування електрохімічно-активованих водних систем шляхом контролю зміни окисно-відновного потенціалу (ОВП) аноліту та католіту від часу процесу електрохімічної обробки води, і пов'язаної з часом зміни швидкості масопереносу оброблюваної води на діафрагмовому електролізері «Изумруд».

Виклад основного матеріалу

Вода є дуже чутливою стосовно зовнішнього фізичного впливу на неї. Вона здатна сприймати цей вплив, накопичувати енергію, змінюючи структуру та інформаційні фактори зовнішнього впливу й передавати набуті структурно-енергетичні та інформаційні фактори тим системам, які призначені природою для їх сприйняття [16–18]. Чимало прикладів застосування безреагентно модифікованої (активованої) води в удосконаленні харчових технологій, переважно хімічних та мікробіологічних. Найбільш опрацьованим та науково обґрунтованим нині є метод обробки води в електрохімічному двокамерному мембранному електролізері.

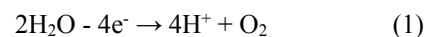
Електроактиватор води УОВ-«ИЗУМРУД»-КФТО (Алмаз) (рис. 1) призначено для очищення питної води від мікроорганізмів усіх видів і форм, токсичних органічних сполук, іонів важких металів, кількісний вміст яких в питній воді не відповідає санітарним нормам, а також для отримання розчинів аноліту (мертвої води) і католіту (живої води). В процесі очищення у воді зберігаються необхідні організму людини іони кальцію, магнію, калію, натрію, тощо, та важливі для забезпечення нормальної життєдіяльності мікроелементи.

Вода насичується киснем, змінює свій енергетичний стан, прискорює виведення метаболічних відходів і сприяє найбільш повному засвоєнню поживних речовин.

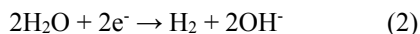
Технологія електрохімічної активації є одним із найдоступніших методів переведення води у метастабільний збуджений стан за допомогою уніполярного електрохімічного впливу.

У спрощеній формі основні процеси, що відбуваються в електролізері, можна представити наступним чином [12]:

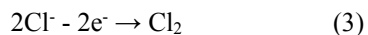
1) окислення води на аноді:



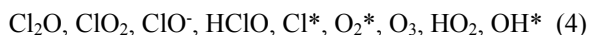
2) відновлення води на катоді:



3) утворення на аноді газоподібного хлору в розчинах солей соляної кислоти:



4) утворення в анодній камері високоактивних окиснювачів:



5) утворення в катодній камері високоактивних відновників:

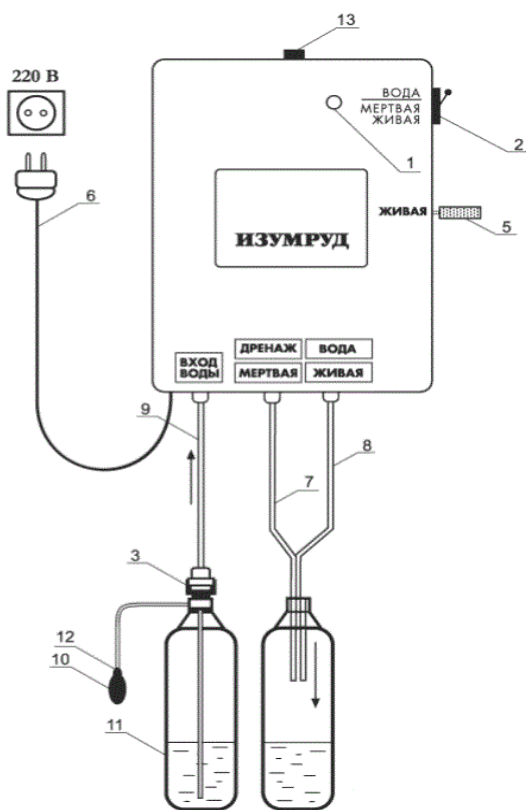
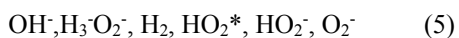


Рис. 1 – Схема установки УОВ-«ИЗУМРУД»-КФТО (Алмаз)

Наявність в аноліті достатньої кількості сильних окиснювачів і вільних радикалів перетворює його в розчин з сильно вираженими біоцидними властивостями. Завдяки посиленню окисних реакцій в організмі аноліт сприяє процесам детоксикації шкідливих органічних сполук в організмі. Католіт, насичений відновниками, має високі антиоксидантні властивості завдяки здатності ефективно нейтралізовувати надлишок вільних радикалів в організмі.

На першому етапі досліджень визначали залежність зміни рН та ОВП аноліту та католіту від часу обробки на діафрагмовому електролізері «Изумруд» Фірми ООО НПП «ИЗУМРУД».

Для досліджень використовували водопровідну воду вироблену підприємством АТ «Київводоканал». Воду обробляли на діафрагмовому електролізері «Изумруд» та шляхом регулювання на виході отримували два зразки води з різними заданими параметрами ОВП: католіту та аноліту.

При дослідженні параметрів ОВП, водопровідну воду обробляли при різних швидкостях та тривалості контакту води із селективною мембраною у контактній камері. Сприятливим фактором для цього є наявність створеної у Проблемній науково-дослідній лабораторії НУХТ модульної комплексної лабораторії водообробки, що має у своєму складі модуль електрохімічного діафрагмового електролізера «Изумруд (КФТО)». Для фіксації зміни параметрів води застосовувалися наступні прилади: ОВП-метр – Ezodo PCT-407, рН-метр – И-160М.

Дослідження проводились при температурі $t=19\pm 1^\circ\text{C}$. Параметри обробленої води визначалися взяттям проби води (після 3 хвилин роботи електролізера) при наступних швидкостях витрат води (мл/хв: 200, 300, 350, 500, 600, 700, 750, 800, 900, 1000).

Обговорення результатів

На рис. 2–5 показано залежність зміни властивостей аноліту та католіту від часу обробки на діафрагмовому електролізері «Изумруд».

У межах термодинамічної стійкості води діаграми стану являють собою групу залежностей ОВП від рН між верхньою і нижньою діаграмами термодинамічної стійкості води, які є її межами.

Одержані залежності відображають кінетику формування електрохімічно активованої води з окисними та відновними властивостями. Динаміка зміни параметрів католіту та аноліту цілком очікувані з точки зору теоретичних уявлень про механізми формування активованих водних розчинів та досягають критичних значень: для католіту ОВП=-690 мВ при рН=10,4 та аноліту: ОВП=+451 мВ при рН=3,5. Зауважимо, що пара параметрів води, що характеризують її кисло-лужний та окисно-відновний баланс також взаємозалежні (коваріантні): зміна рН води на одну одиницю тягне за собою зміну величини ОВП приблизно на 60 мВ. Зміна рН в кислий бік збільшує величини ОВП, а в лужний – зменшує.

На рис. 6, показана залежність ОВП обробленої води від швидкості витрат води в електролізері.

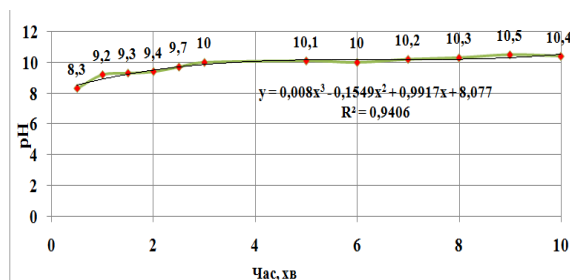


Рис. 2 – Залежність зміни рН католіту від часу обробки

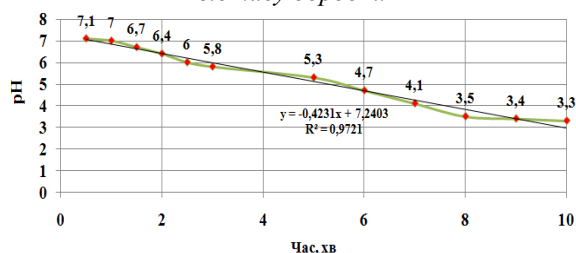


Рис. 3 – Залежність зміни рН аноліту від часу обробки на діафрагмовому електролізері.

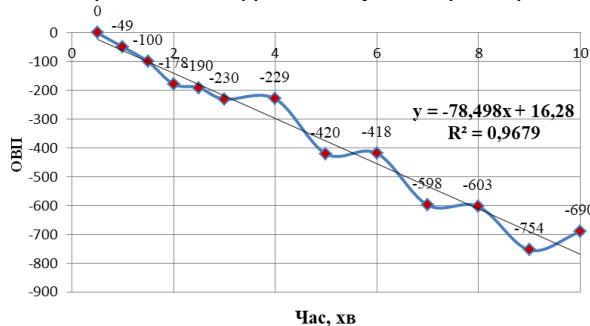


Рис. 4 – Залежність зміни ОВП католіту від часу обробки

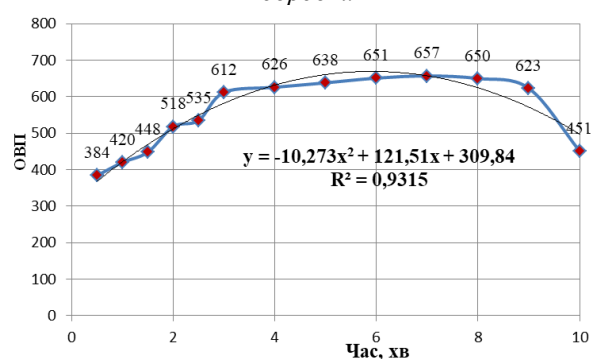


Рис. 5 – Залежність зміни ОВП аноліту та католіту від часу обробки

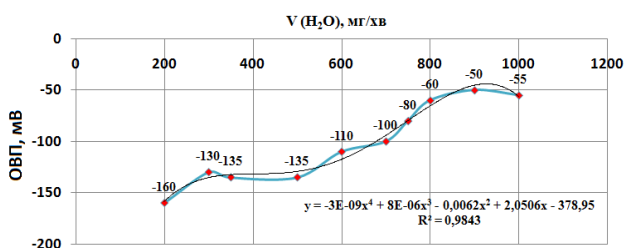


Рис. 6 – Залежність ОВП обробленої води від швидкості витрат води в електролізері.

Хімічні перетворення води при уніполярній електрохімічній обробці тим більш інтенсивні, чим більше мікрооб'ємів води потрапляють у зону дії надвисокої напруженості електричного поля подвійного електричного шару біля поверхні аноду та катоду.

Аналіз результатів показує, що збільшення величини робочого потоку води в електролізері призводить до зниження динаміки набуття водою відновного електронодонорного стану (пропорційне зменшення ОВП з -160 мВ до -55 мВ). Це означає, що для отримання води із заданим редокс-станом необхідне цілеспрямоване регулювання швидкості води в електролізері залежно від поставленої задачі: чим сильніший католіт, тим менша швидкість обробки води в електролізері, та навпаки.

Висновки

Встановлено кількісні закономірності залежності процесу формування у реакційному просторі електролізера продуктів електрохімічних реакцій на катоді та аноді від швидкості масопереносу вхідної води в реакційній зоні, що дозволяє одержувати активовані розчини з наперед заданим редокс-станом. Експериментально підтверджено справедливості теоретичних уявлень щодо кінетичних особливостей процесу електрохімічної активації води, що сприятиме підвищенню якості обробленої води та ефективності результатів наступних досліджень та їх практичного застосування.

Отримані результати свідчать про доцільність продовження роботи у цьому напрямку, особливо при дослідженні розбавлених розчинів солей соляної кислоти, враховуючи одержані раніше нами результати спостереження електронодонорних властивостей енергізованих аніонів хлору.

Список літератури

1. Михайленко В. Г., Князева О. І., Любавіна О. О. Електрохімічні методи обробки води: переваги та перспективи. *Харчова наука і технологія*. 2013. Т. 4. С. 153–155.
2. Бальшев А. В., Тимаков А. А., Гаврилова М. М., Смирнов А. Н., Матвеева І. С., Лебедев І. М., Лапшин В. Б., Сыроешкин А. В. Биологическая активность воды с измененным соотношением Н/Д: является ли дейтерий компонентом минерального питания? *Вестник РУДН. Сер. Медицина. Специальность «Фармация»*. 2004. № 4 (28). С. 26226.
3. Бахир В. М., Задорожний Ю. Г., Леонов Б. И. *Электрохимическая активация: универсальный инструмент зеленой химии*. М.: Маркетинг Саппорт Сервисиз. 2005. 176 с.
4. Петрушанко И. Ю., Лобышев В. И. Неравновесное состояние электрохимически активированной воды и ее биологическая активность. *Биофизика*. 2001. Т. 46, № 3. С. 389–401.
5. Святненко Р. С., Маринін А. І., Українець А. І., Кочубей-Литвиненко О. В. Вплив імпульсного електромагнітного поля на життєздатність *Escherichia*

Coli в модельному розчині води. *Науковий вісник НУБіП України. Серія: Техніка та енергетика АПК*. 2016. № 252. С. 185191.

6. Лепеш Г. В., Грицай Е. И., Хотулев В. А. Исследование сущности электрохимического процесса, как технологической составляющей очистки воды. *Технико-технологические проблемы сервиса*. 2013. №. 2 (24). С. 42–49.

7. Мосин О. В. Электрохимическая обработка воды. *Сантехника, отопление, кондиционирование*. 2012. №. 12. С. 20–26.

8. Мишанов А. П., Маркова А. Е., Судаченко В. Н., Колянова Т. В. Экологически безопасная технология подготовки воды и питательных растворов в интенсивной светокультуре. *Технологии и технические средства механизированного производства продукции растениеводства и животноводства*. 2010. 8.

9. Surdu I., Vătuui D., Jurcoane Ș., Olteanu M., Vătuui I. The antimicrobial activity of neutral electrolyzed water against germs and fungi from feedstuffs, eggshells and laying henhouse. *Romanian Biotechnological Letters*. 2018. Vol. 3. № 3. С. 13607–13614.

10. Jirotková D., Šoch M., Kernerová N., Pálka V., Eidelpesová L. Use of electrolyzed water in animal production. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*. 2020. V. 9(4). P. 477–483.

11. Qijun Ma, Baoming Li, Chaoyuan Wang, Yingying Ji, Shuhua Wang, Wei Cao. Efficiency of electrolyzed oxidizing water for inactivation of salmonella spp. and inoculated shell eggs. *International journal of food engineering*. 2009. V. 5(3). doi: 10.2202/1556-3758.1651.

12. Thorn R. M. S., Robinson G. M., Reynolds D. M. Comparative antimicrobial activities of aerosolized sodium hypochlorite, chlorine dioxide, and electrochemically activated solutions evaluated using a novel standardized assay. *Antimicrobial agents and chemotherapy*. 2013. V. 57. №. 5. P. 2216–2225. doi:10.1128/AAC.02589-12

13. Cloete T. E., Thantsha M. S., Maluleke M. R., Kirkpatrick R. The antimicrobial mechanism of electrochemically activated water against *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* as determined by SDS-PAGE analysis. *Journal of applied Microbiology*. 2009. V. 107. №. 2. P. 379–384. doi: 10.1111/j.1365-2672.2009.04233.x.

14. Danylkovych A. G., Lishchuk V. I., Romaniuk O. O. Use of electrochemically activated aqueous solutions in the manufacture of fur materials. *SpringerPlus*. 2016. Vol. 5. №1. С. 214.

15. Українець А. І., Большак Ю. В., Святненко Р. С., Прохоренко Ж. І. Застосування фізично зміненої (активованої) води для підвищення ефективності технологій харчового виробництва та поліпшення якості продукції. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2018. Т. 24. № 5. С. 219–224.

16. Українець А. І., Большак Ю. В., Маринін А. І., Святненко Р. С., Позняковський, С. В. Теоретико-емпірична оцінка змін структурно-енергетичного стану фізично зміненої води та їх біологічних наслідків. *Прогресивні техніка та технології харчових виробництв ресторанного господарства і торгівлі*. Харків: ХДУХТ, 2019. Вип. 1 (29). С. 172–184.

17. Українець А. І., Большак Ю. В., Маринін А. І., Святненко Р. С. Окисно-відновний баланс питної води – показник її якості та фізіологічної повноцінності. *Харчова промисловість*. 2018. № 24. С. 6–14.

18. Большак Ю. В., Українець А. І., Маринін А. І., Святненко Р. С. Вивчення впливу КВЧ-опромінення води на її структурно-енергетичний стан і можливі біологічні наслідки процесу. *Наукові праці ХУХТ*. 2019. Т. 25. № 5. С. 217–225.

References (transliterated)

1. Mykhailenko V. H., Kniazeva O. I., Liubavina O. O. Elektrokhimichni metody obrobky vody: perevahy ta perspektyvy [Electrochemical methods of water treatment: advantages and prospects]. *Kharchova nauka i tekhnologhiia [Food science and technology]*, 2013, V. 4, p. 153–155.
2. Balyshev A. V., Timakov A. A., Gavrilova M. M., Smirnov A. N., Matveeva I. S., Lebedev I. M., Lapshin V. B., Syroeshkin A. V. Biologicheskaja aktivnost' vody s izmenennym sootnosheniem H/D: javljaetsja li dejterij komponentom mineral'nogo pitaniya? [Biological activity of water with a modified H / D ratio: is deuterium a component of mineral nutrition?]. *Vestnik RUDN. Ser. Medicina. Special'nost' «Farmacija» [Bulletin of the RUDN University. Ser. Medicine. Specialty "Pharmacy"]*, 2004, no. 4 (28), p. 26226.
3. Bahir V. M., Zadorozhnij Ju. G., Leonov B. I. Jelektrohimicheskaja aktivacija: universal'nyj instrument zelenoj himii [Electrochemical activation: a universal tool for green chemistry]. M., Marketing Support Servisiz, 2005. 176 p.
4. Petrushanko I. Ju., Lobyshev V. I. Neravnovesnoe sostojanie jelektrohimicheskij aktivirovannoj vody i ee biologicheskaja aktivnost' [The nonequilibrium state of electrochemically activated water and its biological activity]. *Biofizika [Biophysics.]*, 2001, V. 46, no. 3, p. 389–401.
5. Sviatnenko R. S., Marynin A. I., Ukrainets A. I., Kochubei-Lytvynenko O. V. Vplyv impulsnoho elektromagnitnoho polia na zhyttiezdatnist Escherichia Coli v modelnomu rozchyni vody [Influence of pulsed electromagnetic field on the viability of *Escherichia Coli* in a model water solution]. *Naukovyi visnyk NUBiP Ukrainy. Serii: Tekhnika ta enerhetyka APK [Scientific Bulletin of NULES of Ukraine. Series: Engineering and energy of agro-industrial complex]*, 2016, no. 252, p.185191.
6. Lepesh G. V., Gricaj E. I., Hotulev V. A. Issledovanie sushhnosti jelektrohimicheskogo processa, kak tehnologicheskoy sostavljajushhej ochistki vody [Investigation of the essence of the electrochemical process as a technological component of water purification]. *Tehniko-tehnologicheskie problemy servisa [Technical and technological problems of service.]*, 2013, no. 2 (24), p. 42–49.
7. Mosin O. V. Jelektrohimicheskaja obrabotka vody [Electrochemical water treatment]. *Santehnika, otoplenie, kondicionirovanie [Plumbing, heating, air conditioning]*, 2012, no. 12, p. 20–26.
8. Mishanov A. P., Markova A. E., Sudachenko V. N., Koljanova T. V. Jekologicheskij bezopasnaja tehnologija podgotovki vody i pitatel'nyh rastvorov v intensivnoj svetokult'ure [Environmentally friendly technology for the preparation of water and nutrient solutions in intense light culture]. *Tehnologii i tehnicheckie sredstva mehanizirovannogo proizvodstva produkcii rastenievodstva i zhivotnovodstva [Technologies and technical means of mechanized production of crop and livestock products]*, 2010, 8.
9. Surdu I., Vătuui D., Jurcoane Ș., Olteanu M., Vătuui I. The antimicrobial activity of neutral electrolyzed water against

- germs and fungi from feedstuffs, eggshells and laying henhouse. *Romanian Biotechnological Letters*, 2018, V. 3, no. 3, p. 13607–13614.
10. Jirotková D., Šoch M., Kernerová N., Pálka V., Eidelpesová L. Use of electrolyzed water in animal production. *Journal of Microbiology, Biotechnology and Food Sciences*, 2020, V. 9(4), p. 477–483.
 11. Qijun Ma, Baoming Li, Chaoyuan Wang, Yingying Ji, Shuhua Wang, Wei Cao. Efficiency of electrolyzed oxidizing water for inactivation of salmonella sp. and inoculated shell eggs. *International journal of food engineering*, 2009, V. 5(3), doi: 10.2202/1556-3758.1651.
 12. Thorn R. M. S., Robinson G. M., Reynolds D. M. Comparative antimicrobial activities of aerosolized sodium hypochlorite, chlorine dioxide, and electrochemically activated solutions evaluated using a novel standardized assay. *Antimicrobial agents and chemotherapy*, 2013, V. 57, no. 5, p. 2216–2225, doi: 10.1128/AAC.02589-12.
 13. Cloete T. E., Thantsha M. S., Maluleke M. R., Kirkpatrick, R. The antimicrobial mechanism of electrochemically activated water against *Pseudomonas aeruginosa* and *Escherichia coli* as determined by SDS- PAGE analysis. *Journal of applied Microbiology*, 2009, V. 107, no. 2, p. 379–384, doi: 10.1111/j.1365-2672.2009.04233.x.
 14. Danylkovich, A. G., Lishchuk, V. I., & Romaniuk, O. O. Use of electrochemically activated aqueous solutions in the manufacture of fur materials. *SpringerPlus*, 2016, V. 5, no.1, p. 214.
 15. Ukrainets A. I., Bolshak Yu. V., Sviatnenko R. S., Prokhorenko Zh. I. Zastosuvannia fizychno zminenoi (aktyvovanoi) vody dla pidvyshchennia efektyvnosti tekhnologii kharchovoho vyrobnytstva ta polipshennia yakosti produktsii [The use of physically modified (activated) water to increase the efficiency of food production technologies and improve product quality.]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnologii [Scientific works of the National University of Food Technologies]*, 2018, V. 24, no. 5, p. 219–224.
 16. Ukrainets A. I., Bolshak Yu. V., Marynin A. I., Sviatnenko R. S., Pozniakovskiy S. V. Teoretyko-empirichna otsinka zmin strukturno-enerhetychno stanu fizychno zminenoi vody ta yikh biolohichnykh naslidkiv [Theoretical and empirical assessment of changes in the structural and energy state of physically altered water and their biological consequences]. *Prohresyvni tekhnika ta tekhnologii kharchovykh vyrobnytstv restorannoho hospodarstva i torhivli [Advanced techniques and technologies of food production, restaurant business and trade]*, Kharkiv: KhDUKhT, 2019, Iss. 1 (29), p. 172–184.
 17. Ukrainets A. I., Bolshak Yu. V., Marynin A. I., Sviatnenko R. S. Okysno-vidnovnyi balans pytnoi vody – pokaznyk yii yakosti ta fiziolohichnoi povnotsinnosti [Redox balance of drinking water - an indicator of its quality and physiological value]. *Kharchova promyslovist [Food Industry]*, 2018, no. 24, p. 6–14.
 18. Bolshak Yu. V., Ukrainets A. I., Marynin A. I., Sviatnenko R. S. Vyvchennia vplyvu KVCh-oprominennia vody na yii strukturno-enerhetychnyi stan i mozhlyvi biolohichni naslidky protsessu [Study of the influence of EHF irradiation of water on its structural and energy state and possible biological consequences of the process.]. *Naukovi pratsi NUKhT [Scientific works of NUHT]*, 2019, V. 25, no. 5, p. 217–225.

Відомості про авторів (About the Authors)

Маринін Андрій Іванович – кандидат технічних наук, доцент, завідувач Проблемної науково-дослідної лабораторії, Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-6692-7472; e-mail: andrii_marynin@ukr.net

Andrii Marynin – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of Problem Research Laboratory, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6692-7472; e-mail: andrii_marynin@ukr.net

Большак Юрій Васильович – кандидат хімічних наук, старший науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії, Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна.

Yurii Bolshak – Candidate of Chemical Sciences, Associate Professor, Senior Researcher of Problem Research Laboratory, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine.

Святненко Роман Сергійович – кандидат технічних наук, науковий співробітник Проблемної науково-дослідної лабораторії, Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна. ORCID: 0000-0003-0895-6982; e-mail: svyatnenko@i.ua

Roman Svyatnenko – Candidate of Technical Sciences, researcher, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0895-6982; e-mail: svyatnenko@i.ua

Штепа Денис Володимирович – технік першої категорії Проблемної науково-дослідної лабораторії, Національний університет харчових технологій, м. Київ, Україна. e-mail: den4ik171819@gmail.com

Denis Shtepa – first class technician of Problem Research Laboratory, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: den4ik171819@gmail.com

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Маринін А. І., Большак Ю. В., Святненко Р. С., Штепа Д. В. Дослідження особливостей фізико-хімічних показників води, обробленої безреагентним електрохімічним методом. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 03–04. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.13.

Please cite this article as:

Marynin A., Bolshak Yu., Svyatnenko R., Shtepa D. Research of peculiarities of physicochemical indicators of water processed by reagent-free electrochemical method. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 03- 0 , doi:10.20998/2413-4295.2020.02.13.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Маринин, А. И., Большак Ю.В., Святненко Р. С., Штепа Д. В. Исследование особенностей физико-химических показателей воды, обработанной безреагентным электрохимическим методом. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 03- 0 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.13.

АННОТАЦИЯ Тенденция сохранения антропогенной нагрузки на окружающую среду, и гидросферу в частности, ставит перед наукой гигиены питания и технологий водообработки новые вызовы и задачи по преодолению растущих проблем питьевого водоснабжения и технологий водообработки для пищевого производства, где доброкачественная вода повсеместно является критически важным обязательным и особым сырьевым компонентом пищевых продуктов. К традиционным требованиям обеспечения безопасности и физиологической полноценности воды в условиях, когда существующие технологии водообработки практически исчерпали свои возможности совершенствования и повышения эффективности, добавились новые факторы. Последние связаны с созданием принципиально новых возможностей изменения физико-химических и медико-биологических свойств воды без всякого изменения химического состава путем ряда физических безреагентных факторов на воду и изменения ее структурно-энергетического состояния - нового и интенсивно исследуемого явления природы. Базовым эффектом в этом направлении стал электролиз воды в диафрагменном электролизере с разделением продуктов электрохимических реакций в катодной (католит) и анодной (анолит) зонах. Вода в процессе электрохимической обработки приобретает аномальные физико-химические и биологические свойства, в первую очередь это повышение химической и биохимической активности, за что она получила название нового класса веществ – электрохимической активированной воды (ЕХАВ). Сейчас такая активированная вода нашла практическое применение в гигиенической медицине, в решении повышения биологической ценности питьевой воды и создании воды с оздоровительными свойствами. Изучение закономерностей электрохимической активации воды при этом до сих пор не теряет своей актуальности и научной и практической ценности, особенно в пищевой промышленности.

Ключевые слова: вода; электрохимическая обработка; анолит; католит; окислительно-восстановительный потенциал

Надійшла (received) 30.04.2020

УДК 621.35

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.14

ВПЛИВ МОРФОЛОГІЇ ПОВЕРХНІ КОМПОЗИЦІЙНИХ ЕЛЕКТРОЛІТИЧНИХ
ПОКРИВІВ Co-W-ZrO₂ НА ФУНКЦІОНАЛЬНІ ВЛАСТИВОСТІ СПЛАВІВТ. О. НЕНАСТИНА^{1*}, М. В. ВЕДЬ², М. Д. САХНЕНКО³, С. І. ЗЮБАНОВА³¹кафедра технології дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, м. Харків, УКРАЇНА²кафедра загальної та неорганічної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА³кафедра фізичної хімії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, УКРАЇНА
*e-mail: nenastina@ukr.net

АНОТАЦІЯ Доведено можливість електросинтезу і керування складом та морфологією поверхні композиційних електролітичних покриттів (КЕП) кобальту з тугоплавкими металами варіюванням густини імпульсного струму. Композити на основі кобальту, осажені на підкладку з міді з білігандних цитратно-пірофосфатних електролітів при густині імпульсного струму 4 А/дм², відрізняються розгалуженою поверхнею і більш рівномірним розподілом компонентів по поверхні, підвищеним вмістом вольфраму, який майже у 5 разів більший ніж у покриттях, осаджених при 10 А/дм², та зниженням відсотку кисню удвічі (до 5,5 %). Це пояснюється гальмуванням реакції виділення газоподібного водню та участю ад-атомів водню у хімічному відновленні проміжних оксидів вольфраму до металу під час переривання поляризації. Покриття, осажені із застосуванням імпульсного струму, можна вважати композитами складу Co-W-ZrO₂, в яких оксидна фаза утворюється безпосередньо в електродному процесі як інтермедіат неповного відновлення вольфраматів. Топографія плівок відрізняється наявністю зерен еліптичної і сферичної форми з розмірами кристалітів 80 – 180 нм. На основній поверхні зустрічаються виступи (крупні зерна) діаметром 1 – 3 мкм. Фрактальна розмірність поверхні становить 2,77, що свідчить про 3D механізм росту кристалів при формуванні покриття. За параметрами шорсткості поверхні Ra і Rq покриття відносяться до 9 класу шорсткості. Завдяки кількісному складу, морфології й фрактальності поверхні мікротвердість і корозійна стійкість систем Co-W-ZrO₂, одержаних за густини струму 4 А/дм² на 20 % перевищують параметри покриттів, одержаних при 10 А/дм², і у 3 рази перевищує відповідні характеристики підкладки. Показано, що вольфрамвмісним КЕП притаманні каталітична активність у реакції окиснення етанолу і корозійна стійкість у середовищах різної кислотності.

Ключові слова: композиційні електролітичні покриття; імпульсний електроліз; вольфрам; кобальт; цирконій; фрактальний аналіз поверхні; каталітична активність; корозійна стійкість

THE EFFECT OF SURFACE MORPHOLOGY OF CO-W-ZrO₂ COMPOSITE
ELECTROLYTIC COATINGS ON THE FUNCTIONAL PROPERTIES OF ALLOYST. NENASTINA¹, M. VED², M. SAKHNENKO³, S. ZUBANOVA³¹ Department of Technologies of Road-Building Materials and Chemistry, Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkiv, UKRAINE² Department of General and Inorganic Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE³ Department of Physical Chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The possibility of electrosynthesis and control of the composition and surface morphology of the composite electrolytic coatings (CEC) of cobalt with refractory metals by varying the pulse current density has been proved. Composites deposited on copper substrate from biligand citrate-pyrophosphate electrolytes at 4 A/dm² are distinguished by a developed surface and a more uniform distribution of components on the surface, increased tungsten content, almost 5 times higher than coatings deposited at 10 A/dm², and a half reduction in oxygen percentage (up to 5.5%). This is explained by the inhibition of the hydrogen gas evolution reaction and the participation of hydrogen ad-atoms in the chemical reduction of intermediate tungsten oxides to metal when polarization is interrupted. Coatings obtained using pulsed current can be considered as composites of the composition Co-W-ZrO₂, in which the oxide phase is formed directly in the electrode process as an intermediate for the incomplete reduction of tungstates. The topography of the films is characterized by the presence of grains of elliptical and spherical shape with crystallite sizes of 80 – 180 nm. On the main surface there are protrusions (large grains) with a diameter of 1–3 microns. The fractal dimension of the surface is 2.77, which indicates the 3D crystal growth mechanism during coating formation. According to the surface roughness parameters Ra and Rq, coatings belong to the 9th roughness class. Due to the quantitative composition, surface morphology and fractality, the microhardness and corrosion resistance of Co-W-ZrO₂ systems deposited at a current density of 4 A/dm² are 20% higher than the coatings obtained at 10 A/dm², and 3 times higher than the corresponding characteristics of the substrate. It was shown the catalytic activity of tungsten containing CEC in ethanol oxidizing reaction and corrosion resistance in media of different acidity.

Keywords: composite electrolytic coatings; pulsed electrolysis; tungsten; cobalt; zirconium; fractal analysis of the surface; catalytic activity; corrosion resistance

Вступ

Напрямок нанотехнології по розробці мікро- та нано-електромеханічних систем, який стрімко

розвивається останнім часом, вимагає нових параметрів для характеристики геометрії і властивостей поверхні. Мікроелектромеханічні

пристрої дуже чутливі до зміни найтоншого шару матеріалу на поверхні, тому останній має бути міцно зчепленим з основою. Тонкі покриття з високою адгезією до підкладки отримують переважно електрохімічним осадженням. У поточний час у світовій практичній гальванотехніці спостерігається перехід до багатокомпонентних і синергетичних сплавів і композитів, яким притаманні функціональні властивості, які неадитивно перевищують показники сплавотвірних компонентів. Серед практично важливих окреме місце посідають композиції, утворені кобальтом, нікелем і залізом [1–4], як їх сплави з тугоплавкими металами, зокрема вольфрамом і цирконієм, так і композиційні електролітичні покриття (КЕП) [5–8]. Одна з причин такої уваги полягає в тому, що покриття з тугоплавкими металами притаманні високі корозійна стійкість та механічна міцність і мікротвердість [9–11], що реалізуються саме у поверхневих шарах. Однак при нанесенні покриттів на сталеві підкладки, а особливо при цілеспрямованому формуванні систем із заданими властивостями необхідно визначити важелі впливу і керування кількісним і фазовим складом, морфологією і рельєфом поверхні гальванічних осадів, які є найважливішими чинниками функціональності [12–14]. Безсумнівно, що склад електролітів, їх кислотність [11], а особливо співвідношення концентрацій компонентів [8,9], є серед низки таких факторів. Склад електродно-активних частинок, які розряджаються на катоді, суттєво залежить від кислотності електроліту, яка впливає не тільки на ступінь протонування лігандів та їх склад, а й на імовірність полімеризації монооксометалатів [15–17]. Окремого врахування потребує оцінка можливості утворення в розчині гетероядерних комплексних сполук варійованого складу, в яких оксосполуки, зокрема і вольфраму, відіграють роль не тільки комплексотвірників завдяки високій акцепторній ємності металу в ступеню окиснення +6, а й лігандів, що обумовлено донорними властивостями кисню(–2).

Факторами впливу на співосадження металів різної валентності, до яких відносяться кобальт, вольфрам і цирконій, є режими електролізу (стаціонарний або імпульсний) і густина струму поляризації [18–24]. Саме змінення густини струму у визначеному діапазоні дозволяє збагачувати покриття тим або іншим компонентом. Використання робочих густин струму, вищих за граничний по відношенню до сплавотвірних металів, веде до інтенсифікації суміщеної реакції виділення водню, знижує вихід за струмом цільової реакції та якість покриттів. Отже, густина катодного струму, разом із кількісним складом електроліту, є ключовим важелем керування маршрутом електрохімічного процесу і, відтак, складом і морфологією покриття, що формується. Проведені дослідження [25] довели, наприклад, що застосування імпульсного електролізу сприяє підвищенню ефективності осадження тернарного

сплаву Co-Mo-W варійованого складу і зростанню виходу за струмом до 70–75 %. Означені ефекти досягаються за рахунок декількох взаємопов'язаних чинників: по-перше, підвищення густини струму в імпульсі відносно гальваностатичного режиму створює умови для досягнення більш негативних потенціалів відновлення вольфраму. По-друге, переривання поляризації під час паузи сприяє більш повному перебігу хімічних реакцій у приелектродному шарі, стадій дифузії, адсорбції та десорбції електродноактивних частинок і продуктів електрохімічних реакцій, які є складовими загального катодного процесу. Крім того, під час паузи можливий перебіг не тільки хімічного відновлення проміжних оксидів тугоплавкого металу адсорбованими атомами водню, а й релаксація осадів і поверхнева дифузія зародків, дислокацій тощо, що забезпечує одержання якісних катодних осадів.

Аналіз структури поверхні окреслених багатокомпонентних систем доцільніше проводити методом атомно-силової мікроскопії АСМ, яка дозволяє вивчати не тільки геометрію поверхні, але і багато фізичних властивостей, які обумовлені саме рельєфом і розмірами кристалітів на поверхні, в тому числі тертя і мікротвердість на мікро- і нанорівні [26], корозійну стійкість та каталітичну активність.

Мета роботи

Визначення впливу амплітуди імпульсного струму на склад, морфологію та наноструктуру поверхні композиційних електролітичних покриттів Co-W-ZrO₂, а, відповідно, їх мікротвердість, корозійну стійкість та каталітичну активність.

Методика виконання експерименту

Покриття наносили на підкладки з міді марки М0, підготовку поверхні зразків проводили за загально прийнятою методикою. Для осадження КЕП Co-W-ZrO₂ використовували білігандний цитратно-пірофосфатний електроліт складу, моль/дм³: CoSO₄·7H₂O – 0,15; Na₂WO₄·2H₂O – 0,02; Zr(SO₄)₂·4H₂O – 0,05; Na₃C₆H₅O₇·2H₂O – 0,3; K₄P₂O₇ – 0,1; Na₂SO₄ – 0,5; рН підтримували на рівні 8 додаванням натрію гідроксиду. Температура розчину електроліту T=25°C.

Електроліз проводили із застосуванням потенціостату IC-Pro у скляній комірці за двохелектродною схемою з використанням радіально розташованих нерозчинних анодів з нержавіючої сталі марки X18H10T або складених розчинних анодів при варіюванні амплітуди густини струму у межах 4–10 А/дм² та тривалості імпульс/пауза 5/10 мс. Співвідношення площі катода і анода забезпечували у межах 1 : (5 – 7), об'ємну густину струму підтримували на рівні 2 А/дм³.

Хімічний склад одержаних покриттів визначали за результатами енергодисперсійної рентгенівської

спектроскопії із застосуванням електронно-зондового мікроаналізатора Oxford INCA Energy 350 (збудження рентгенівського випромінювання здійснювали опроміненням зразків пучком електронів з енергією 15 keV), інтегрованого в систему сканівного електронного мікроскопа (CEM). Морфологію поверхні досліджували за допомогою CEM ZEISS EVO 40XVP. Зображення отримували реєстрацією вторинних електронів шляхом сканування електронним пучком, що дозволило робити вимірювання з високою роздільною здатністю і контрастністю. Обробку зображення проводили із застосуванням програмного середовища SmartSEM.

Дослідження топології поверхні проводили на скануючому атомно-силовому зондовому мікроскопі (АСМ) NT-206 контактним методом з використанням зонду CSC-37), кантиліверу В з латеральною розв'язувальною здатністю 3 нм. Область сканування фіксували в межах $20,0 \times 20,0$ мкм, а висоту рельєфу поверхні фіксували з роздільною здатністю 256×256 пікселів. Візуалізацію результатів здійснювали шляхом реконструкції рельєфу у вигляді 2D- і 3D-topography карт (висота відображена кольором). Обробку отриманих АСМ-зображень здійснювали за допомогою програмного продукту Explorer Software шляхом аналізу середньо-статистичних амплітудних параметрів шорсткості поверхні згідно з міжнародними стандартами (ISO 4287/1) – середньоарифметичного R_a , який визначає шорсткість поверхні в вигляді двовимірного арифметичного значення, та середньоквадратичного R_q , який є визначальною характеристикою шорсткості поверхні. За результатами аналізу профілю поверхні, який будували уздовж перерізу на топографічних картах визначали розмір, форму зерен та наявність анізотропії властивостей. На всіх структурах відмічено тотожність характеристик поверхні на різних ділянках сканування, що дозволило екстраполювати дані на характеристики досліджуваного зразка в цілому.

Мікротвердість поверхневих шарів визначали відповідно до ДСТУ ISO 6507-1:2007 на приладі ПМТ-3 методом інденування алмазної піраміди з кутом при вершині 136° і подальшого розрахунку значення мікротвердості за розмірами відбитків діагоналей піраміди на поверхні зразка. Навантаження на інденатор складало 50–100 г, час витримування при вдавлюванні 6 с. Похибка дослідження мікротвердості за Віккерсом становить $\pm 5\%$ [26]. Мікротвердість підкладки (Ст3) зразка становила 14 кг/мм^2 .

Каталітичну активність і корозійну стійкість КЕП визначали за результатами поляризаційних вимірювань. Лінійні і циклічні вольтамперограми реєстрували за допомогою потенціостата ПИ-50-1.1 і програматора ПР-8, оснащеного спеціальною платою для цифрової реєстрації даних. Для вимірювання використовували стандартну трьохелектродну комірку ЯСЕ-2, допоміжний електрод – платинова спіраль, електрод порівняння – насичений

хлоридсрібний напівелемент. Глибинний показник корозії k_h у кислому і лужному середовищі визначали за методикою, опрацьованою раніше і наведеною у [9]. Дослідження процесів електроокиснення на електродах з покриттям Co-W-ZrO₂ і платині проводили у лужних водних та водноетанольних розчинах, які готували з реактивів кваліфікації ч.д.а. на дистильованій воді. Температуру розчинів підтримували в інтервалі 25 ± 1 °С. Показником каталітичної активності вважали густину струму при потенціалі напівпіку $-j_{n/2}$.

Обговорення результатів

Аналіз енергодисперсійних рентгенівських спектрів зразків з тернарним покритвом свідчить, що до його складу разом з основними компонентами – кобальтом, вольфрамом і цирконієм, входить певна кількість вуглецю й кисню (рис. 1). Причому, вміст вуглецю практично не залежить від амплітуди густини струму i , але спостерігається тенденція до підвищення відсотку кобальту, цирконію і кисню при більш високих i . Імовірно, причиною спостережуваного ефекту є послідовність стадій співвідношення компонентів та інтенсифікація паралельної реакції виділення водню за високої поляризації, яка викликає залуження приелектродного шару. Завдяки значній кількості кисню у складі, яка пов'язана з неповним відновленням вольфраму і гідролізом цирконію (IV), та нерівномірному розподілу компонентів сплаву по поверхні (червоним виділено ділянки включення ZrO₂, жовтим – WO₃), такі системи можна розглядати як КЕП загального складу Co-W-ZrO₂-WO_x.

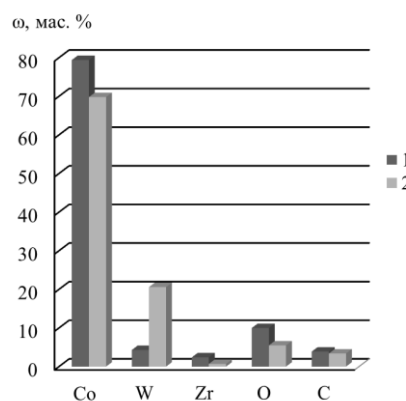
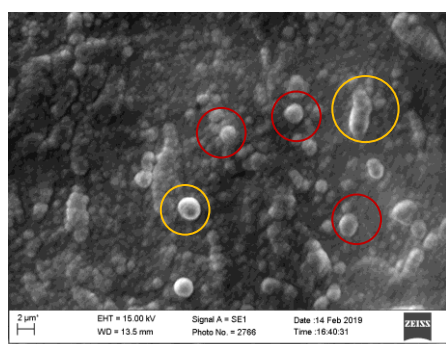


Рис. 1 – Вплив амплітуди імпульсного струму на склад покриттів Co-W-ZrO₂: 1 – $i = 10 \text{ A/dm}^2$, 2 – $i = 4 \text{ A/dm}^2$; при $t_i/t_n = 5/10 \text{ ms}$

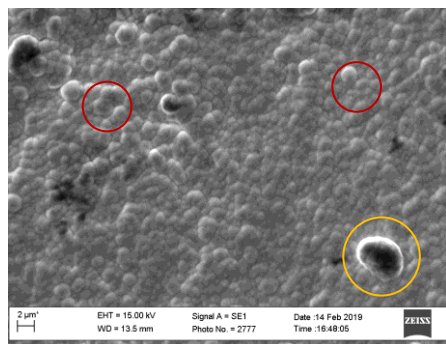
Системи, осаджені при густині імпульсного струму 4 A/dm^2 за інших ідентичних умов, відрізняються більш рівномірним розподілом компонентів по поверхні, підвищеним вмістом вольфраму (майже у 5 разів вище, ніж у попередньому випадку) та зниженням відсотку кисню удвічі (рис. 1). Це можна пояснити зниженням

швидкості виділення газоподібного водню та участю ад-атомів водню у хімічному відновленні проміжних оксидів вольфраму до металу під час переривання поляризації. Склад покривів, одержаних за вищезгаданих умов, відповідає КЕП Co-W-ZrO₂.

Як видно з рисунку 2, поверхня КЕП є рівномірно глобулярною, на якій еліптичні і сфероїдні структури розміром до 100 нм чергуються із агломератами розміром до 1–2 мкм. Цікавим виявляється той факт, що з підвищенням густини струму зменшується розмір кристалітів в упадинах покриву та збільшується кількість агломератів, тобто виступів на поверхні (рис. 2 а). КЕП, осаджені при менших густинах струму, мають більш рівномірну розгалужену поверхню, на якій укрупнені агломерати розташовані не щільно (рис. 2 б).



а

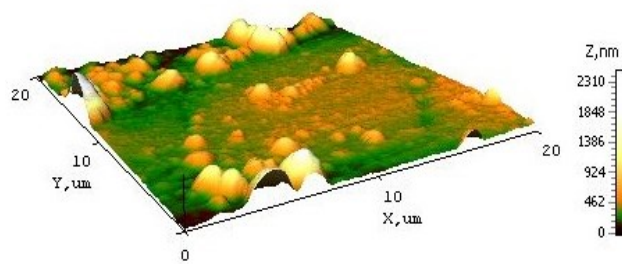


б

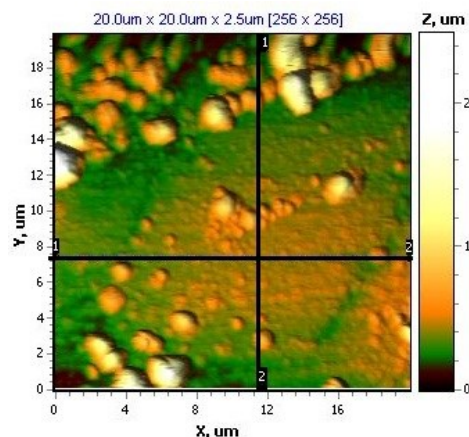
Рис. 2 – Вплив амплітуди імпульсного струму на морфологію покривів Co-W-ZrO₂: а – $i=10 \text{ A/dm}^2$, б – $i=4 \text{ A/dm}^2$; при $t_i/t_n = 5/10 \text{ мс}$. Червоним виділено ділянки включення ZrO₂, жовтим – WO₂

Більш детальний аналіз морфології та рельєфу поверхні проведено із застосуванням АСМ на зразках з покриттями, осадженими за густини імпульсного струму 4 А/дм² (рис. 3).

Отримані данні підтверджують, що відмінною ознакою поверхні, що утворюється при електроосадженні, є достатньо рівномірний характер із чергуванням виступів та упадин (рис. 3а, б).



а



б

Рис. 3 – Аналіз топографії поверхні зразка Co-W-ZrO₂ (склад як на рис. 2 б) на полі сканування 20×20 мкм: а – 3D-, б – 2D- карти поверхні

Періодичність упадин складає близько 2 мкм, а глибина упадин досить суттєво відрізняється і ця розбіжність знаходиться в інтервалі від 20 до 100 нм (рис. 4б). Одержані результати відбивають нормальний закон розподілу висот, що свідчить о багатофакторності процесу утворення плівок на електродах. Фрактальна розмірність поверхні D_F , розрахована за результатами аналізу даних АСМ, становить 2,77, що свідчить про тривимірний (3D) механізм росту кристалів при формуванні покриття.

Параметри шорсткості поверхні, визначені на площі сканування 20×20 мкм становлять відповідно Ra 0,2; Rq 0,2, що є свідченням рівномірно розвинутої поверхні 9 класу шорсткості. Топографія плівок відрізняється наявністю зерен еліптичної форми з розмірами кристалітів 80–180 нм. На основній поверхні зустрічаються виступи (крупні зерна) діаметром 1 – 3 мкм, які при детальному огляді їх структури, складаються з менших за розмірами (40–80 нм) субструктур, що схожі до зерен основного шару плівки. Зерна-агломерати розташовані на плівці в довільному порядку та мають схильність до скупчення у певних зонах.

Аналіз результатів дослідження дозволяє констатувати, що використання імпульсного струму сприяє підвищенню вмісту вольфраму в КЕП, забезпечує утворення глобулярної поверхні, більш

рівномірної за рельєфом і складом при менших густинах струму.

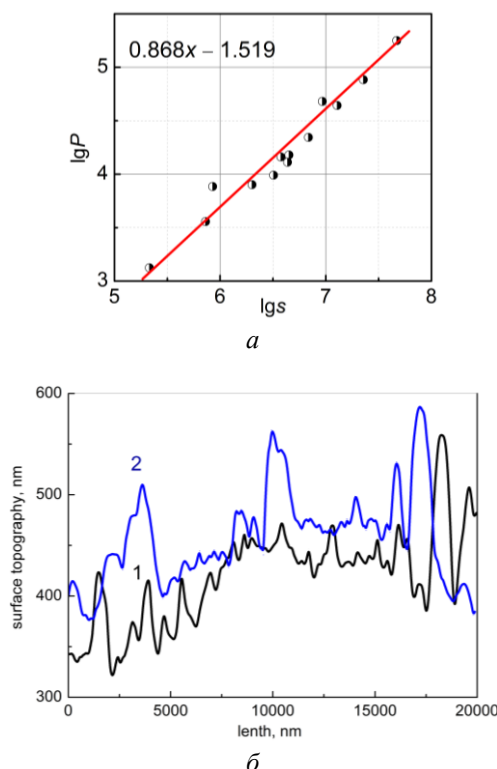


Рис. 4 – Аналіз топографії поверхні зразка Co-W-ZrO₂ складу як на рис. 2 б на полі сканування 20×20 мкм: а – фрактальний аналіз; б – профіль перетину поверхні між маркерами 1 і 2 з рис. 3 б вздовж осей x (1) та y (2)

Такий склад і характер поверхневих шарів є найбільш сприятливим для реалізації підвищених корозійно-механічних характеристик й організації електро-каталітичних процесів [27]. Дійсно мікротвердість і корозійний опір потрібних КЕП Co-W-ZrO₂, осаджених за густини струму 4 А/дм², на 20 % перевищують параметри покриттів, одержаних при 10 А/дм².

Залежність мікротвердості H_v покриттів Co-W-ZrO₂ від катодної густини струму носить екстремальний характер: в інтервалі від 2 до 8 А/дм² H_v збільшується зі зростанням i і досягає максимуму, що пояснюється зменшенням розмірів зерен і агломератів на поверхні покриття. При $i = 10$ А/дм² мікротвердість покриття сплавом Co-W-ZrO₂ різко знижується (табл. 1) через утворення на поверхні пухких шарів, що розтріскуються, і, вочевидь, містять гідроксиди кобальту.

Встановлено, що залежність мікротвердості КЕП Co-W-ZrO₂ від вмісту тугоплавкого компоненту має лінійний характер (рис. 5).

Таблиця 1 – Вплив густини струму на мікротвердість покриттів Co-W-ZrO₂

i , А/дм ²	2	4	6	8	10
H_v , кг/мм ²	145	160	172	220	60

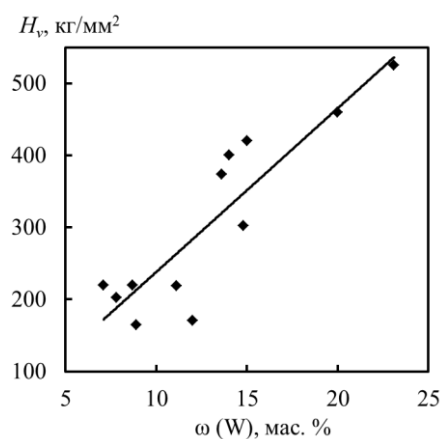


Рис. 5 – Залежність мікротвердості покриттів зразка Co-W-ZrO₂ від вмісту W

Електрокаталітичну активність КЕП Co-W-ZrO₂ оцінювали за густиною струму $j_{n/2}$ при потенціалі напівпіку та порівнювали з показниками платини (табл. 2). Слід зазначити, що потенціали напівпіків для молібденвмісного КЕП є майже тотожними за всіх швидкостей розгортки потенціалу і зростають з підвищенням s . Відмінність у тенденції змінення $E_{n/2}$ для композиту Co-W-ZrO₂ можна пояснити підвищеним вмістом вольфраму у КЕП. Це підтверджує участь оксидів тугоплавких металів у процесі окиснення етанолу. Аналіз параметру $j_{n/2}$ вказує, що каталітична активність КЕП Co-W-ZrO₂ у реакції електрохімічного окиснення етанолу вища порівняно із Pt електродомом.

На досліджених композитах, які містять перехідні метали змінної валентності, до електрохімічної може додаватись, на наш погляд, наступна хімічна реакція [3], яка асоціюється із участю проміжних оксидів сплавотвірних металів MO_x у окисненні етанолу. Цей факт, як і мікроглобулярну розгалужену поверхню осадів, можна вважати ключовим у підвищенні каталітичної активності вольфрамвмісних КЕП.

Для досліджених КЕП корозійні процеси протікають переважно з кисневою деполаризацією незалежно від складу агресивного середовища, різниця у корозійній поведінці зумовлена природою продуктів, які утворюються на поверхні. Очікувано, що найбільш позитивні значення потенціалів корозії (табл. 3) характерні для досліджуваних покриттів, що експонуються у кислому середовищі, а найбільш негативні відповідають лужному. Це відбувається за рахунок того, що за своїми хімічними властивостями

вольфрам здатний у присутності окисника утворювати оксиди кислотного характеру, стійкі у кислих середовищах.

Таблиця 2 – Вплив швидкості розгортки потенціалу s на густину струму окиснення етанолу при потенціалі напівпіку

s , В/с	Pt		Co-W-ZrO ₂	
	$E_{n/2}$, В	$j_{n/2}$, мА/см ²	$E_{n/2}$, В	$j_{n/2}$, мА/см ²
0,01	-0,15	0,05	0,35	5,3
0,02	-0,12	0,08	0,39	6,4
0,05	-0,12	0,01	0,67	12,2

Таблиця 3 – Корозійні характеристики підкладки і КЕП

Матеріал	pH 3		pH 11	
	$E_{кор}$, В	k_h , мм/рік	$E_{кор}$, В	k_h , мм/рік
Сталь Ст3	-0,34	$1,4 \cdot 10^{-2}$	-0,32	$1,3 \cdot 10^{-2}$
Co85W14Zr1	-0,18	$3,3 \cdot 10^{-4}$	-0,35	$2,4 \cdot 10^{-4}$
Co91W7Zr2	-0,27	$3,8 \cdot 10^{-4}$	-0,44	$1,7 \cdot 10^{-4}$

Порівняння корозійної поведінки підкладки зі сталі і КЕП Co-W-ZrO₂ свідчить про те, що стійкість зразків з покриттями зростає на 2 порядки.

Наведені результати висвітлили важливий аспект застосування режимів поляризації для керування складом і морфологією тонкоплівкових покриттів з метою отримання заданого рівня функціональних властивостей поверхні традиційних конструкційних матеріалів. Наступні дослідження буде спрямовано на оптимізацію параметрів електролізу і створення технологічних модулів нанесення сплавів і КЕП кобальту з тугоплавкими елементами.

Висновки

Доведено можливість електросинтезу і керування складом і морфологією поверхні КЕП кобальту з тугоплавкими металами варіюванням густини імпульсного струму. КЕП, осаджені при 4 А/дм², відрізняються рівномірно розгалуженою поверхнею. Фрактальна розмірність поверхні становить 2,77, що свідчить про 3D механізм росту кристалів при формуванні покриття. За параметрами шорсткості поверхні Ra і Rq КЕП відносяться до 9 класу шорсткості. Завдяки цьому їх мікротвердість і корозійна стійкість в 2,5 рази перевищують параметри покриттів, одержаних при 10 А/дм², і переважає відповідні характеристики підкладки. Показано, що вольфрамвмісним КЕП притаманні висока каталітична активність і корозійна стійкість у середовищах різної кислотності.

Список літератури

1. Sidel'nikova S. P., Volodina G. F., Grabko D. Z., Dikumar A. I. Electrochemical obtaining of Co-Mo coatings from citrate solutions containing EDTA: composition, structure, and micromechanical properties. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2007. V. 43. № 6. P. 425–430. doi: 10.3103/S1068375507060038.
2. Ved' M. V., Sakhnenko M. D., Karakurkchi H. V. et al. Functional Properties of Fe–Mo and Fe–Mo–W Galvanic Alloys. *Materials science*. 2016. V. 51. № 5. P.701–710. doi: 10.1007/s11003-016-9893-5.
3. Ahmad J., Asami K., Takeuchi A. et al. High Strength Ni-Fe-W and Ni-Fe-W-P Alloys Produced by Electrodeposition. *Materials Transactions*. 2003. V. 44. № 10. P. 1942–1947.
4. Subramania A., Priya A. R., Muralidharan V. S. Electrocatalytic cobalt-molibdenum alloy deposits, *Int.J.Hydrogen Energy*. 2007. V. 32. № 14. P. 2843–2847. doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.12.027.
5. Tsyntsaru N., Cesiulis H., Donten M. Et al. Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2012. V. 48. P. 491–520. doi: 10.3103/S1068375512060038.
6. Mardani R., Shahmirzaee H., Mohammad H., Vahdani R. Electrodeposition of Ni32Fe48Mo20 and Ni52Fe33W15 alloy film on Cu micro wire from ionic liquid containing plating bath. *Surface and Coatings Technology*. 2017. V. 324. P. 281–287. doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.087.
7. Silkin S. A., Belevskii S. S., Gradinar' A. S. et al. Electrodeposition of nanocrystalline Co-W coatings from citrate electrolytes under controlled hydrodynamic conditions part 3: The micro- and macrodistribution of the deposition rates, the structure, and the mechanical properties *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2010. V. 46. P. 206–212. doi: 10.3103/S1068375510030026.
8. Yar-Mukhamedova G. Sh., Sakhnenko N. D., Ved' M. V. et al. Surface analysis of Fe-Co-Mo electrolytic coatings, 2017 4th Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM 2017), *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. V. 213. P. 12–19. doi:10.1088/1757-899X/213/1/012019.
9. Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Ermolenko I. Yu. et al. Design, Synthesis, and Diagnostics of Functional Galvanic Coatings Made of Multicomponent Alloys. *Materials Science*. 2017. V. 53. № 5. P. 680–686. doi: 10.1007/s11003-017-0009-7.
10. Yaponseva Y. S., Dikumar A. I., Kyblanovskii V. S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co-W alloys electrodeposited from a citrate pyrophosphate electrolyte. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. V. 50. P. 330–337. doi: 10.3103/S1068375514040139.
11. Gomez E., Pellicer E., Vallès E. Influence of the bath composition and the pH on the induced cobalt-molybdenum electrodeposition. *J. Electroanalytical Chemistry*. 2003. V. 556. P. 137–145. doi: 10.1016/S0022-0728(03)00339-5.
12. Prasad S., Marinho F. A., Santana F. S. M. Control and optimization of baths for electrodeposition of Co-Mo-B amorphous alloys. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*. 2000. № 4. P. 423–432. doi: 10.1590/S0104-66322000000400007.
13. Gomez E., Pellicer E., Alcobe X., Valles E. Properties of Co–Mo coating obtained by electrodeposition at pH 6.6. *J.*

Solid State Electrochemistry. 2004. V. 8. P. 497–504. doi: 10.1007/s10008-004-0495-z.

14. Kublanovskii V. S., Yaponseva Yu. S., Troshchenkov Yu. N. et al. Corrosion and magnetic properties of electrolytic Co-Mo alloys. *Russian J. Applied Electrochemistry*. 2010. V. 8, № 3. P. 440–444. doi: 10.1134/S1070427210030134.
15. Shulman A. I., Belevskii S. S., Yushchenko S. P., Dikumar A. I. Role of Complexation in Forming Composition of Co-W Coatings Electrodeposited from Gluconate Electrolyte. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2014. V. 50, № 1. P. 9–17. doi: 10.3103/S106837551401013X.
16. Sillen L. G., Martell A. E. *Stability constants of Metal ion Complexes*. London: The chemical society, 1971. 865 p.
17. Bednar A. J., Jones W. T., Boyd R. E. et al. Geochemical parameters influencing tungsten mobility in soils. *Journal of Environmental Quality*. 2008. V. 37, № 1. P. 229–233. doi: 10.2134/jeq2007.0305.
18. Belevskii S. S., Kosova A. P., Yushchenko S. P. et al. Changes in the properties of a citrate electrolyte used to manufacture cobalt-tungsten coatings. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*. 2011. V. 47. Iss. 4. doi: 10.3103/S1068375511010042.
19. Zieliński M., Miękoś E. Influence of constant magnetic field on the electrodeposition of Co-Mo-W alloys. *J. Applied Electrochemistry*. 2008. V. 38. P. 1771. doi: 10.1007/s10800-008-9628-x.
20. Tsyntsaru N., Cesiulis H., Budreika A. et al. The effect of electrodeposition conditions and post-annealing on nanostructure of Co-W coatings. *Surface and Coatings Technology*. 2012. V. 206. № 19-20, P. 4262–4369. doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.04.036.
21. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Nenastina T. Electrodeposition and properties of binary and ternary cobalt alloys with molybdenum and tungsten. *Applied Surface Science*. 2018. V. 445. P. 298–307. doi: 10.1016/j.apsusc.2018.03.171.
22. Jiang L., Lu J., Pan S. et al. Effect of rare earth salt and perpendicular magnetic field on corrosion resistance and microstructure of CoMoP film in chloride solution. *International Journal of Electrochemical Science*. 2010. №7. P. 2188–2200.
23. Bobanova Zh. I., Dikumar A. I., Cesiulis H. et al. Micromechanical and tribological properties of nanocrystalline coatings electrodeposited from citrate-ammonia solutions. *Russian J. Electrochemistry*. 2009. V. 45, № 8. P. 895–901. doi: 10.1134/S1023193509080096.
24. Tsyntsaru N., Dikumar A., Cesiulis H. et al. Tribological and Corrosive Characteristics of Electrochemical Coatings Based on Cobalt and Iron Superalloys. *Powder Metallurgy and Metal Ceramic*. 2009. № 48. P. 419–428. doi: 10.1007/s11106-009-9150-7.
25. Yermolenko I. Y., Ved' M. V., Sakhnenko N. D., Sachanova Y. I. Composition, morphology, and topography of galvanic coatings Fe-Co-W and Fe-Co-Mo. *Nanoscale research letters*. 2017. V. 12. № 1. P. 352. doi: 10.1186/s11671-017-2128-3.
26. McCall J. *Interpretive techniques for microstructural analysis*. New York-London: Springer Science & Business Media Press, 2012. 202 p.
27. Karakurkchi A., Sakhnenko N., Ved' M. et al. Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2017. V. 89. P. 12–18. doi: 10.15587/1729-4061.2017.109885.

References (transliterated)

1. Sidel'nikova S. P., Volodina G. F., Grabko D. Z., Dikumar A. I. Electrochemical obtaining of Co-Mo coatings from citrate solutions containing EDTA: composition, structure, and micromechanical properties. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2007, V. 43, no 6, p. 425–430. doi: 10.3103/S1068375507060038.
2. Ved' M. V., Sakhnenko M. D., Karakurkchi H. V. et al. Functional Properties of Fe-Mo and Fe-Mo-W Galvanic Alloys. *Materials science*, 2016, V. 51, no 5, p.701–710. doi: 10.1007/s11003-016-9893-5.
3. Ahmad J., Asami K., Takeuchi A. et al. High Strength Ni-Fe-W and Ni-Fe-W-P Alloys Produced by Electrodeposition. *Materials Transactions*, 2003, V. 44, no 10, p. 1942–1947.
4. Subramania A., Priya A. R., Muralidharan V. S. Electrocatalytic cobalt-molybdenum alloy deposits. *Int.J.Hydrogen Energy*, 2007, V. 32, no. 14, p. 2843–2847. doi: 10.1016/j.ijhydene.2006.12.027.
5. Tsyntsaru N., Cesiulis H., Donten M. Et al. Modern Trends in Tungsten Alloys Electrodeposition with Iron Group Metals. *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2012, V. 48, p. 491–520, doi:10.3103/S1068375512060038.
6. Mardani R., Shahmirzaee H., Mohammad H., Vahdani R. Electrodeposition of Ni₃₂Fe₄₈Mo₂₀ and Ni₅₂Fe₃₃W₁₅ alloy film on Cu microwire from ionic liquid containing plating bath. *Surface and Coatings Technology*. 2017, V. 324, p. 281–287, doi: 10.1016/j.surfcoat.2017.05.087.
7. Silkin, S. A., Belevskii, S. S., Gradinar', A. S. et al. Electrodeposition of nanocrystalline Co-W coatings from citrate electrolytes under controlled hydrodynamic conditions part 3: The micro- and macrodistribution of the deposition rates, the structure, and the mechanical properties *Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2010, V. 46, p. 206–212, doi: 10.3103/S1068375510030026.
8. Yar-Mukhamedova G. Sh., Sakhnenko N. D., Ved' M. V. et al. Surface analysis of Fe-Co-Mo electrolytic coatings. 4th Global Conference on Polymer and Composite Materials (PCM 2017), *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017, V. 213, p. 12–19, doi:10.1088/1757-899X/213/1/012019.
9. Sakhnenko M. D., Ved' M. V., Ermolenko I. Yu. et al. Design, Synthesis, and Diagnostics of Functional Galvanic Coatings Made of Multicomponent Alloys. *Materials Science*, 2017, V. 53, no. 5, p. 680–686, doi: 10.1007/s11003-017-0009-7.
10. Yaponseva Y. S., Dikumar A. I. & Kyblanovskii V. S. Study of the composition, corrosion, and catalytic properties of Co-W alloys electrodeposited from a citrate pyrophosphate electrolyte. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, V. 50, p. 330–337, doi: 10.3103/S1068375514040139.
11. Gomez E., Pellicer E., Vallès E. Influence of the bath composition and the pH on the induced cobalt-molybdenum electrodeposition. *J. Electroanalytical Chemistry*, 2003, V. 556, p. 137–145, doi: 10.1016/S0022-0728(03)00339-5.
12. Prasad S., Marinho F. A., Santana F. S. M. Control and optimization of baths for electrodeposition of Co-Mo-B amorphous alloys. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, 2000, no. 4, p. 423–432, doi: 10.1590/S0104-66322000000400007.
13. Gomez E., Pellicer E., Alcobe X., Valles E. Properties of Co-Mo coating obtained by electrodeposition at pH 6.6. *J. Solid State Electrochemistry*, 2004, V. 8, p. 497–504, doi: 10.1007/s10008-004-0495-z.

14. Kublanovskii V. S., Yapontseva Yu. S., Troshchenkov Yu. N. et al. Corrosion and magnetic properties of electrolytic Co-Mo alloys. *Russian J. Applied Electrochemistry*, 2010, V. 8, no. 3, p. 440–444, doi: 10.1134/S1070427210030134.
15. Shulman A. I., Belevskii S. S., Yushchenko S. P., Dikuser A. I. Role of Complexation in Forming Composition of Co–W Coatings Electrodeposited from Gluconate Electrolyte. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2014, V. 50, no. 1, p. 9–17, doi: 10.3103/S106837551401013X.
16. Sillen L. G., Martell A. E. *Stability constants of Metal ion Complexes*. London: The chemical society, 1971, 865 p.
17. Bednar A. J., Jones W. T., Boyd R. E. et al. Geochemical parameters influencing tungsten mobility in soils. *Journal of Environmental Quality*, 2008, V. 37, no. 1, p. 229–233, doi: 10.2134/jeq2007.0305.
18. Belevskii S. S., Kosova A. P., Yushchenko S. P. et al. Changes in the properties of a citrate electrolyte used to manufacture cobalt-tungsten coatings. *J. Surface Engineering and Applied Electrochemistry*, 2011, V. 47, Iss. 4, doi: 10.3103/S1068375511010042.
19. Zieliński M., Miękoś E. Influence of constant magnetic field on the electrodeposition of Co–Mo–W alloys. *J. Applied Electrochemistry*, 2008, V. 38, p. 1771, doi: 10.1007/s10800-008-9628-x.
20. Tsyntsaru N., Cesiulis H., Budreika A. et al. The effect of electrodeposition conditions and post-annealing on nanostructure of Co–W coatings. *Surface and Coatings Technology*, 2012, V. 206, no. 19-20, p. 4262–4369, doi: 10.1016/j.surfcoat.2012.04.036.
21. Yar-Mukhamedova G., Ved' M., Sakhnenko N., Nenastina T. Electrodeposition and properties of binary and ternary cobalt alloys with molybdenum and tungsten, *Applied Surface Science*, 2018, V. 445, p. 298–307, doi: 10.1016/j.apsusc.2018.03.171.
22. Jiang L., Lu J., Pan S. et al. Effect of rare earth salt and perpendicular magnetic field on corrosion resistance and microstructure of CoMoP film in chloride solution. *International Journal of Electrochemical Science*, 2010, no. 7, p. 2188–2200.
23. Bobanova Zh. I., Dikuser A. I., Cesiulis H. et al. Micromechanical and tribological properties of nanocrystalline coatings electrodeposited from citrate-ammonia solutions. *Russian J. Electrochemistry*, 2009, V. 45, no 8, p. 895–901, doi: 10.1134/S1023193509080096.
24. Tsyntsaru N., Dikuser A., Cesiulis H. et al. Tribological and Corrosive Characteristics of Electrochemical Coatings Based on Cobalt and Iron Superalloys. *Powder Metallurgy and Metal Ceramic*, 2009, no. 48, p. 419–428, doi: 10.1007/s11106-009-9150-7.
25. Yermolenko I. Y., Ved M. V., Sakhnenko N. D., Sachanova Y. I. Composition, morphology, and topography of galvanic coatings Fe-Co-W and Fe-Co-Mo, *Nanoscale research letters*, 2017, V. 12, no. 1, p. 352, doi: 10.1186/s11671-017-2128-3.
26. McCall J. *Interpretive techniques for microstructural analysis*. New York-London: Springer Science & Business Media Press, 2012, 202 p.
27. Karakurkchi A., Sakhnenko N., Ved' M. et al. Application of oxide-metallic catalysts on valve metals for ecological catalysis. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2017, V. 89, p. 12–18, doi: 10.15587/1729-4061.2017.109885.

Сведения об авторах (About authors)

Ненастіна Тетяна Олександрівна – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний автомобільно-дорожній університет, доцент кафедри технології дорожньо-будівельних матеріалів і хімії, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-6108-4023; e-mail: nenastina@ukr.net.

Tetiana Nenastina – Ph.D., Assoc. prof., The department of technology of road-construction materials and chemistry, Kharkov National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-6108-4023; e-mail: nenastina@ukr.net.

Ведь Марина Віталіївна – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри загальної та неорганічної хімії, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-5719-6284; e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua.

Maryna Ved' – Dr. Sci., Prof., department of general and inorganic chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-5719-6284; e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua.

Сахненко Микола Дмитрович – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», завідувач кафедри фізичної хімії, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Nikolai Sakhnenko – Dr. Sci., Prof., department of physical chemistry, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-5525-9525; e-mail: sakhnenko@kpi.kharkov.ua.

Зубанова Светлана Ивановна – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», старший науковий співробітник кафедри фізичної хімії, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-6673-6681; e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua

Svetlana Zyubanova – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior researcher department of physical chemistry, Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6673-6681; e-mail: vmv@kpi.kharkov.ua

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Ненастіна Т. О., Ведь М. В., Сахненко М. Д., Зубанова С. І. Вплив морфології поверхні композиційних електролітичних покриттів Co-W-ZrO₂ на функціональні властивості сплавів. *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 0–8. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.14.

Please cite this article as:

Nenastina T., Ved' M., Sakhnenko M., Zubanova S. The effect of surface morphology of Co-W-ZrO₂ electrolytic composite coatings on the functional properties of alloys. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 0– 8, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.14.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Ненастина Т. А., Ведь М. В., Сахненко Н. Д., Зюбанова С. И. Влияние морфологии поверхности композиционных электролитических покрытий Co-W-ZrO₂ на функциональные свойства сплавов. *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 0– 8. doi: 10.20998/2413-4295.2020.02.14.

АНОТАЦІЯ Доказана возможность электросинтеза и управления составом и морфологией поверхности композиционных электролитических покрытий кобальта с тугоплавкими металлами варьированием плотности импульсного тока. Композиты, осажденные на медную подложку из билигандных цитратно-пирофосфатных электролитов при плотности импульсного тока 4 А/дм², отличаются развитой поверхностью и более равномерным распределением компонентов по поверхности, повышенным содержанием вольфрама, почти в 5 раз превосходящим покрытия, осажденные при 10 А/дм², и снижением процента кислорода вдвое (до 5,5%). Это объясняется торможением реакции выделения газообразного водорода и участием ад-атомов водорода в химическом восстановлении промежуточных оксидов вольфрама до металла при прерывании поляризации. Покрытия, полученные с использованием импульсного тока, можно считать композитами состава Co-W-ZrO₂, в которых оксидная фаза образуется непосредственно в электродном процессе как интермедиат неполного восстановления вольфрамов. Топография пленок отличается наличием зерен эллиптической и сферической формы с размерами кристаллитов 80–180 нм. На основной поверхности встречаются выступы (крупные зерна) диаметром 1–3 мкм. Фрактальная размерность поверхности составляет 2,77, что свидетельствует о 3D механизме роста кристаллов при формировании покрытия. По параметрам шероховатости поверхности Ra и Rq покрытия относятся к 9 классу шероховатости. Благодаря количественному составу, морфологии и фрактальности поверхности микро твердость и коррозионная стойкость систем Co-W-ZrO₂, осажденных при плотности тока 4 А/дм², на 20% превышают параметры покрытий, полученных при 10 А/дм², и в 3 раза превышает соответствующие характеристики подложки. Показано, что вольфрам содержащие КЭП проявляют каталитическую активность в реакции окисления этанола и коррозионную стойкость в средах различной кислотности.

Ключевые слова: композиционные электролитические покрытия; импульсный электролиз; вольфрам; кобальт; цирконий; фрактальный анализ поверхности; каталитическая активность; коррозионная стойкость

Надійшла (received) 28.04.2020

УДК: 664.144: 635.62

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.15

ГАРБУЗОВІ ЦУКАТИ – ЛАСОЩІ З ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ВЛАСТИВОСТЯМИ

О. П. ПРИСС*, М. Є. СЕРДЮК, В. Ф. ЖУКОВА, О. І. СУХАРЕНКО, В. В. КОЛЯДЕНКО¹

кафедра харчових технологій та готельно-ресторанної справи, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Мелітополь, УКРАЇНА

*e-mail: olesyapriss@gmail.com

АНОТАЦІЯ Гарбузові овочі володіють різноманітними функціональними властивостями. Однак, глибока переробка зазвичай супроводжується втратою вітамінів та деградацією цінних фітонутрієнтів. Гарбузові цукати передбачають мінімальну переробку сировини і є корисною альтернативою цукеркам та іншим кондитерським виробам. Мета роботи полягала в удосконаленні технології виробництва гарбузових цукатів зі збалансованими смакоароматичними характеристиками та високим вмістом каротиноїдів. Для виготовлення цукатів використовували гарбуз двох видів і сортів: «Мускат Де Прованс» (*Cucurbita moschata* Duch) і «Ждана» (*Cucurbita maxima* Duch). Цукати виготовляли за традиційною та збагаченою смакоароматичними компонентами рецептурою. Для корекції смакоароматичних показників, використовували апельсини та корицю, крім ароматичних властивостей вирізняються цінним хімічним складом. Технологічна схема передбачала наступні операції: підготовка і подрібнення гарбуза на шматочки; пересипання цукром з одночасним додаванням компонентів за збагаченою рецептурою; витримання 8...10 год до виділення соку; відділення отриманого сиропу; нагрівання сиропу ($t=102\pm 1^\circ\text{C}$); заливання гарбузових шматочків гарбузовим сиропом; охолодження ($t=35\pm 5^\circ\text{C}$); відділення сиропу; повторне нагрівання і заливання гарбузових шматочків гарбузовим сиропом; охолодження і відділення сиропу; підсушування цукатів ($t=45\pm 5^\circ\text{C}$); пересипання цукровою пудрою. В процесі досліджень, за загальноприйнятими методиками, визначали загальний вміст сухих речовин, вміст сухих розчинних речовин, пектинових речовин, вміст цукрів, титровану кислотність, каротиноїдів та аскорбінової кислоти. Гарбуз сорту Мускат де Прованс суттєво програв сорту Ждана за кількістю сухих та сухих розчинних речовин, проте вирізняється високим вмістом каротиноїдів, що матиме важливе значення для отримання продукції функціонального призначення. Встановлено, що застосована технологія виготовлення гарбузових цукатів дозволяє отримати продукт високої якості зі збалансованими смакоароматичними характеристиками з високою кількістю каротиноїдів та аскорбінової кислоти. Вміст сухих речовин у готових цукатах становить 80,02...83,96%. Отримана продукція, залежно від сорту гарбуза та рецептури, містить від 8,05 до 16,55 мг/100 г каротиноїдів та 10,47...14,86 мг/100 г аскорбінової кислоти.

Ключові слова: гарбуз; цукати; функціональні властивості; хімічний склад; органолептичні показники; технологія

CANDIED PUMPKINS – A DELICACY WITH FUNCTIONAL PROPERTIES

O. PRISS, M. SERDYUK, V. ZHUKOVA, O. SUKHARENKO, V. KOLIADENKO

Food technology, hotel and restaurant business department, Dmytro Motornyi Tavria state agrotechnological university, Melitopol, UKRAINE

ABSTRACT Pumpkin vegetables have many functional properties. However, deep processing really supports the lost vitamins and degradation results of phytonutrients. Candied pumpkins suggest minimum processing of a primary produce and represent useful alternative to other types of confectionery. The aim of the work was to improve the technology of production of candied pumpkins with balanced flavor characteristics and higher content of carotenoids. Two types and cultivars of pumpkins were used for production of candied fruit: Muscat De Provence (*Cucurbita moschata* Duch) and Zhdana (*Cucurbita maxima* Duch). Candied fruits were made according to a traditional recipe and enriched with flavoring components. Orange and cinnamon which stand out for their valuable chemical composition were also used for improvement of flavor characteristics of the produce. The process flow included the following operations: preparing and chopping pumpkins into pieces; mixing with sugar with simultaneous addition of enriched flavor components; soaking for 8...10 hours; separating the resulted syrup; heating the syrup ($t=102\pm 1^\circ\text{C}$); pouring the hot syrup onto the pieces of pumpkins; cooling ($t=35\pm 5^\circ\text{C}$); separating the syrup; repeated heating and pouring the hot syrup onto the pieces of pumpkins; cooling and separating the syrup; drying the candied fruit ($t=45\pm 5^\circ\text{C}$); adding powdered sugar. In the process of the research with conventional methods the authors determined the general dry solids content, the content of dry soluble substance, pectin substance and sugars, titrated acidity, the content of carotenoids and ascorbic acid. The pumpkin cultivar Muscat De Provence was at a considerable disadvantage with the Zhdana cultivar in the quantity of dry solids and dry soluble substance, though it was remarkable with high content of carotenoids, which is important for the functional purpose of the produce. It is established that the applied technology of making pumpkin candied fruits allows obtaining a high quality product with balanced taste and aromatic characteristics with a high amount of carotenoids and ascorbic acid. The content of dry substance in the finished candied fruit was at 80.02...83.96%. The derived product, depending on a pumpkin cultivar and a recipe, contained from 8.05 to 16.55 mg/100 g carotenoids and up to 10.47...14.86 mg/100 g ascorbic acid.

Keywords: pumpkin; candied fruit; functional properties; chemical composition; organoleptic characteristics; technology

Вступ

Сьогодні українські споживачі все частіше звертають увагу на здорове харчування, потенційні переваги для здоров'я конкретних продуктів і харчових інгредієнтів. Наукові дані підтверджують думку про те, що деякі з них, крім забезпечення

основних харчових потреб, можуть мати позитивний вплив на наше здоров'я та самопочуття. Завдяки цілій низці авторитетних наукових досліджень [1–4] сьогодні виявлено та розкрито механізми біологічно активних компонентів у їжі, які мають позитивний вплив на здоров'я та можуть знижувати ризик потенційних захворювань. Саме у цьому полягає

концепція функціональних продуктів, хоча існує багато трактувань терміну «функціональні продукти» [5].

Європейська комісія, що займалась узгодженням дій з питань науки про функціональні харчові продукти в Європі, запропонувала наступне визначення функціональних харчових продуктів: «...їжа, яка благотворно впливає на одну або декілька цільових функцій в організмі за межами адекватних харчових ефектів таким чином, що стосується поліпшення стану здоров'я та самопочуття та / або зменшення ризику захворювання. Її вживають як частину нормальної їжі. Це не таблетки, капсули або будь-які харчові добавки» [6]. Ґрунтуючись саме на такому визначенні функціональних продуктів, фахівці відносять до функціональних продуктів харчування фрукти та овочі [7,8], пряно ароматичні рослини та спеції [9].

Беззаперечними функціональними властивостями володіють і гарбузові овочі [10–13]. Такі продукти переробки гарбузів як борошно, пластівці, пюре використовують для виробництва макаронних виробів, хліба, печива, кексів, соусів, морозива, джемів, желе, мармеладу, соків, напоїв та ін. [14–16]. Однак, глибока переробка зазвичай супроводжується втратою вітамінів та окисленням поліфенольних речовин. Відтак, науковці акцентують увагу на способах, які передбачають мінімальну переробку для збереження комплексу фітонутрієнтів сировини. Таким способом може бути і виробництво гарбузових цукатів, які є корисною альтернативою цукеркам та іншим кондитерським виробам.

Цукати це продукти з плодів, ягід чи овочів, зварених у цукровому сиропі, підсушених і обсипаних цукром чи глазуrowаних. Асортимент цукатів на ринку України досить обмежений і представлений в основному плодово-ягідними цукатами виробництва Таїланду, Китаю, Ізраїлю. Сьогодні, враховуючи світовий тренд вживання корисних та якісних продуктів, українські підприємства намагаються відродити традиції виробництва «київського сухого варення» (ТОВ «Яросвіт-С», м. Київ), а також виготовляють цукати з екологічно чистої продукції (ТОВ «ІКРОК», м. Вінниця, компанія «Kasap» м. Харків).

Виробництво цукатів ведуть за різними технологіями, що мають значні відмінності. Класична технологія виготовлення цукатів передбачає варку підготовленої сировини у цукровому сиропі, відділення сиропу і сушку цукатів [17]. Технологічний процес може вестись з попереднім бланшуванням сировини [17] або без нього [18,19]. Бланшування може покращувати органолептичні показники продукції [19]. Однак, за даними багатьох авторів, під час бланшування зростають втрати біологічно активних речовин антиоксидантної дії [19, 20]. Дослідження показали, що цукровий сироп може стабілізувати колір після висушування окремих фруктів та овочів [21,22]. Під час інфузії деякі розчинні пігменти можуть також переноситися з

сировини в осмотичний розчин зі значною втратою кольору [23, 24]. Недоліком продукції отриманої за такими технологіями є підвищений вміст цукрів (68–72%), наявність в результаті численного уварювання окислених поліфенольних речовин, що містяться в сировині, карамелізованого цукру, що знижує привабливість товарного вигляду і смаку, сприяє зменшенню вмісту біологічно активних речовин в готовому продукті [17].

Відомі також і так звані «сухі» технології отримання цукатів, де сировину засипають цукром і залишають для виділення соку. Далі отриману рідину зливають, кип'ятять та занурюють шматочки сировини в киплячий сироп і варять 3...7 хв [25]. Така технологія, при переробці гарбузів сорту Москвичка, дозволяє отримати продукцію з відносно зниженою кількістю цукру (56,2%) та високим вмістом β -каротину (20 мг / 100 г). Дослідники наголошують, що при виготовленні цукатів гарбуза важливий підбір сорту [19].

Хімічний склад і фізичні властивості гарбузів суттєво різняться залежно від видових і сортових особливостей [26–28], агротехнології [29] та зберігання [30]. Для корекції смакоароматичних характеристик цукатів доцільно використовувати пряно ароматичну сировину, що володіє комплексом властивостей. З огляду на суттєві відмінності у технологічних властивостях сировини, виникає потреба в постійному удосконаленні технології виробництва, щоб забезпечити високу якість готових виробів.

Мета роботи

Мета досліджень полягає в удосконаленні технології виробництва гарбузових цукатів зі збалансованими смакоароматичними характеристиками та високим вмістом каротиноїдів.

Виклад основного матеріалу

Для виготовлення цукатів використовували гарбуз двох видів і сортів: «Мускат Де Прованс» (*Cucurbita moschata* Duch) і «Ждана» (*Cucurbita maxima* Duch). Свіжий гарбуз мили, видаляли неїстівні частини, нарізали шматочками товщиною близько 2 см, довжиною близько 5 см. Подрібнену сировину засипали цукром з розрахунку 0,3 кг цукру на 1 кг підготованого гарбуза. Для корекції смакоароматичних показників, використовували апельсини, нарізані дольками разом зі шкіркою (0,2 кг на 1 кг гарбуза) та корицю у паличках (10 г на 1 кг), котрі крім ароматичних властивостей вирізняються цінним хімічним складом. Апельсини містять велику кількість ефірних олій, аскорбінової кислоти, каротиноїдів та інших біологічно активних сполук [31]. Хімічне профілювання компонентів кориці підтверджує її біологічну активність, включаючи протимікробну, противірусну, антиоксидантну, протипухлинну, антигіпертензійну, антиліпемічну, антидіабетичну, гастропротекторну та імуномодулюючу. Крім того, ця спеція проявляє

біоактивність до метаболічного синдрому, пов'язаного з діабетом [32].

Цукати виготовляли за традиційною та збагаченою смакоароматичними компонентами рецептурами. Технологічна схема передбачала наступні операції: підготовка і подрібнення гарбуза на шматочки; пересипання просіяним цукром (можливе одночасне додавання компонентів за збагаченою рецептурою); витримування ($\tau=8\ldots 10$ год) до виділення соку; відділення отриманого сиропу; нагрівання сиропу ($t=102\pm 1^\circ\text{C}$); заливання гарячим сиропом шматочків гарбуза; охолодження ($t=35\pm 5^\circ\text{C}$); відділення сиропу; повторне нагрівання сиропу ($t=102\pm 1^\circ\text{C}$); заливання гарячим сиропом шматочків гарбуза; охолодження ($t=35\pm 5^\circ\text{C}$); відділення сиропу; підсушування цукатів ($t=45\pm 5^\circ\text{C}$, $\tau=10\ldots 12$ год); пересипання цукровою пудрою.

Органолептичну оцінку цукатів здійснювали за бальною шкалою від 0 до 3, оцінюючи смак, аромат, колір, консистенцію, зовнішній вигляд. У процесі досліджень, за загальноприйнятими методиками, визначали загальний вміст сухих речовин, вміст сухих розчинних речовин, пектинових речовин, вміст цукрів, титровану кислотність, каротиноїдів та аскорбінової кислоти (АК) [33]. Твердість готових цукатів оцінювали за допомогою пенетрометра (тестера щільності) GY-3, що вимірює зусилля, необхідне для проникнення у цукати. Використовували циліндричний сталевий зонд діаметром 8 мм. Вимірювання проводили у точці максимально наближеній до геометричного центру шматочка, в п'яти повтореннях. Глибина проникнення зонду 10 мм. За результат приймали середнє арифметичне 5 вимірювань.

Залежно від виду і сорту, в хімічному складі гарбуза спостерігали суттєві відмінності (табл. 1).

Цукати, виготовлені за описаною вище технологією, оцінювали за органолептичними показниками (табл. 2).

Таблиця 3 – Хімічний склад цукатів з гарбуза, $M\pm m$, $n=3$

Показники	Мускат де Прованс		Ждана	
	Традиційна рецептура	Збагачена рецептура	Традиційна рецептура	Збагачена рецептура
Сухі речовини, %	80,02 \pm 0,31	82,71 \pm 0,75	82,31 \pm 0,28	83,96 \pm 0,88
Загальний вміст цукрів, г/100г	55,04 \pm 0,41	56,49 \pm 0,51	58,02 \pm 0,55	60,64 \pm 0,49
Редуковані цукри, г/100г	15,70 \pm 0,51	16,17 \pm 1,22	13,40 \pm 1,28	15,18 \pm 1,50
Пектинові речовини, %	0,68 \pm 0,07	0,79 \pm 0,09	1,23 \pm 0,07	1,29 \pm 0,03
Титрована кислотність, %	0,10 \pm 0,01	0,22 \pm 0,01	0,21 \pm 0,01	0,33 \pm 0,01
Сума каротиноїдів мг/100 г	15,31 \pm 0,29	16,55 \pm 0,29	8,05 \pm 0,06	9,15 \pm 0,04
Аскорбінова кислота, мг/100 г	10,47 \pm 0,19	10,52 \pm 0,24	11,71 \pm 0,22	14,86 \pm 0,14

Обговорення результатів

Гарбуз сорту Мускат де Прованс суттєво програє сорту Ждана за кількістю сухих та сухих розчинних речовин, проте вирізняється високим вмістом каротиноїдів (див. табл. 1), що матиме важливе значення для отримання продукції

Таблиця 1– Хімічний склад свіжого гарбуза, $M\pm m$, $n=3$

Показники	Мускат Де Прованс	Ждана
Сухі речовини, %	9,00 \pm 0,10	16,22 \pm 0,13
Сухі розчинні речовини, %	8,04 \pm 0,05	13,29 \pm 0,08
Пектинові речовини, %	0,91 \pm 0,05	1,68 \pm 0,01
Загальний вміст цукрів, г/100 г	2,70 \pm 0,13	4,26 \pm 0,11
Редуковані цукри, г/100г	1,84 \pm 0,08	3,09 \pm 0,07
Титрована кислотність, %	0,14 \pm 0,01	0,36 \pm 0,01
Сума каротиноїдів мг/100 г	16,84 \pm 0,38	8,97 \pm 0,09
Аскорбінова кислота, мг/100 г	17,80 \pm 0,35	20,00 \pm 0,41

Таблиця 2 – Дегустаційна оцінка цукатів з гарбуза, бали, $M\pm m$, $n=5$

Показники	Мускат де Прованс		Ждана	
	традицій на рецептур а	збагачена рецептур а	традицій на рецептур а	збагачена рецептур а
Зовнішній вигляд	2,5 \pm 0,04	2,9 \pm 0,04	2,6 \pm 0,04	3,0 \pm 0,02
Колір	2,8 \pm 0,04	3,0 \pm 0,02	2,0 \pm 0,04	2,8 \pm 0,03
Текстура	2,0 \pm 0,02	2,8 \pm 0,03	2,5 \pm 0,04	3,0 \pm 0,02
Аромат	1,8 \pm 0,03	3,0 \pm 0,02	1,6 \pm 0,02	2,8 \pm 0,03
Смак	1,6 \pm 0,04	3,0 \pm 0,02	1,9 \pm 0,02	3,0 \pm 0,02
Середній бал	2,14	2,94	2,12	2,92

Органолептична оцінка цукатів виготовлених за збагаченою рецептурою була 2,92...2,94 бали проти 2,12...2,14 балів у цукатів виготовлених за традиційною рецептурою.

Отримані цукати за хімічним складом зберігали відмінності характерні для свіжої сировини (табл. 3).

функціонального призначення. Титрована кислотність у гарбузах обох сортів досить низька, тож для врівноваження цукрово-кислотного індексу в рецептурі цукатів досить доречним було введення сировини з високим вмістом органічних кислот, що підтверджується вищим результатом дегустаційної оцінки (див. табл. 2). За органолептичними

показниками цукати відповідають поставленим вимогам. Зовнішній вигляд – шматочки вирівняні, не скручені чи зморщені, прозорі, не липнуть, без наявності викристалізованого цукру. Аромат характерний для гарбуза; у зразків виготовлених за збагаченою рецептурою з приємними нотками цитрусових і кориці. Смак солодкий. Текстура щільна, не ламається, легко розкушується. Суттєвий вплив на органолептичну оцінку мала текстура цукатів, що в першу чергу залежала від їх твердості. Твердість цукатів виготовлених із гарбуза сорту Муск де Прованс становила $10,12 \pm 0,18$ кг/см², а твердість цукатів з сорту Ждана $11,46 \pm 0,32$ кг/см². Твердість цукатів виготовлених за збагаченою рецептурою не відрізнялась від цукатів виготовлених за традиційною рецептурою.

Для стійкості під час зберігання вміст сухих речовин у цукатах повинен становити не менше 80% [25]. Таким вимогам відповідають цукати отримані з обох сортів гарбуза та за обома рецептурами (див. табл. 3). Досить близьким є і вміст загального цукру для обох сортів. Проте, за вмістом каротиноїдів помітно вищу кількість містять цукати виготовлені з гарбуза сорту Мускат де Прованс. Як продукт з функціональними властивостями, найбільшу цінність матимуть цукати, з високим вмістом каротиноїдів. Деяке зниження вмісту каротиноїдів у порівнянні зі свіжим гарбузом пояснюється схильністю каротиноїдів до автоокиснювальної деградації під час переробки [18]. Проте, застосовані технологічні прийоми, що передбачають нагрівання лише сиропу, без варки шматочків сировини, дозволяють скоротити втрати каротиноїдів до 11,4...11,5 %, що є перевагою, адже відомо, що при виготовленні гарбузових цукатів методом багатократної варки втрати каротину сягають 60...70% [19]. Крім того, збагачення рецептури додатковою сировиною, що містить значну кількість каротиноїдів, дозволяє стабілізувати кількість каротиноїдів у цукатах фактично на рівні вихідної гарбузової сировини. Важливим є також доволі значний вміст АК у готових цукатах. Незважаючи на втрати АК у технологічному процесі (близько 30%), гарбузові цукати, особливо, виготовлені за збагаченою рецептурою можуть бути оцінені як з високим вмістом, адже цифри можна порівняти із вмістом АК у свіжих яблуках [34].

Висновки

Встановлено, що гарбузові цукати виготовлені за збагаченою рецептурою по технології, що передбачає засипання сировини цукром з наступною двократною варкою виділеного соку, без варки самих шматочків гарбуза, дозволяє отримати продукт високої якості зі збалансованими смакоароматичними характеристиками. Вміст сухих речовин у готових цукатах становить 80,02...83,96%. Втрати суми каротиноїдів в готових цукатах становлять лише 11,4...11,5% від їхнього вмісту в сировині, а аскорбінової кислоти близько 30%. Отримана

продукція, залежно від сорту гарбуза та рецептури, містить від 8,05 до 16,55 мг/100 г каротиноїдів та 10,47...14,86 мг/100 г аскорбінової кислоти. Тож гарбузові цукати виготовлені за описаною технологією та збагаченою рецептурою є багатим джерелом каротиноїдів та аскорбінової кислоти.

Список літератури

1. Boivin D., Lamy S., Lord-Dufour S., Jackson J., Beaulieu E., Côté M., Moghrabi A., Barrette S., Gingras D., Béliveau R. Antiproliferative and antioxidant activities of common vegetables: A comparative study. *Food Chem.* 2009. № 112(2). P. 374–380. doi:10.1016/j.foodchem.2008.05.084.
2. Jadhav S. S., Salunkhe V. R., Chandrakant M. S. Daily consumption of antioxidants. *Asian J. Pharm. Res.* 2013. № 3 (1). P. 34–40.
3. Wilson D. W., Nash P., Buttar H. S., Griffiths, K., Singh, R., De Meester F., Horiuchi R., Takahashi T. The role of food antioxidants, benefits of functional foods, and influence of feeding habits on the health of the older person: an overview. *Antioxidants.* 2017. № 6(4). № 81. 20 p. doi:10.3390/antiox6040081.
4. Romagnolo, D. F., Selmin O. I. Mediterranean diet and prevention of chronic diseases. *Nutrition today.* 2017. № 52(5) P. 208–222. doi: 10.1097/NT.0000000000000228.
5. Martirosyan D. M.; Singh J. A new definition of functional food by FFC: what makes a new definition unique? *Functional foods in health and disease.* 2015. № 5(6). P. 209–223. doi: 10.31989/ffhd.v5i6.183.
6. Functional Foods. Directorate-General for Research and Innovation, European Commission. *Luxembourg: Publications Office of the European Union.* 2010. 24 p. doi: 10.2777/82512.
7. Milner J. A. Functional foods and health: a US perspective. *British Journal of Nutrition.* 2002. № 88 (S2). P. S152–S158. doi: 10.1079/BJN2002680.
8. Пивоваров В. Ф., Пышная О. Н., Гуркина Л. К. Овощи – продукты и сырье для функционального питания. *Вопросы питания.* 2017. № 86 (3). С. 121–127.
9. Viuda-Martos M., Ruiz-Navajas Y., Fernández-López J., Pérez-Álvarez J. A. Spices as functional foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition.* 2010. № 51 (1). P. 13–28. doi: 10.1080/10408390903044271.
10. Dhiman A. K., Sharma K. D., Attri S. Functional constituents and processing of pumpkin: A review. *Journal of Food Science and Technology.* 2009. № 46(5). P. 411–417.
11. Colagar A. H., Souraki O. A. Review of pumpkin anticancer effects. *Quran Med.* 2012. № 1 (4), P. 77–88. doi: 10.5812.quranmed.8923.
12. Perkins-Veazie P. Cucurbits, watermelon, and benefits to human health. *Acta Horticulturae 871: IV International Symposium on Cucurbits.* 2009. P. 25–32. doi:10.17660/ActaHortic.2010.871.1.
13. Kulczyński B., Gramza-Michałowska A. The profile of secondary metabolites and other bioactive compounds in Cucurbita pepo L. and Cucurbita moschata pumpkin cultivars. *Molecules.* 2019. № 24(16). 20 p. doi: 10.3390/molecules24162945.
14. Khamidah A., Antarlina S. S. Diversified Food Products of Pumpkin (Cucurbita moschata). *Proceedings of International Conference on Green Agro-Industry Faculty of Agriculture.* Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Yogyakarta, 2013. P. 359–370.

15. Kaur G. *Development of Functionalprobiotic Beverage From Pumpkin* (Doctoral dissertation, Lovely Professional University), 2018. 38 p.
16. Непочатих Т. А. *Формування якості цукатів з каротинвміщуючої сировини в процесі їх виробництва та зберігання*. Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук. Харків, 2005. 20 с.
17. Райхель Н.З., Алексеева Н.В., Джайшибеков Г.З., Кайпова Ж.Н. Способы производства цукатов. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2017. 2-2. С.168-171.
18. Muzzaffar S., Baba W. N., Nazir N., Masoodi F. A., Bhat M. M., Bazaz R. Effect of storage on physicochemical, microbial and antioxidant properties of pumpkin (*Cucurbita moschata*) candy. *Cogent Food & Agriculture*. 2016. № 2(1). 13 p. doi:10.1080/23311932.2016.1163650.
19. Степанова Н. Ю. Технологическая оценка производства цукатов из моркови, свёклы и тыквы. *Процессы и аппараты пищевых производств*. 2015. № 2. С. 175–176.
20. Nambi V. E., Gupta R. K., Kumar, S., Sharma P. C. Degradation kinetics of bioactive components, antioxidant activity, colour and textural properties of selected vegetables during blanching. *Journal of food science and technology*. 2016. № 53 (7). P 3073–3082. doi: 10.1007/s13197-016-2280-2.
21. Aktas T., Fujii S., Kawano Y., Yamamoto S. Effects of pretreatments of sliced vegetables with trehalose on drying products. *Food and Bioproducts Processing*. 2007. № 85 (3). P. 178–183. doi: 10.1205/fbp07037.
22. Sosa N., Salvatori D. M., Schebor C. Physico-chemical and mechanical properties of apple discs subjected to osmotic dehydration and different drying methods. *Food and Bioprocess Technology*. 2012. № 5 (5). P. 1790–1802. doi: 10.1007/s11947-010-0468-4.
23. Osorio C., Franco M. S., Castano M. P., Gonzalez-Miret M. L., Heredia F. J., Morales A. L. Color and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*. 2007. № 8 (3). С. 353–359. doi: 10.1016/j.ifset.2007.03.009.
24. Chottamom P., Kongmanee R., Manklang C., Soponronnarit S. Effect of osmotic treatment on drying kinetics and antioxidant properties of dried mulberry. *Drying Technology*. 2012. № 30. P. 80–87. doi: 10.1080/07373937.2011.625461.
25. Павлов Л. В., Голубкина Н. А., Шилов Л. М., Баранова Е. В., Химич Г. А. Цукаты из тыквы, технология их приготовления и стандарт. *Овощи России*. 2017. № 1. С. 39–41. doi: 10.18619/2072-9146-2017-1-39-41.
26. Kulczyński B., Gramza-Michałowska A. The Profile of Carotenoids and Other Bioactive Molecules in Various Pumpkin Fruits (*Cucurbita maxima* Duchesne) Cultivars. *Molecules*. 2019. № 24 (18). 3212. 19 p. doi: 10.3390/molecules24183212.
27. Zinash A., Woldetsadik K. Effect of accessions on the chemical quality of fresh pumpkin. *African Journal of Biotechnology*. 2013 № 12 (51). P. 7092–7098. doi: 10.5897/AJB10.1751.
28. Дубініна А., Летута Т., Томашевська Р. Порівняльна оцінка якості господарсько-ботанічних сортів гарбуза. *Товари і ринки*. 2011. №1. С. 132–139.
29. Biesiada A., Nawirska A., Kucharska A., Sokół-Lętowska A. The effect of nitrogen fertilization methods on yield and chemical composition of pumpkin (*Cucurbita maxima*) fruits before and after storage. *Vegetable Crops Research Bulletin*. 2009. № 70. P. 203–211. doi: 10.2478/v10032-009-0020-0.
30. Biesiada A., Nawirska A., Kucharska A., Sokół-Lętowska A. Chemical composition of pumpkin fruit depending on cultivar and storage. *Ecological Chemistry and Engineering*. A. 2011. №18(1). P. 9–18.
31. Bermejo A., Llosá M. J., Cano A. Analysis of bioactive compounds in seven citrus cultivars. *Food Science and Technology International*. 2011. № 17(1). P. 55–62. doi: 10.1177/1082013210368556.
32. Shen Y., Jia L. N., Honma N., Hosono T. Beneficial effects of cinnamon on the metabolic syndrome, inflammation, and pain, and mechanisms underlying these effects – a review. *Journal of traditional and complementary medicine*. 2012. № 2 (1). P. 27–32. doi: 10.1016/s2225-4110(16)30067-0.
33. Сердюк М. Є., Прищ О. П., Гапріндашвілі Н. А., Здоровцева Л. М., Сухаренко О. І., Іванова І. Є. *Дослідницький практикум. Частина 1. Методи дослідження плодоовочевої та яєчної продукції*. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. 370 с.
34. Седов Е. Н., Макаркина М. А., Серова З. М. Вариабельность биохимического состава яблок и возможности его улучшения путем селекции. *Аграрный вестник Урала*. 2009. № 6(60). С. 44–47.

References (transliterated)

1. Boivin D., Lamy S., Lord-Dufour S., Jackson J., Beaulieu E., Côté M., Moghrabi A., Barrette S., Gingras D., Béliveau R. Antiproliferative and antioxidant activities of common vegetables: A comparative study. *Food Chem*, 2009, no. 112(2), p. 374–380, doi:10.1016/j.foodchem.2008.05.084.
2. Jadhav S. S., Salunkhe V. R., Chandrakant M. S. Daily consumption of antioxidants. *Asian J. Pharm. Res*, 2013, no. 3 (1), p. 34–40.
3. Wilson D. W., Nash P., Buttar H. S., Griffiths, K., Singh, R., De Meester F., Horiuchi R., Takahashi T. The role of food antioxidants, benefits of functional foods, and influence of feeding habits on the health of the older person: an overview. *Antioxidants*, 2017, no. 6(4), no. 81, 20 p., doi:10.3390/antiox6040081.
4. Romagnolo, D. F., Selmin O. I. Mediterranean diet and prevention of chronic diseases. *Nutrition today*, 2017, no. 52 (5), p. 208–222, doi: 10.1097/NT.0000000000000228.
5. Martirosyan D. M.; Singh J. A new definition of functional food by FFC: what makes a new definition unique? *Functional foods in health and disease*, 2015, no 5(6), p. 209–223, doi: 10.31989/fhhd.v5i6.183.
6. Functional Foods. Directorate-General for Research and Innovation, European Commission. *Luxembourg: Publications Office of the European Union*, 2010, 24 p., doi: 10.2777/82512.
7. Milner J. A. Functional foods and health: a US perspective. *British Journal of Nutrition*, 2002, no. 88 (S2), p. S152–S158, doi: 10.1079/BJN2002680.
8. Pivovarov V. F., Pyshnaya O. N., Gurkina L. K. Ovoshi – produkty i syre dlya funktsionalnogo pitaniya [Vegetables are products and raw material for functional nutrition]. *Voprosy pitaniia [Nutrition issues]*, 2017, no. 86 (3), p. 121–127.
9. Viuda-Martos M., Ruiz-Navajas Y., Fernández-López J., Pérez-Álvarez J. A. Spices as functional foods. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, 2010, no. 51(1), p. 13–28, doi: 10.1080/10408390903044271.
10. Dhiman A. K., Sharma K. D., Attri S. Functional constituents and processing of pumpkin: A review. *Journal of Food Science and Technology*, 2009, 46(5), p. 411–417.

11. Colagar A. H., Souraki O. A. Review of pumpkin anticancer effects. *Quran Med*, 2012, no. 1(4), p. 77–88, doi: 10.5812.quranmed.8923.
12. Perkins-Veazie P. Cucurbits, watermelon, and benefits to human health. *Acta Horticulturae 871: IV International Symposium on Cucurbits*, 2009, P. 25–32, doi: 10.17660/ActaHortic.2010.871.1.
13. Kulczyński B., Gramza-Michałowska A. The profile of secondary metabolites and other bioactive compounds in Cucurbita pepo L. and Cucurbita moschata pumpkin cultivars. *Molecules*, 2019, no. 24(16), 20 p., doi: 10.3390/molecules24162945.
14. Khamidah A., Antarlina S. S. Diversified Food Products of Pumpkin (Cucurbita moschata). *Proceedings of International Conference on Green Agro-Industry Faculty of Agriculture. Universitas Pembangunan Nasional "Veteran" Yogyakarta*, 2013, p. 359–370.
15. Kaur G. *Development of Functionalprobiotic Beverage From Pumpkin* (Doctoral dissertation, Lovely Professional University), 2018. 38 p.
16. Nepochatij T. A. *Formuvannya yakosti tsukativ z karotin-vmischuyuchoyi sirovini v protsesi yih virobnitstva ta zberigannya [Formation of quality of candied fruits from carotene-containing raw materials in the process of their production and storage]*. Avtoreferat disertatsiyi na zdobuttya naukovoogo stupenya kandidata tehnicnih nauk [Abstract of the dissertation for the degree of candidate of technical sciences], Harkiv, 2005.
17. Rayhel N.Z., Alekseeva N.V., Dzhayshibekov G.Z., Kaypova Zh.N. Sposobyi proizvodstva tsukatov [Methods for the production of candied fruits]. *Mezhdunarodnyy zhurnal prikladnykh i fundamentalnykh issledovaniy [International Journal of Applied and Basic Research]*, 2017, 2-2, 168-171.
18. Muzzaffar S., Baba W. N., Nazir N., Masoodi F. A., Bhat M. M., Bazaz R. Effect of storage on physicochemical, microbial and antioxidant properties of pumpkin (Cucurbita moschata) candy. *Cogent Food & Agriculture*, 2016, no. 2 (1), 13 p., doi:10.1080/23311932.2016.1163650.
19. Stepanova N. Yu. Tehnologicheskaya otsenka proizvodstva tsukatov iz morkovi, svyoklyi i tyikvyi [Technological assessment of candied fruit production from carrots, beets and pumpkins]. *Protessyyi i appa-raty pischevykh proizvodstv [Processes and devices of food production]*, 2015, no. 2, p. 175–176.
20. Nambi V. E., Gupta R. K., Kumar, S., Sharma P. C. Degradation kinetics of bioactive components, antioxidant activity, colour and textural properties of selected vegetables during blanching. *Journal of food science and technology*, 2016, 53(7), p. 3073-3082, doi:10.1007/s13197-016-2280-2.
21. Aktas T., Fujii S., Kawano Y., Yamamoto S. Effects of pretreatments of sliced vegetables with trehalose on drying products. *Food and Bioproducts Processing*, 2007, no. 85 (3), p. 178–183, doi: 10.1205/fbp07037.
22. Sosa N., Salvatori D. M., Schebor C. Physico-chemical and mechanical properties of apple discs subjected to osmotic dehydration and different drying methods. *Food and Bioprocess Technology*, 2012, no. 5 (5), p. 1790–1802, doi: 10.1007/s11947-010-0468-4.
23. Osorio C., Franco M. S., Castano M. P., Gonzalez-Miret M. L., Heredia F. J., Morales A. L. Color and flavour changes during osmotic dehydration of fruits. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 2007, no. 8 (3), p. 353–359, doi: 10.1016/j.ifset.2007.03.009.
24. Chottamom P., Kongmanee R., Manklang C., Soponronnarit S. Effect of osmotic treatment on drying kinetics and antioxidant properties of dried mulberry. *Drying Technology*, 2012, no. 30, p. 80–87, doi: 10.1080/07373937.2011.625461.
25. Pavlov L. V., Golubkina N. A., Shilo L. M., Baranova E. V., Himich G. A. Tsukatyi iz tyikvyi, tehnologiya ih prigotovleniya i standart [Candied pumpkin, the technology of their preparation and standard]. *Ovoschi Rossii [Vegetables of Russia]*, 2017, no. 1, p. 39–41, doi: 10.18619/2072-9146-2017-1-39-41.
26. Kulczyński B., Gramza-Michałowska A. The Profile of Carotenoids and Other Bioactive Molecules in Various Pumpkin Fruits (Cucurbita maxima Duchesne) Cultivars. *Molecules*, 2019, no. 24(18), 3212, 19 p., doi: 10.3390/molecules24183212.
27. Zinash A., Woldetsadik K. Effect of accessions on the chemical quality of fresh pumpkin. *African Journal of Biotechnology*, 2013, №12(51), P. 7092–7098, doi: 10.5897/AJB10.1751.
28. Dubinina A., Letuta T., Tomashevskaya R. Porivnyalna otsinka yakosti gospodarsko-botanichnih sortiv garbuza [Comparative assessment of the quality of economic and botanical varieties of pumpkin]. *Tovari i rinky [Goods and markets]*, 2011, no.1, p. 132–139.
29. Biesiada A., Nawirska A., Kucharska A., Sokół-Lętowska A. The effect of nitrogen fertilization methods on yield and chemical composition of pumpkin (Cucurbita maxima) fruits before and after storage. *Vegetable Crops Research Bulletin*, 2009, no. 70, p. 203–211, doi: 10.2478/v10032-009-0020-0.
30. Biesiada A., Nawirska A., Kucharska A., Sokół-Lętowska A. Chemical composition of pumpkin fruit depending on cultivar and storage. *Ecological Chemistry and Engineering. A*, 2011, no. 18(1), p. 9–18.
31. Bermejo A., Llosá M. J., Cano A. Analysis of bioactive compounds in seven citrus cultivars. *Food Science and Technology International*, 2011, no. 17 (1), p. 55–62, doi: 10.1177/1082013210368556.
32. Shen Y., Jia L. N., Honma N., Hosono T. Beneficial effects of cinnamon on the metabolic syndrome, inflammation, and pain, and mechanisms underlying these effects – a review. *Journal of traditional and complementary medicine*, 2012, no. 2 (1), p. 27–32, doi:10.1016/s2225-4110(16)30067-0.
33. Serdyuk M. E., Priss O. P., Gaprindashvili N. A., Zdorovtseva L. M., Suharenko O. I., Ivanova I. E. *Doslidniitskiy praktikum. Chastina 1. Metodi doslidzhennya plodoovo-chevoyi ta yagidnoyi produktsiyi [Research workshop. Part 1. Methods of research of fruit and vegetable and berry products]*. Melitopol: Vidavnicho-pollgrafichnyi tsentr «Lyuks», 2020, 370 p.
34. Sedov E. N., Makarkina M. A., Serova Z. M. Variabel-nost biokhimicheskogo sostava yablok i vozmozhnosti ego uluchsheniya putem selektsii [Variability of the biochemical composition of apples and the possibility of improving it by selection]. *Agrarniy vestnik Urala [Agrarian Bulletin of the Urals]*, 2009, no. 6 (60), p. 44–47.

Відомості про авторів (About authors)

Прісс Олеся Петрівна – доктор технічних наук, професор, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, завідувач кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи; м. Мелітополь, Україна; ORCID: 0000-0002-6395-4202; e-mail: olesyapriiss@gmail.com

Olesia Priss – Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Professor Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Head of Department of Food Technology and Hotel and Restaurant Business, Melitopol, Ukraine; ORCID: 0000-0002-6395-4202; e-mail: olesyapriss@gmail.com

Сердюк Марина Єгорівна – доктор технічних наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, професор кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, м. Мелітополь, Україна; ORCID: 0000-0002-6504-4093. e-mail: kowtun.marina@gmail.com

Marina Serdyuk – Doctor of Technical Sciences (D. Sc.), Associate Professor, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Professor of Department of Food Technology and Hotel and Restaurant Business, Melitopol, Ukraine, ORCID: 0000-0002-6504-4093. e-mail: kowtun.marina2013@gmail.com.

Жукова Валентина Федорівна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, доцент кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, м. Мелітополь, Україна; ORCID: 0000-0002-1963-659X; e-mail: zhuzhuvf@gmail.com

Valentina Zhukova – Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Associate Professor of Department of Food Technology and Hotel and Restaurant Business, Melitopol, Ukraine; ORCID: 0000-0002-1963-659X; e-mail: zhuzhuvf@gmail.com

Сухаренко Олена Іванівна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, доцент кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, м. Мелітополь, Україна; ORCID:0000-0002-7875-1766. e-mail: suharenkoelena14@mail.com

Olena Sukharenko – Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Associate Professor of Department of Food Technology and Hotel and Restaurant Business, Melitopol, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7875-1766. e-mail: suharenkoelena14@mail.com.

Коляденко Вікторія Вікторівна - Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, старший викладач кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, м. Мелітополь, Україна; ORCID:0000-0002-0949-1374; e-mail: vik-sol@ukr.net

Viktoriya Kolyadenko - Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Senior Lecturer of Department of Food Technology and Hotel and Restaurant Business, Melitopol, Ukraine; ORCID:0000-0002-0949-1374; e-mail: vik-sol@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Прісс О. П., Сердюк М. Є., Жукова В. Ф. Сухаренко О. І., Коляденко В. В. Гарбузові цукати – ласощі з функціональними властивостями. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. - 5. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.15.

Please cite this article as:

Priss O., Serdyuk M., Zhukova V., Sukharenko O., Koliadenko V. Candied pumpkins – a delicacy with functional properties. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. - 5, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.15.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Прісс О. П., Сердюк М. Е., Жукова В. Ф. Сухаренко Е. И., Коляденко В. В. Тыквенные цукаты – лакомство с функциональными свойствами. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. - 5. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.15.

АННОТАЦІЯ Тыквенные овощи обладают различными функциональными свойствами. Однако, глубокая переработка обычно сопровождается потерей витаминов и деградацией ценных фитонутриентов. Тыквенные цукаты предусматривают минимальную переработку сырья и являются полезной альтернативой конфетам и другим кондитерским изделиям. Цель работы заключалась в усовершенствовании технологии производства тыквенных цукатов со сбалансированными вкусоароматическими характеристиками и высоким содержанием каротиноидов. Для изготовления цукатов использовали тыкву двух видов и сортов: «Мускат де Прованс» (*Cucurbita moschata* Duch) и «Ждана» (*Cucurbita maxima* Duch). Для коррекции вкусоароматических показателей, использовали апельсины и корицу, которые отличаются ценным химическим составом. Технологическая схема предусматривала следующие операции: подготовка и измельчение тыквы на кусочки; пересыпка сахаром с одновременным добавлением компонентов по обогащенной рецептуре; выдержка 8 ... 10 ч до выделения сока; отделение полученного сиропа; нагрев сиропа ($t=102\pm1$ °C); заливка горячим сиропом кусочков тыквы; охлаждение ($t=35\pm5$ °C); отделение сиропа; повторный нагрев и заливка горячим сиропом кусочков тыквы; охлаждение и отделение сиропа; подсушивание цукатов ($t=45\pm5$ °C); пересыпка сахарной пудрой. В процессе исследований, по общепринятым методикам, определяли общее содержание сухих веществ, содержание сухих растворимых веществ, пектиновых веществ, содержание сахаров, каротиноидов, аскорбиновой кислоты и титруемую кислотность. Тыква сорта Мускат де Прованс существенно проигрывает сорту Ждана по количеству сухих и сухих растворимых веществ, однако отличается высоким содержанием каротиноидов, что важно для получения продукции функционального назначения. Установлено, что примененная технология тыквенных цукатов позволяет получить продукт высокого качества со сбалансированными вкусоароматическими характеристиками с высоким количеством каротиноидов и аскорбиновой кислоты. Содержание сухих веществ в готовых цукатах составляет 80,02 ... 83,96%. Полученная продукция, в зависимости от сорта тыквы и рецептуры, содержит от 8,05 до 16,55 мг/100 г каротиноидов и 10,47 ... 14,86 м/100 г аскорбиновой кислоты.

Ключевые слова: тыква; цукаты; функциональные свойства; химический состав; органолептические показатели; технология

Надійшла (received) 27.04.2020

УДК 664.8.037.53

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.16

ЗМІНИ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ФРУКТОВОЇ ТА ЯГІДНОЇ СИРОВИНИ ПРОТЯГОМ КРІОГЕННОГО ЗБЕРІГАННЯ

М. Є. СЕРДЮК*, О. В. ГРИГОРЕНКО, О. І. СУХАРЕНКО, В. В. КОЛЯДЕНКО

кафедра харчових технологій та готельно-ресторанної справи, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, м. Мелітополь, УКРАЇНА

*e-mail: kowtun.marina2013@gmail.com

АНОТАЦІЯ Дослідження присвячені вивченню зміни функціональних властивостей фруктової та ягідної сировини протягом криогенного зберігання. Мета роботи полягала у дослідженні змін основних показників хімічного складу свіжої та замороженої фруктової та ягідної сировини, і обґрунтуванні можливості подальшого сумісного її використання у замороженому напівфабрикаті. У якості предмета дослідження обрані ягоди журавлини та плоди апельсину. Під час експерименту перевіряли якість свіжих ягід і фруктів, далі їх сортували за ступенем стиглості, калібрували, мили, видаляли залишкову вологу після миття. Потім сировину подрібнювали до стану пюре, пакували у пластикові креманки з кришками по 35 ± 2 г. Заморожували у морозильній камері за температури -30°C . Заморожування вважалося завершеним після досягнення у геометричному центрі дослідного зразка температури -18°C . Подальше зберігання виконували у морозильній шафі за температури -18°C протягом 6 місяців. В свіжій та замороженій сировині були визначені вміст цукрів – фериціанідним методом, кислот – титрометричним методом, аскорбінової кислоти – йодометричним методом, фенольних речовин – за реактивом Фоліна-Деніса. Встановлено, що після заморожування та криогенного зберігання втрати аскорбінової кислоти у ягодах журавлини були у 5 разів, а цукрів у 9 разів вищими ніж у плодів апельсину. Натомість, ягоди журавлини характеризувалися у 8 разів меншими втратами фенольних речовин. Визначено, що протягом низькотемпературного зберігання фруктової та ягідної сировини відбувалося наростання її титрованої кислотності: у ягід журавлини – на 25,8 %, у плодів апельсину – на 1,3 %. Низьке значення цукрово-кислотного індексу, який визначає смакові властивості готового продукту, свідчить про неможливість використання пюре з ягід журавлини у чистому вигляді. Отже, поєднання обраних компонентів у замороженій суміші буде обґрунтованим та доцільним, з погляду на різну швидкість руйнування аскорбінової кислоти та цукрів. Істотні втрати цих компонентів ягодами журавлини будуть компенсовані кращою їх збереженістю у плодах апельсину. Поєднання обраних компонентів у замороженій суміші сприятиме покращенню її органолептичних показників та збереженню функціональних властивостей.

Ключові слова: журавлина; апельсин; заморожування; криогенне зберігання; функціональні властивості; вітамін С; фенольні речовини; цукри; кислоти

CHANGES IN FUNCTIONAL PROPERTIES OF FRUIT AND BERRY RAW MATERIALS DURING CRYOGENIC STORAGE

M. SERDYUK, O. HRYHORENKO, O. SUKHARENKO, V. KOLYADENKO

Department of Food Technologies and Hotel and Restaurant Business, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Melitopol, UKRAINE

ABSTRACT The researchers are devoted to the study of changes in the functional properties of fruit and berry raw materials during cryogenic storage. The purpose of the study was to investigate the changes in the basic parameters of the chemical composition of fresh and frozen fruit and berry raw materials, and to substantiate the possibility of further joint use in the frozen semi-finished product. Cranberry berries and orange fruits were selected as the subject of study. During the experiment, the quality of fresh berries and fruits was checked, then they were sorted according to the degree of ripeness, calibrated, milled, and the residual moisture was removed after washing. Then the raw material was ground to a puree state, packed in plastic flakes with lids of 35 ± 2 g. and frozen in a freezer at -30°C . The freezing was considered complete after reaching -18°C at the geometric center of the test specimen. Further storage was performed in a freezer at -18°C for 6 months. The content of sugars was determined in fresh and frozen raw materials by ferricyanide method, acids – by titrometric method, ascorbic acid – by iodometric method, phenolic substances – according to the Folin-Denis reagent. It was determined that the average content of ascorbic acid in fresh cranberries was 14.3 mg / 100 g, and in oranges was 4.2 times higher. During freezing and subsequent cryogenic storage, the total loss of ascorbic acid in cranberry berries was 56%, in orange fruits - only 11%. Fresh cranberries and orange fruits were found to have high acidity. During low-temperature storage of fruit and berry raw materials, its titrated acidity increased: in cranberry berries - by 25.8%, in orange fruits - by 1.3%. The total sugar content of fresh cranberry berries was 3.9%, in the orange fruit it was 2 times higher. After freezing and six months of storage of cranberries the total loss of sugar was 55%, and in the fruits of orange - only 6%. Instead, cranberry berries were 8 times less likely to lose phenolic substances. The low value of the sugar-acid index, which determines the taste properties of the finished product, indicates the impossibility of using cranberry puree. Therefore, the combination of the selected components in the frozen mixture will be justified and appropriate, given the different rate of destruction of ascorbic acid and sugars. Significant losses of these components by cranberry berries will be offset by their better preservation in the fruits of

orange. The combination of the selected components in the frozen mixture will improve its organoleptic characteristics and preserve its functional properties.

Keywords: *cranberry; orange; freezing; cryogenic storage; functional properties; Vitamin C; phenolic substances; sugars; acids*

Вступ

Фрукти і ягоди є основним джерелом вітамінів, харчових волокон, мінеральних речовин. Саме значний вміст біологічно активних речовин визначає їх високу харчову та біологічну цінність. Ці природні компоненти дуже м'яко впливають на організм людини і не викликають побічної дії. З погляду на це, фруктово-ягідна продукція повинна стати неодмінною складовою нашого щоденного раціону [1,2].

Згладжувати сезонні коливання у споживанні фруктів і ягід дають можливість продукти їх переробки. У зв'язку з цим вельми актуальною з точки зору поліпшення структури харчування населення стає розробка науково обґрунтованих способів і технологій виробництва широкого асортименту харчової продукції з фруктів і ягід, яка має функціональні властивості.

Сучасні консервні підприємства виробляють величезну кількість плодово-ягідної продукції, яка консервована тепловою стерилізацією. Проте, загальновідомим та все ще не вирішеним залишається питання втрати біологічної цінності сировини внаслідок руйнування біологічно-активних речовин під впливом високої температури [3,4].

Використовуючи сушені фрукти та ягоди, потрібно завжди пам'ятати, що під час сушіння вони втрачають майже 90% вітамінів, і в цьому відношенні їх ні як не можна порівнювати зі свіжими [5,6].

Результати досліджень вітчизняних та іноземних фахівців свідчать про те, що одним з найбільш ефективних способів консервування та зберігання рослинного сировини є її кріообработка. Заморожені фрукти та ягоди не містять консервантів, оскільки заморожуються відразу після збирання врожаю, максимально зберігаючи вітаміни [7–11].

В науковій літературі представлено багато інформації щодо таких технологій заморожених функціональних продуктів, як різні плодово - ягідні та плодово - овочеві суміші, вироблені із замороженої або свіжої рослинної сировини, салати швидкозаморожені і плодово - ягідне морозиво, тощо [12–15].

Розвиток і широке впровадження інноваційних технологій заморожування та подальшого низькотемпературного зберігання плодово-ягідної сировини сприятимуть вирішенню проблеми збалансованого харчування населення, зниженню рівня захворювань, покращенню якості життя протягом цілого року. З огляду на функціональні властивості, потенціал використання фруктів та ягід для виробництва заморожених напівфабрикатів залишається невичерпним. Розширення асортименту заморожених продуктів із плодово-ягідної сировини, збереження її

функціональних властивостей та смакових якостей є актуальним науково-технічним завданням.

Слід зазначити, що створення багатокомпонентних функціональних заморожених продуктів із заданим комплексом корисних властивостей є доволі складним процесом, що потребує забезпечення найбільш повної збалансованості сировини за значною кількістю компонентів біохімічного складу. Саме тому правильний вибір плодово-ягідної сировини є найважливішим етапом у вирішенні цієї проблеми.

Мета роботи

Мета роботи полягає у дослідженні змін основних показників хімічного складу свіжої та замороженої фруктової та ягідної сировини, і обґрунтуванні можливості подальшого сумісного її використання у замороженому напівфабрикаті.

Викладення основного матеріалу

Предметом дослідження були обрані ягоди журавлини та плоди апельсину.

Інтерес до журавлини обумовлений тим, що вона містить велику кількість функціональних компонентів та входить до складу корисних для здоров'я людини рослин, позитивно впливає на серцево-судинну систему, сприяє зниженню холестерину в крові, має унікальний ефект у лікуванні та профілактиці урологічних захворювань. Антиоксидантні, особливо поліфенольні компоненти журавлини, за попередніми даними, інгібують ріст ракових і пухлинних клітин [16,17].

Апельсин – надзвичайно корисний плід, який має багатий вітамінно-мінеральний склад. У ньому містяться: бета-каротин, фолієва кислота, вітаміни групи В, А, В1, В2, В5, В6, С, Н і РР, а також необхідні організму мінеральні речовини: калій, кальцій, магній, цинк, залізо, молібден, фосфор і натрій. В апельсині, особливо у білій частині шкірки, містяться пектини, які сприяють посиленню моторики кишківника та зменшення гнильних процесів. Апельсини є прекрасною профілактикою авітамінозу, зміцнюють імунітет, знижують рівень холестерину в крові, благотворно впливають на діяльність серцево-судинної системи. Апельсиновий сік, як і весь плід в цілому, має протизапальну та антимікробну дію і тонізуючий ефект, рекомендований при захворюваннях нервової системи, подагрі і для відновлення після перенесених вірусних захворювань і переломів, так як сприяє регенерації кісткової тканини [18]. У харчовій промисловості широко використовується апельсин задля виготовлення джемів, варення та мармеладу. Популярним також є виробництво апельсинового пюре, як наповнювача

для подальшого його додавання при виготовленні різноманітних йогуртів, кондитерських виробів, тощо [19].

Під час експерименту перевіряли якість свіжих ягід і фруктів, далі їх сортували за ступенем стиглості, калібрували, мили, видаляли залишкову вологу після миття. Потім сировину подрібнювали на блендері до стану пюре, пакували у пластикові креманки з кришками по 35 ± 2 г. Заморожували у морозильній камері за температури -30°C . Заморожування вважалося завершеним після досягнення у геометричному центрі дослідного зразка температури -18°C . Подальше зберігання виконували у морозильній шафі за температури -18°C протягом 6 місяців. В свіжій та замороженій сировині були визначені вміст цукрів, титрованих кислот, аскорбінової кислоти, фенольних речовин. Дослідження проводили за стандартними методиками: визначення вмісту аскорбінової кислоти – йодометричним методом, вмісту фенольних речовин – за реактивом Фоліна-Деніса, вмісту цукрів – фериціанідним методом, кислотність – титриметричним методом [20].

Результати та їх обговорення

Функціональні властивості плодово-ягідної сировини визначаються, у першу чергу, наявністю в них вітамінів і вітаміноподібних речовин.

Вітамін С підвищує стійкість організму до негативних зовнішніх впливів та інфекцій, підтримує міцність кровоносних судин, позитивно впливає на функції нервової та ендокринної систем, регулює обмін холестерину, сприяє засвоєнню заліза. Він повинен надходити до нашого організму щодня, тому що запаси його малі, а витрати на важливі процеси життєдіяльності безперервні. Фізіологічна потреба вітаміну С для дорослих - 90 мг/добу, для дітей – від 30 до 90 мг/добу залежно від віку [21].

Експериментальні дані свідчать, що низькотемпературний шок (-30°C) та подальше кріогенне зберігання (-18°C) супроводжувалися деструкцією аскорбінової кислоти (рис. 1).

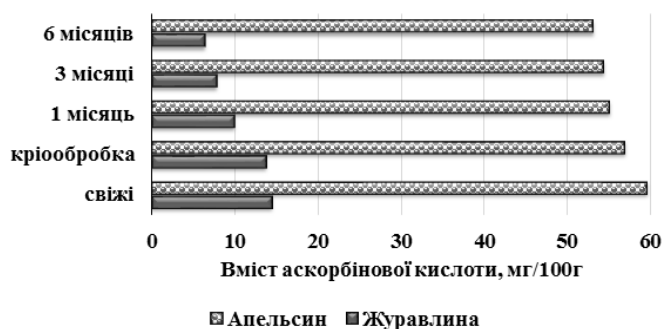


Рис. 1 – Вміст аскорбінової кислоти у свіжих ягодах журавлини та плодах апельсину, після заморожування та протягом кріогенного зберігання.

Середній вміст аскорбінової кислоти у свіжих ягодах журавлини був невисоким та становив 14,3 мг / 100 г. Відповідно, початковий вміст аскорбінової кислоти у апельсинах знаходився на рівні 59,642 мг / 100 г, тобто був у 4,2 рази вищим. Вміст аскорбінової кислоти у досліджуваній сировині знизився безпосередньо після заморожування на 5 %, і надалі зменшувався, протягом усього періоду зберігання. Загальний відсоток втрат вітаміну С від початкового рівня в ягодах журавлини становив 56%, натомість у плодах апельсину – всього 11%. Таке зниження аскорбінової кислоти у замороженій рослинній сировині може бути пов'язане зі порушенням ферментативного окисно-відновного процесу. Заморожування різко знижує активність ферментів. Під час дефростації окислювальні ферменти відновлюють активність значно швидше, ніж відновлювальні. Внаслідок чого аскорбінова кислота окислюється такими ферментами, як аскорбатоксидаза та пероксидаза [22]. У свою чергу, доступ кисню, що посилюється внаслідок деструктивних змін у рослинних тканинах, також сприяє зниженню вмісту вітаміну С.

Отже, поєднання обраних компонентів у замороженій суміші буде обґрунтованим та доцільним, з погляду на різну швидкість руйнування аскорбінової кислоти. Істотні втрати вітаміну С ягодами журавлини будуть компенсовані кращою його збереженістю у плодах апельсину.

Вміст фенольних речовин у дослідженій фруктово-ягідній сировині протягом тривалого кріоскопічного зберігання також зазнавав кількісних змін (табл. 1).

Таблиця 1 – Зміни вмісту фенольних речовин за етапами дослід, $\bar{x} \pm s\bar{x}$, n=5

Етапи дослід	Фенольні речовини, мг/100г	
	журавлина	апельсин
Свіжі	637,21±1,02	584,37±1,53
Кріообробка	611,31±2,11	465,21±1,42
1 місяць	601,23±0,98	401,32±1,37
3 місяці	600,65±1,12	395,12±2,22
6 місяців	612,31±2,05	402,32±0,19

Результатами встановлено, що динаміка змін вмісту фенольних речовин за низькотемпературного заморожування та подальшого зберігання ягід журавлини та плодів апельсину була різною. Максимальні втрати фенольних речовин встановлені під час холодної обробки плодів апельсину: безпосередньо після заморожування кількість фенольних речовин знизилась на 20,4%, протягом подальшого зберігання за температури -18°C – ще на 15%, і тільки наприкінці зберігання зафіксоване їх незначне (на 1,8 %) зростання. Загальні втрати фенольних речовин при заморожуванні та зберіганні плодів апельсину становили 31,15 %.

При заморожуванні та криогенному зберіганні ягід журавлини зафіксована дещо інша тенденція. Після заморожування та першого місяця зберігання були зафіксовані незначні (на рівні 5,7 %) втрати фенольних речовин. Процес подальшого низькотемпературного зберігання характеризувався стабілізацією вмісту фенолів, і в останні місяці – їх незначним (на 2 %) зростанням. Таке зростання фенольних речовин, можливо, пов'язано з гідролізом олігомерних форм, а також з накопиченням фенольних речовин за рахунок ферментативних процесів.

Титрована кислотність характеризує загальний вміст органічних кислот та їх кислих солей і виступає важливим показником харчової та біологічної цінності фруктово-ягідної сировини. Крім того, вміст органічних кислот також тісно прямо корелює зі збереженням біологічно активної форми аскорбінової кислоти у сировині.

Свіжі ягоди журавлини та плоди апельсину характеризувалися підвищеною кислотністю (рис. 2). Отримані дані свідчать, що протягом низькотемпературного зберігання фруктової та ягідної сировини відбувалося наростання її титрованої кислотності.

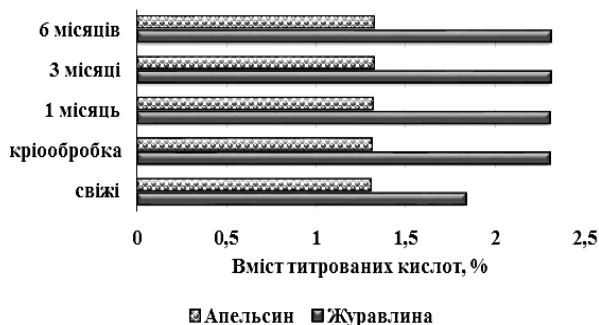


Рис. 2 – Динаміка титрованих кислот при заморожуванні та криогенному зберіганні плодово-ягідної сировини.

Середній вміст титрованих кислот у свіжих ягодах журавлини становив 1,84 %, а у плодах апельсину 1,302 %. Після заморожування спостерігалось зростання титрованої кислотності журавлини на 25,5 %, а апельсину – всього на 1 %. Протягом подальшого зберігання також зафіксоване повільне наростання титрованої кислотності. Загалом, титрована кислотність ягід журавлини після заморожування та 6 місяців зберігання зросла на 25,8 %, а плодів апельсину – всього на 1,3 %. Таке зростання може бути пов'язано з тим, що під час дефростації плодово-ягідної сировини окисно-відновні процеси зсуваються у бік окисних реакцій та суттєво впливають на її якість. Інтенсивність впливу визначається ступеню активності оксидоредуктаз, серед яких особливе місце займають поліфенолоксидаза, аскорбатоксидаза та пероксидаза.

Цукри, разом з титрованими кислотами, обумовлюють смакові якості рослинних продуктів. Загальна цукристість свіжих ягід журавлини була не високою, та знаходилась на рівні майже 3,9 % (рис. 3).

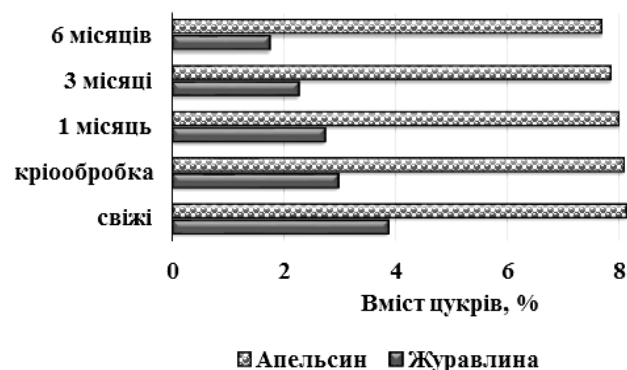


Рис. 3 – Динаміка цукрів при заморожуванні та криогенному зберіганні плодово-ягідної сировини.

Що стосовно плодів апельсину, то вони мали більшу цукристість – на рівні 8,16 %. Після заморожування вміст цукрів знижувався як у ягодах журавлини, так і у плодах апельсину. У першому випадку зниження становило 23 %, а в другому – всього 0,5 %. Протягом низькотемпературного зберігання зафіксоване подальше зниження вмісту цукрів.

Загальні втрати цукрів після заморожування та шести місяців зберігання ягід журавлини становили 55 %, а плодів апельсину – всього 6 %.

Смакові якості фруктової та ягідної продукції визначаються відношенням вмісту цукрів до титрованих кислот, так званим цукрово-кислотним індексом (ЦКІ).

Під час заморожування та подальшого зберігання, внаслідок зниження вмісту цукрів та наростання кислотності об'єктивний показник смаку зменшувався і смак сировини ставав більш кислим. Значення даного показника у ягодах журавлини та плодах апельсину наведені на рисунку 4.

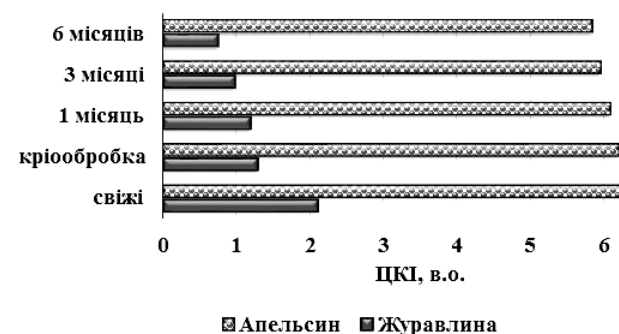


Рис. 4 – Динаміка ЦКІ при заморожуванні та криогенному зберіганні плодово-ягідної сировини.

Наведені результати констатують, що максимальне зниження ЦКІ спостерігається у ягід

журавлини. Подібне зниження даного показника свідчить про суттєве погіршення смаку ягід під час заморожування та тривалого криогенного зберігання.

Таким чином, біохімічні особливості плодово-ягідної сировини суттєво позначаються на якості готового продукту.

Висновки

Встановлено, що після заморожування та криогенного зберігання втрати аскорбінової кислоти у ягодах журавлини були у 5 разів, а цукрів у 9 разів вищими ніж у плодів апельсину.

Визначено, що ягоди журавлини характеризувалися у 8 разів меншими втратами фенольних речовин.

Низьке значення цукрово-кислотного індексу, який визначає смакові властивості готового продукту, свідчить про неможливість використання пюре з ягід журавлини у чистому вигляді.

Поєднання обраних компонентів у замороженій суміші сприятиме покращенню її органолептичних показників та збереженню функціональних властивостей.

Список літератури

- Шемета О. О., Дожук К. М. Функціональне харчування – новий підхід до здорового способу життя: *Ліки України*, 2015. № 1(186). С. 24–27.
- Lobo V., Patil A., Phatak A., Chandra N. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy reviews*. 2010. V. 4(8). 118. doi: 10.4103/0973-7847.70902.
- Ma T. J., Lan W. S. Effects of non-thermal plasma sterilization on volatile components of tomato juice. *International journal of environmental science and technology*. 2015. V. 12(12). P. 3767–3772. doi: 10.1007/s13762-015-0796-z.
- Khandpur P., Gogate P. R. Evaluation of ultrasound based sterilization approaches in terms of shelf life and quality parameters of fruit and vegetable juices. *Ultrasonics sonochemistry*. 2016. № 29. P. 337–353. doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.10.008.
- Ndawula J., Kabasa J. D., Byaruhanga Y. B. Alterations in fruit and vegetable β -carotene and vitamin C content caused by open-sun drying, visqueen-covered and polyethylene-covered solar-dryers. *African health sciences*. 2004. № 4(2). P. 125–130.
- Smith J. C., Biasi W. V., Holstege D., Mitcham E. J. Effect of Passive Drying on Ascorbic Acid, α -Tocopherol, and β -Carotene in Tomato and Mango. *Journal of food science*. 2018. № 83 (5). P. 1412–1421. doi: 10.1111/1750-3841.14118.
- Белінська С., Орлова Н., Китаєв О. Особливості кристалотворення під час заморожування суниць. *Товари і ринки*. 2008. № 2. С. 74–80.
- Сімахіна Г. О., Халапсіна С. В. Особливості заморожування ягід з ніжною текстурою. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2015. Т. 21. № 4. С. 198–205.
- Шегельман И. Р., Васильев А. С., Смирнова Л. О. Перспективные технологии охлаждения и замораживания пищевых продуктов. *Новое слово в науке: стратегии развития*. 2018. С. 112–114.
- Xin Y., Zhang M., Xu B., Adhikari B., Sun J. Research trends in selected blanching pretreatments and quick freezing technologies as applied in fruits and vegetables: A review. *International Journal of Refrigeration*. 2015. № 57. P. 11–25. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.04.015.
- Bilbao-Sainz C., Sinrod A., Powell-Palm M., Dao L. T., Takeoka G. R., Williams T. G., Wood D. F., Ukpai G., Aruda J., Bridges D. F., Wu V. C., Rubinsky B., McHugh T. H. Preservation of sweet cherry by isochoric (constant volume) freezing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*. 2018. № 52. P. 108–115. doi: 10.1016/j.ifset.2018.10.016.
- Kopjar M., Tiban N. N., Pilizota V., Babic J. Stability of anthocyanins, phenols and free radical scavenging activity through sugar addition during frozen storage of blackberries. *Journal of Food Processing and Preservation*. 2009. № 33. P. 1–11. doi: 10.1111/j.1745-4549.2008.00244.x.
- Dziedzinska R., Makovcova J., Kaevska M., Slany M., Babak V., Moravkova M. Nontuberculous mycobacteria on ready-to-eat, raw and frozen fruits and vegetables. *Journal of food protection*. 2016. № 79(8). P. 1452–1456. doi: 10.4315/0362-28X.JFP-16-030.
- Little C. L., Gillespie I. A. Prepared salads and public health. *Journal of Applied Microbiology*. 2008. № 105(6). P. 1729–1743. doi: 10.1111/j.1365-2672.2008.03801.x.
- Lima G. B., Lucas M. R., Rosa C. A., Gomes F. C. Analysis of the microbial quality of commercialized tropical fruit ice cream in Belo Horizonte, Brazil. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*. 2016. № 22(2). P. 79–86.
- Michalska A., Wojdylo A., Honke J., Ciska E., Andlauer W. Drying-induced physico-chemical changes in cranberry products. *Food chemistry*. 2018. № 240. P. 448–455. doi: 10.1016/j.foodchem.2017.07.050.
- Grace M. H., Massey A. R., Mbeunkui F., Yousef G. G., Lila M. A. Comparison of health-relevant flavonoids in commonly consumed cranberry products. *Journal of food science*. 2012. № 77(8). P. 176–183. doi: 10.1111/j.1750-3841.2012.02788.x.
- Paul D. K., Shaha R. K. Nutrients, vitamins and minerals content in common citrus fruits in the northern region of Bangladesh. *Pak J Biol Sci*. 2004. № 7(2). P. 238–242. doi:10.3923/pjbs.2004.238.24.
- Tumpanuvatr T., Jittanit W. The temperature prediction of some botanical beverages, concentrated juices and purees of orange and pineapple during ohmic heating. *Journal of food engineering*. 2012. № 113(2). P. 226–233. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.05.044.
- Сердюк М. Є. та ін. *Дослідницький практикум. Ч. 1. Методи дослідження плодоовочевої та ягідної продукції: підручник*. Мелітополь: Видавничо-поліграфічний центр «Люкс», 2020. 370 с.
- Oguntibeju O. O. The biochemical, physiological and therapeutic roles of ascorbic acid. *African Journal of Biotechnology*. 2008. № 7(25).
- Gonçalves E. M., Abreu M., Brandao T. R., Silva C. L. Degradation kinetics of colour, vitamin C and drip loss in frozen broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *Italica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions. *International Journal of Refrigeration*. 2011. № 34(8). P. 2136–2144. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2011.06.006.

References (transliterated)

1. Shemeta O. O., Dozhuk K. M. Funktsionalne kharchuvannia – novyi pidkhid do zdorovoho sposobu zhyttia [Functional nutrition - a new approach to a healthy lifestyle] *Liky Ukrainy [Medicines of Ukraine]*, 2015, no. 1(186), p. 24–27.
2. Lobo V., Patil A., Phatak A., Chandra N. Free radicals, antioxidants and functional foods: Impact on human health. *Pharmacognosy reviews*, 2010, V. 4(8), 118, doi:10.4103/0973-7847.70902.
3. Ma T. J., Lan W. S. Effects of non-thermal plasma sterilization on volatile components of tomato juice. *International journal of environmental science and technology*, 2015, V. 12(12), p. 3767–3772, doi: 10.1007/s13762-015-0796-z.
4. Khandpur P., Gogate P. R. Evaluation of ultrasound based sterilization approaches in terms of shelf life and quality parameters of fruit and vegetable juices. *Ultrasonics sonochemistry*, 2016, no. 29, p. 337–353, doi: 10.1016/j.ultsonch.2015.10.008.
5. Ndawula J., Kabasa J. D., Byaruhanga Y. B. Alterations in fruit and vegetable β -carotene and vitamin C content caused by open-sun drying, visqueen-covered and polyethylene-covered solar-dryers. *African health sciences*, 2004, no. 4(2), p. 125–130.
6. Smith J. C., Biasi W. V., Holstege D., Mitcham E. J. Effect of Passive Drying on Ascorbic Acid, α - Tocopherol, and β - Carotene in Tomato and Mango. *Journal of food science*, 2018, no. 83(5), p. 1412–1421, doi:10.1111/1750-3841.14118
7. Belinska S., Orlova N., Kytaiev O. Osoblyvosti krystaloutvorennia pid chas zamorozhuvannia sunyts [Features of crystal formation during freezing of strawberries]. *Tovary i rynky [Goods and markets]*, 2008, no. 2, p. 74–80.
8. Simakhina H. O., Khalapsina S. V. Osoblyvosti zamorozhuvannia yahid z nizhnoiui teksturoiu [Features of freezing berries with a delicate texture.]. *Naukovi pratsi Natsionalnoho universytetu kharchovykh tekhnolohii [Scientific works of the National University of Food Technologies]*, 2015, V. 21, no. 4, p. 198–205.
9. Shegelman I. R., Vasilyev A. S., Smirnova L. O. Perspektivnyye tekhnologii okhlazhdeniya i zamorazhivaniya pishchevykh produktov [Promising technologies for cooling and freezing food products]. *Novoye slovo v nauke: strategii razvitiya [A new word in science: development strategies]*, 2018, p. 112–114.
10. Xin Y., Zhang M., Xu B., Adhikari B., Sun J. Research trends in selected blanching pretreatments and quick freezing technologies as applied in fruits and vegetables: A review. *International Journal of Refrigeration*, 2015, no. 57, p. 11–25, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2015.04.015.
11. Bilbao-Sainz C., Sinrod A., Powell-Palm M., Dao L. T., Takeoka G. R., Williams T. G., Wood D. F., Ukpa G., Aruda J., Bridges D. F., Wu V. C., Rubinsky B., McHugh T. H. Preservation of sweet cherry by isochoric (constant volume) freezing. *Innovative Food Science and Emerging Technologies*, 2018, no. 52, p. 108–115, doi: 10.1016/j.ifset.2018.10.016.
12. Kopjar M., Tiban N. N., Pilizota V., Babic J. Stability of anthocyanins, phenols and free radical scavenging activity through sugar addition during frozen storage of blackberries. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2009, no. 33, p. 1–11, doi: 10.1111/j.1745-4549.2008.00244.x.
13. Dziedzinska R., Makovcova J., Kaevska M., Slany M., Babak V., Moravkova M. Nontuberculous mycobacteria on ready-to-eat, raw and frozen fruits and vegetables. *Journal of food protection*, 2016, no. 79(8), p. 1452–1456, doi: 10.4315/0362-28X.JFP-16-030.
14. Little C. L., Gillespie I. A. Prepared salads and public health. *Journal of Applied Microbiology*, 2008, no. 105(6), p. 1729–1743, doi: 10.1111/j.1365-2672.2008.03801.x.
15. Lima G. B., Lucas M. R., Rosa C. A., Gomes F. C. Analysis of the microbial quality of commercialized tropical fruit ice cream in Belo Horizonte, Brazil. *Journal of Agroalimentary Processes and Technologies*, 2016, no. 22(2), p. 79–86.
16. Michalska A., Wojdyło A., Honke J., Ciska E., Andlauer W. Drying-induced physico-chemical changes in cranberry products. *Food chemistry*, 2018, no 240, p. 448–455, doi: 10.1016/j.foodchem.2017.07.050.
17. Grace M. H., Massey A. R., Mbeunkui F., Yousef G. G., Lila M. A. Comparison of health-relevant flavonoids in commonly consumed cranberry products. *Journal of food science*, 2012, no. 77(8), p. 176–183, doi: 10.1111/j.1750-3841.2012.02788.x.
18. Paul D. K., Shaha R. K. Nutrients, vitamins and minerals content in common citrus fruits in the northern region of Bangladesh. *Pak J Biol Sci*, 2004, no. 7(2), p. 238–242, doi: 10.3923/pjbs.2004.238.242.
19. Tumpunuvatr T., Jittanit W. The temperature prediction of some botanical beverages, concentrated juices and purees of orange and pineapple during ohmic heating. *Journal of food engineering*, 2012, no. 113(2), p. 226–233, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2012.05.044.
20. Serdyuk M. Ye. and others. *Doslidnytskyi praktykum. Ch. 1. Metody doslidzhennia plodoovochevoi ta yahidnoi produktii: pidruchnyk [Research workshop. Part 1. Methods of research of fruit and vegetable and berry products: textbook]*, Melitopol: Vydavnycho-polihrafichnyi tsentr «Liuks», 2020. 370 p.
21. Oguntibeju O. O. The biochemical, physiological and therapeutic roles of ascorbic acid. *African Journal of Biotechnology*, 2008, no. 7(25).
22. Gonçalves E. M., Abreu M., Brandao T. R., Silva C. L. Degradation kinetics of colour, vitamin C and drip loss in frozen broccoli (*Brassica oleracea* L. ssp. *Italica*) during storage at isothermal and non-isothermal conditions. *International Journal of Refrigeration*, 2011, no. 34(8), p. 2136–2144, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2011.06.006.

Сведения об авторах (About authors)

Сердюк Марина Єгорівна – доктор технічних наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, професор кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, м. Мелітополь, Україна; ORCID: 0000-0002-6504-4093; e-mail: kowtun.marina@gmail.com

Marina Serdyuk – Doctor of Technical Sciences (Grand Ph.D.), Associate Professor, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Professor of Department of Food Technologies and Hotel and Restaurant Business, Melitopol, Ukraine, ORCID: 0000-0002-6504-4093; e-mail: kowtun.marina2013@gmail.com.

Григоренко Олена Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, доцент кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, м. Мелітополь, Україна; ORCID:0000-0002-2082-5822; e-mail: grigalena@ukr.net

Olena Hryhorenko – Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Associate Professor of Department of Food Technologies and Hotel and Restaurant Business, Melitopol, Ukraine; ORCID: 0000-0002-2082-5822; e-mail: grigalena@ukr.net.

Сухаренко Олена Іванівна – кандидат сільськогосподарських наук, доцент, Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, доцент кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, м. Мелітополь, Україна; ORCID: 0000-0002-7875-1766; e-mail: Suharenkoelena14@mail.com

Olena Sukhareenko – Candidate of Agricultural Sciences (Ph.D.), Associate Professor, Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Associate Professor of Department of Food Technologies and Hotel and Restaurant Business, Melitopol, Ukraine; ORCID: 0000-0002-7875-1766; e-mail: Suharenkoelena14@mail.com

Коляденко Вікторія Вікторівна – Таврійський державний агротехнологічний університет імені Дмитра Моторного, старший викладач кафедри харчових технологій та готельно-ресторанної справи, м. Мелітополь, Україна; ORCID: 0000-0002-0949-1374; e-mail: vik-sol@ukr.net

Viktoriia Kolyadenko – Dmytro Motornyi Tavria State Agrotechnological University, Senior Lecturer of Department of Food Technologies and Hotel and Restaurant Business, Melitopol, Ukraine; ORCID:0000-0002-0949-1374; e-mail: vik-sol@ukr.net.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Сердюк М. Є., Григоренко О. В., Сухаренко О. І., Коляденко В. В. Зміни функціональних властивостей фруктової та ягідної сировини протягом криогенного зберігання. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 6–3. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.16.

Please cite this article as:

Serdyuk M., Hryhorenko O., Sukhareenko O., Kolyadenko V. Changes in functional properties of fruit and berry raw materials during cryogenic storage. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 6–3, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.16.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Сердюк М. Е., Григоренко Е. В., Сухаренко Е. И., Коляденко В. В. Изменения функциональных свойств фруктового и ягодного сырья в течение криогенного хранения. *Вестник Национального технического университета «ХПИ». Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 6–3. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.16.

АННОТАЦІЯ Исследования посвящены изучению изменения функциональных свойств фруктового и ягодного сырья во время криогенного хранения. Цель работы заключалась в исследовании изменений основных показателей химического состава свежего и замороженного фруктового и ягодного сырья и обосновании возможности дальнейшего совместного его использования в замороженном полуфабрикате. В качестве предмета исследования выбраны ягоды клюквы и плоды апельсина. Во время эксперимента проверяли качество свежих ягод и фруктов, дальше их сортировали по степени зрелости, калибровали, мыли, удаляли остаточную влагу после мойки. Затем сырье измельчали до состояния пюре, паковали в пластиковые креманки с крышками по 35 ± 2 г. замораживали в морозильной камере при температуре -30°C . Замораживание считалось законченным после достижения в геометрическом центре опытного образца температуры -18°C . Дальнейшее хранение выполняли в морозильном шкафу при температуре -18°C в течение 6 месяцев. В свежем и замороженном сырье были определены содержание сахаров - феррицианидным методом, кислот - титрометрическим методом, аскорбиновой кислоты - йодометрическим методом, фенольных веществ - по реактивом Фолина-Дениса. Установлено, что после замораживания и криогенного хранения потери аскорбиновой кислоты в ягодах клюквы были в 5 раз, а сахаров в 9 раз выше, чем у плодов апельсина. В тоже время, ягоды клюквы характеризовались в 8 раз меньшими потерями фенольных веществ. Определено, что в течение низкотемпературного хранения фруктового и ягодного сырья происходило нарастание его титруемой кислотности: у ягод клюквы - на 25,8%, у плодов апельсина - на 1,3%. Низкое значение сахарно-кислотного индекса, который определяет вкусовые свойства готового продукта, свидетельствует о невозможности использования пюре из ягод клюквы в чистом виде. Таким образом, сочетание выбранных компонентов в замороженной смеси будет обоснованным и целесообразным, с точки зрения разной скорости разрушения аскорбиновой кислоты и сахаров. Существенные потери этих компонентов ягодами клюквы будут компенсированы лучшей их сохранностью в плодах апельсина. Сочетание выбранных компонентов в замороженной смеси будет способствовать улучшению ее органолептических показателей и сохранению функциональных свойств.

Ключевые слова: клюква; апельсин; замораживание; криогенное хранение; функциональные свойства; витамин С; фенольные вещества; сахара; кислоты

Надійшла (received) 25.04.2020

УДК 637.521:[637.143.2+635.41

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.17

РОЗРОБКА М'ЯСНИХ НАПІВФАБРИКАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ ТА ШПИНАТУ

О. А ЧЕРНЮШОК*, І. Ю. ШЕВЧЕНКО

кафедра технології м'яса і м'ясних продуктів, Національний університет харчових технологій, Київ, УКРАЇНА
*e-mail: chernyushokolga@ukr.net

АНОТАЦІЯ Досліджено вплив молочних продуктів та шпинату на органолептичні та фізико-хімічні показники у технології м'ясних напівфабрикатів. Розглянуто можливість розширення асортименту за рахунок внесення сухої молочної сироватки, що попередньо збагачена, сиру сулугуні та шпинату. Об'єктом дослідження були розроблені фаршеві системи для м'ясних напівфабрикатів. Для збагачення сухої сироватки молочної її обробляли в електророзрядній камері зі струмопровідним прошарком гранул магнію і мангану. Встановлено, що за такого оброблення у молочної сироватці збільшується вміст Магнію і Мангану залежно від тривалості оброблення. Збагачену суху сироватку молочну вносили різними способами: у сухому вигляді, в розчиненому у воді та розчиненому у бульйоні. Доведено, що найкращим для усіх досліджуваних зразків м'ясних напівфабрикатів, виявився зразок з додавання її у сухому вигляді. Сир сулугуні вносили до фаршу попередньо його подрібнивши., а шпинат після промивання, видалення зайвої вологи, після миття, в подрібненому стані. Додавання вказаної сироватки в кількості 0,5...1,5% у рецептурі напівфабрикатів покращує зовнішній вигляд, готовий виріб характеризується ніжною консистенцією, а внесення сиру сулугуні та шпинату надає продукту особливого, пікантного смаку та аромату готовому продукту, що зацікавлює дегустаторів. За результатами фізико-хімічних досліджень відзначено, що усі дослідні зразки мали рН, що є у межах норми та характерне для м'ясної сировини. Невелике відхилення від норми було у зразках №1 та №4. Вміст вологи у даних зразках м'ясного фаршу варіювався в межах 55...61%, який відповідно залежить від виду та кількості м'ясної сировини. У зразку під №4, вміст вологи був найнижчим. Вологов'язувальна здатність усіх зразків залежить від консистенції виробу. Встановлено, що у разі використання запропонованих рецептурних компонентів у виробництві м'ясних напівфабрикатів тривалість організації виробництва не збільшується, додаткового обладнання не потребує. Використання сухої сироватки молочної, збагаченої магнієм і манганом, сиром сулугуні та шпинатом в технології м'ясних напівфабрикатів сприяє його збагаченню цінними мінеральними елементами.

Ключові слова: суха молочна сироватка збагачена; магній; манган; сир сулугуні; шпинат; напівфабрикати

DEVELOPMENT OF SEMI-FINISHED MEAT PRODUCTS USING DAIRY PRODUCTS AND SPINACH

O. CHERNYUSHOK *, I. SHEVCHENKO

Department of meat and meat products, National University of Food Technology, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Influence of dairy products and spinach on the organoleptic and physicochemical parameters in the technology of meat semi-finished products has been investigated. The object of the study was to develop minced meat mince systems. To enrich the dry whey it was treated in an electro-discharge chamber with a conductive layer of magnesium and manganese granules. It has been found that such treatment increases the content of Magnesium and Manganese in whey depending on the duration of the treatment. The enriched milk whey serum was introduced in various ways: in dry form, in water dissolved and in broth. It has been proved that the best from the all studied samples of meat semi-finished products was sample with the dry addition. Suluguni cheese was brought to mince before grinding it and spinach after washing, removal of excess moisture, after washing, in a crushed state. Delicate consistency and the introduction of suluguni cheese and spinach give the product a special, spicy taste and aroma of the finished product of interest to the tasters. According to the results of physicochemical studies, all the test specimens had a pH that was within the normal range and characteristic of meat raw materials. A slight deviation from the norm was in samples №1 and №4. Moisture content in these minced meat samples varied within 55... 61%, depending on the type and quantity of raw meat. In the sample at №4, the moisture content was lowest. The wettability of all samples depends on the consistency of the product. It is established that the use of the proposed recipe components in the production of meat semi-finished products does not increase the duration of production organization, no additional equipment is needed. The use of dried whey with magnesium and manganese enriched with suluguni cheese and spinach in semi-finished meat technology contributes to its enrichment with valuable mineral elements.

Keywords: dry whey enriched; magnesium; manganese; suluguni cheese; spinach; semi-finished products

Вступ

В останні роки, традиційні харчові продукти, які включають м'ясну основу все більше привертають інтерес споживачів у світі [1-4]. Цей процес

відбувається, через їх особливі органолептичні властивості, високу якість та натуральний склад [5,6]. Споживачі вірять, що їхнє здоров'я напряму залежить, від якості харчування.

У сучасних умовах недостачі білків та мікроелементів, а також підвищення цін на м'ясну сировину, актуальним залишається питання удосконалення технології м'ясних виробів, що дають змогу покращити їх якість. У м'ясній галузі застосування сухої сироватки молочної широко розповсюджене, адже вона має функціонально-технологічні характеристики, подібні до м'ясної сировини та дозволяє частково замінити чи збагатити. Даний процес проводять з метою оптимізації біологічної та харчової цінності продукту, покращення його структури, смако-ароматичних властивостей [6].

Відома технологія оброблення сироватки молочної в електророзрядній камері зі струмопровідним прошарком гранул магнію і мангану дозволяє отримати продукт збагачений мікроелементами. Встановлено, що за такого оброблення у молочній сироватці збільшується вміст Магнію і Мангану залежно від тривалості оброблення. Суха демінералізована молочна сироватка збагачена мікроелементами є перспективною сировиною для виготовлення нових м'ясних продуктів [7].

За допомогою сухої сироватки молочної збагаченої можна отримати стабільну структуру фаршу, а також ущільнити структуру виробу і водночас збагатити продукт мікроелементами. Підвищення вологосв'язуючої здатності м'ясних білків допоможе активізації молочних білків, що містяться в сироватці і цим самим сприяють зниженню втрат при термообробці. Крім того, введення сухої сироватки молочної збагаченої, у виробництві напівфабрикатів, дає можливість виготовити продукт, який буде додатково збагачений мікроелементами, що сприяють нормальному функціонуванню організму та кращому засвоєнню ним вітамінів [8].

Сир сулугуні, є справжнім джерелом поживних речовин і вітамінів. Він нормалізує вміст холестерину в організмі. Завдяки особливостям процесу виготовлення отримують дуже смачний, насичений великою кількістю мінералів і вітамінів продукт. Окрім закваски, сулугуні містить ферменти, тому смак сиру не має сторонніх присмаків, а його запах нейтральний. Користь сиру сулугуні також пояснюється тим, що в ньому присутні необхідні для нормальної життєдіяльності мікроелементи, такі як кальцій, фосфор, натрій і магній [9].

Шпинат відіграє важливу роль у харчуванні людини, оскільки його споживають круглий рік. Більше того, він має низький вміст калорій і жирів, але багатий мінералами, білками, вітамінами та має високу антиоксидантну активність [10]. Біоактивні фітохімічні речовини, є широко розповсюдженими в природі, можуть утворювати пігменти, які надають приємного вигляду продуктам харчування [11] та підвищують їх функціональну та поживну цінність.

Мета роботи

Розширення асортименту та удосконалення технології заморожених напівфабрикатів із використанням сухої демінералізованої молочної сироватки збагаченої Mg та Mn, та додатково внести в рецептуру сир сулугуні та шпинат, поставлено такі завдання роботи:

- визначити оптимальні умови внесення;
- дослідити поєднання компонентів та вибрати кращі їх співвідношення у рецептурі;
- підібрати нові рецептури заморожених напівфабрикатів;
- дослідити вплив внесених компонентів на функціонально-технологічні показники виробів;
- дослідити та проаналізувати органолептичні, та фізико-хімічні показники готових виробів

Виклад основного матеріалу

Під час проведення експерменту було розроблено рецептури фаршів, до яких входили такі компоненти: свинина жилована напівжирна, м'ясо куряче одностортне, цибуля ріпчаста свіжа, суха демінералізована молочна сироватка збагачена Mg та Mn, сир сулугуні та шпинат.

Рецептура всіх зразків відрізнялася між собою, вмістом додаткових компонентів у відсотковому співвідношенні. Рецептурний склад фаршевих систем представлений у табл. 1.

Таблиця 1 – Загальний склад фаршевих систем

Сировина	№1, %	№2, %	№3, %	№4, %
Свинина жилована напівжирна	38	35	35	32
М'ясо курятини одностортне	44	45	45	52
Цибуля ріпчаста свіжа	3,4	3	2	3,5
Сіль кухонна	2	2	2	2
Меланж	3	4,4	5	2,9
Чорний перець мелений	0,1	0,075	0,075	0,08
Суша демінералізована молочна сироватка збагачена Mg та Mn	1,5	1,02	0,62	0,52
Шпинат	2	3	3,5	2
Сир сулугуні	6	6,5	6,8	5
Разом	100	100	100	100

Дані зразки приготовано таким чином, що м'ясо двічі пропускають через м'ясорубку, додають підготовлену завчасно подрібнену свіжу ріпчасту цибулю, кухонну сіль, меланж, чорний мелений перець, суху демінералізовану молочну сироватку збагачену Mg та Mn, сир сулугуні та шпинат згідно рецептури. Із приготованого фаршу формуються напівфабрикати, а саме пельмені.

Тістова оболонка готується таким чином: до просіяного борошна додають попередньо розморожений меланж, кухонну сіль, воду та цукор-пісок. Дані компоненти ретельно вимішуються, для отримання пружної та еластичної маси [12].

Обговорення результатів

Під час визначення вмісту вологи у даних зразках, було застосовано арбітражний метод (висушуванням наважки продукту (3-5г) за температури 120°C протягом 100 - 120 хв до постійної маси). Вологозв'язуючу здатність вимірювали методом пресування [13].

Усі дослідні зразки мали рН, що є у межах норми та характерне для м'ясної сировини. Невелике відхилення від норми було у зразках №1 та №4.

Вміст вологи у даних зразках м'ясного фаршу варіювався в межах 55-61%, який відповідно залежить від виду та кількості м'ясної сировини. У зразку під №4, вміст вологи був найнижчим [14]. Вологозв'язувальна здатність усіх зразків залежить від консистенції виробу. Тобто, у зразку №4 ВЗЗ є найнижчою, це зумовлено, тим, що вміст м'яса курятини в ньому є найбільшим. В інших зразках ВЗЗ фаршу знаходиться в нормі.

Таблиця 2 - Основні показники дослідних зразків

Показники	рН	Вміст вологи, %	ВЗЗ _а
Зразок №1	5,86	61,48	63,87
Зразок №2	6,05	60,60	64,90
Зразок №3	6,09	60,20	64,38
Зразок №4	5,62	55,07	61,40

Було проведено оцінку органолептичних показників якості готового продукту за дослідженнями [15]. Кінцеві результати цих показників наведено на рис. 1.

За результатами органолептичних показників можна стверджувати, що внесена до рецептури суха демінералізована сироватка збагачена Mg та Mn, сир сулугуні та шпинат, позитивно впливають на органолептичні якості продукту, а саме зразок №3 виявився найкращим.

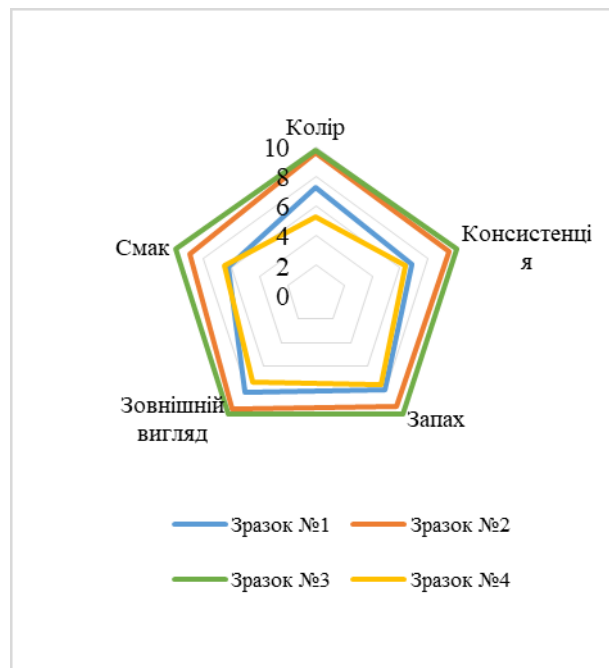


Рис. 1 – Органолептичні показники якості напівфабрикатів

Згідно отриманих результатів досліджень обрано найкращий зразок за своїми властивостями. Рецептний склад цього зразку наведений в табл. 3

Таблиця 3 – Рецептний склад

Сировина	№3, %
Свинина жилована напівжирна	35
М'ясо курятини односортне	45
Цибуля ріпчаста свіжа	2
Сіль кухонна	2
Меланж	5
Чорний перець мелений	0,075
Суха демінералізована молочна сироватка збагачена Mg та Mn	0,62
Шпинат	3,5
Сир сулугуні	6,8
Разом	100

Висновки

Після проведення досліджень можна зробити висновки, що у технології приготування м'ясних напівфабрикатів доцільно використовувати нові продукти з метою удосконалення технології та розширення асортименту. Адже, за рахунок внесення сухої демінералізованої молочної сироватки збагаченої Mg та Mn, сиру сулугуні та шпинату

отримано новий продукт з пікантним смаком та підвищеним вмістом мікроелементів.

Список літератури

1. Almli V. L., Verbeke W., Vanhonacker F., Næs T. and Hersleth M. General image and attribute perceptions of traditional food in six European countries. *Food Qual Preference*. 2011. 22(1). P. 129-138. doi: 10.1016/j.foodqual.2010.08.008.
2. Cherroud S., Cachaldora A., Fonseca S., Laglaoui A., Carballo J. and Franco I. Microbiological and physicochemical characterization of dry-cured Halal goat meat. Effect of salting time and addition of olive oil and paprika covering. *Meat Sci*. 2014. 98(2). P. 129-134. doi:10.1016/j.meatsci.2014.05.018.
3. Guerrero L., Gua'rdia M. D., Xicola J., Verbeke W., Vanhonacker F. and Zakowska- Biemans S., et al. Consumer-driven definition of traditional food products and innovation in traditional foods. A qualitative cross-cultural study. *Appetite*. 2009. 52(2). P. 345-354. doi: 10.1016/j.appet.2008.11.008.
4. Triki M., Herrero A. M., Jime'nez-Colmenero F. and Ruiz-Capillas C. Effect of preformed konjac gels, with and without olive oil, on the technological attributes and storage stability of merguez sausage. *Meat Sci*. 2013. 93(3). P. 351-360. doi: 10.1016/j.meatsci.2013.03.019.
5. Jime'nez-Colmenero F., Carballo J. and Cofrades S. Healthier meat and meat products: their role as functional foods. *Meat Sci*. 2001. 59(1). P. 5-13. doi:10.1016/s0309-1740(01)00053-5.
6. Nam K.-C., Jo C. and Lee M. Meat products and consumption culture in the East. *Meat Sci*. 2010. 86(1). P. 95-102. doi:10.1016/j.meatsci.2010.04.026.
7. Кочубей-Литвиненко О. В., Чернюшок О. А. Електрофізичний спосіб збагачення сухої молочної сироватки мінеральними елементами. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького*. 2017. Т. 19, № 75. С. 115–119.
8. Кочубей-Литвиненко О. В., Чернюшок О. А. Нові підходи до мікроелементного збагачення сухих концентратів із молочної сироватки. *Наукові праці Національного університету харчових технологій*. 2017. Т. 23, № 5, Ч. 1. С. 176–185.
9. Власенко В. В., Головко М. П., Семко Т. В., Головко Т. М. *Технологія молока та молочних продуктів: навчальний посібник*. Харківський державний університет харчування та торгівлі. – Харків : ХДУХТ, 2018. 202 с.
10. Ismail A., Marjan Z., Foong C. Total antioxidant activity and phenolic content in selected vegetables. *Food Chem*. 2004. 87 (4). P. 581-586. doi: 10.1016/j.foodchem.2004.01.010.
11. Ismail H., Chan K., Mariod A., Ismail M. Phenolic content and antioxidant activity of cantaloupe (Cucumis melo) methanolic extracts. *Food Chem*. 2010. 119 (2). P. 643-647. doi:10.1016/j.foodchem.2009.07.023.
12. Клименко М. М., Виннікова Л. Г., Береза І. Г. та ін. *Технологія м'яса та м'ясних продуктів: Підручник*. – К.: Вища освіта, 2006. 640 с.
13. Божко Н. В., Тищенко В. І., Пасічний В. М., Юшко М. І., Жукова Я. Ф., Попова Є. С. Study of functional and technological indices of meat-containing loaf with Muscovy duck meat and white carp. *Науковий вісник ЛНУВМБ*

імені С.З. Гжицького. 2018. Т. 20. № 85. С. 19-22. doi:10.15421/nvlvet8504.

14. Zheng Ch. L., Sun, D. W., Zheng, L. Correlating colour to moisture content of large cooked beef joints by computer vision. *Journal of Food Engineering*. 2006. 77(4). P. 858-863. doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.08.013.
15. Кишенько І. І., Старцова В. М., Гончаров Г. І. *Технологія м'яса та м'ясопродуктів. Практикум: навч. Нац. ун-т харч. технолог.* Київ: НУХТ, 2010. 367 с.

References (transliterated)

1. Almli V. L., Verbeke W., Vanhonacker F., Næs T. and Hersleth M. General image and attribute perceptions of traditional food in six European countries. *Food Qual Preference*, 2011, 22(1), pp. 129-138, doi: 10.1016/j.foodqual.2010.08.008.
2. Cherroud S., Cachaldora A., Fonseca S., Laglaoui A., Carballo J. and Franco I. Microbiological and physicochemical characterization of dry-cured Halal goat meat. Effect of salting time and addition of olive oil and paprika covering. *Meat Sci*, 2014, 98(2), pp. 129-134, doi:10.1016/j.meatsci.2014.05.018.
3. Guerrero L., Gua'rdia M. D., Xicola J., Verbeke W., Vanhonacker F. and Zakowska- Biemans S., et al. Consumer-driven definition of traditional food products and innovation in traditional foods. A qualitative cross-cultural study. *Appetite*, 2009, 52(2), pp. 345-354, doi: 10.1016/j.appet.2008.11.008.
4. Triki M., Herrero A. M., Jime'nez-Colmenero F. and Ruiz-Capillas C. Effect of preformed konjac gels, with and without olive oil, on the technological attributes and storage stability of merguez sausage. *Meat Sci*, 2013, 93(3), pp. 351-360, doi: 10.1016/j.meatsci.2013.03.019.
5. Jime'nez-Colmenero F., Carballo J. and Cofrades S. Healthier meat and meat products: their role as functional foods. *Meat Sci*, 2001, 59(1), pp. 5-13, doi:10.1016/s0309-1740(01)00053-5.
6. Nam K.-C., Jo C. and Lee M. Meat products and consumption culture in the East. *Meat Sci*, 2010, 86(1), pp. 95-102, doi:10.1016/j.meatsci.2010.04.026.
7. Kochubei-Litvinenko O., Chernyushok O. Electrophysical method of enrichment of dry whey with mineral elements. *Scientific Bulletin of the S. Hrizhsky National University of Veterinary Medicine and Biotechnology*, 2017, Vol. 19, No. 75, P. 115–119.
8. Kochubei-Litvinenko O., Chernyushok O. New Approaches to Micronutrient Enrichment of Dry Concentrates from Whey. *Scientific Works of the National University of Food Technologies*, 2017, Vol. 23, No. 5, Part 1, P. 176–185.
9. Vlasenko V., Golovko M., Semko T., Golovko T. *Technology of milk and dairy products: a textbook*. Kharkiv State University of Food and Trade. - Kharkiv: KhUFT, 2018. 202 p.
10. Ismail A., Marjan Z., Foong C. Total antioxidant activity and phenolic content in selected vegetables. *Food Chem.*, 2004, 87 (4), pp. 581-586, doi: 10.1016/j.foodchem.2004.01.010.
11. Ismail H., Chan K., Mariod A., Ismail M. Phenolic content and antioxidant activity of cantaloupe (Cucumis melo) methanolic extracts. *Food Chem.*, 2010, 119 (2), pp. 643-647, doi:10.1016/j.foodchem.2009.07.023.
12. Klimenko M., Vinnikova, L., Bereza I., et al. *Meat and Meat Products Technology: Textbook*. Higher education, 2006. 640 p.

13. Bozhko N., Tishchenko V., Pasichny V., Yushko M., Zhukova Y., Popova E. Study of functional and technological indices of meat-containing loaf with Muscovy duck meat and white carp. *Scientific Bulletin of S.S. Hedehog*, 2018, T. 20, № 85, S. 19-22, doi: 10.15421/nvlvet8504.
14. Zheng Ch., Sun, D., Zheng, L. Correlating color to moisture content of large cooked beef joints by computer vision. *Journal of Food Engineering*, 2006, 77 (4), pp. 858-863, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2005.08.013.
15. Kyshenko I., Starchova V., Goncharov G. *Technology of meat and meat products*. Workshop: Teaching Nat. un-t food. technol. Kiev: NUFT, 2010. 367 p.

Інформація про авторів (About authors)

Чернюшок Ольга Анатоліївна – кандидат технічних наук, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри технології м'яса і м'ясних продуктів, м.Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-7384-3170; e-mail: chernyushokolga@ukr.net.

Olha Chernyushok – Scientific Degree (Ph. D.), associate professor of the Department of meat and meat products Ukraine; ORCID: ORCID: 0000-0001-7384-3170; e-mail: chernyushokolga@ukr.net.

Шевченко Іванна Юрївна – студент, Національний Університет Харчових технологій, студент кафедри технології м'яса та м'ясних продуктів; м. Київ, Україна; e-mail: ivankashevchenko726@gmail.com.

Ivanna Shevchenko – student, National University of Food Technologies, student of Department of meat and meat products, Kyiv, Ukraine; e-mail: ivankashevchenko726@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Чернюшок О. А., Шевченко І. Ю. Розробка м'ясних напівфабрикатів з використанням молочних продуктів та шпинату. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 33- 3 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.17.

Please cite this article as:

Chernyushok O., Shevchenko I. Development of semi-finished meat products using dairy products and spinach Development of meat products with the use of dairy products and spinach. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 33- 3 , doi:10.20998/2413-4295.2020.02.17.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Чернюшок О. А., Шевченко И. Ю. Разработка мясных полуфабрикатов с использованием молочных продуктов и шпината. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 33- 3 . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.17.

АННОТАЦІЯ Исследовано вплив молочних продуктів та шпинату на органолептичні та фізико-хімічні показники в технології м'ясних полуфабрикатів. Розглянуто можливість розширення асортименту за рахунок введення молочної сироватки, попередньо збагаченої, сиру сулугуни та шпинату. Об'єктом дослідження були розроблені фаршеві системи для м'ясних полуфабрикатів. Для збагачення сухої сироватки молочної її обробляли в електророзрядній камері з токопровідною прошлойкою гранул магнію та марганцю. Встановлено, що при такій обробці в молочної сироватці збільшується вміст магнію та марганцю в залежності від тривалості обробки. Збагачену суху сироватку молочної вводили різними способами: в сухому вигляді, в розчині в воді та в розчині в бульйоні. Доведено, що найкращим для всіх досліджуваних зразків м'ясних полуфабрикатів, виявився зразок з додаванням в сухому вигляді. Сир сулугуни вводили в фарш попередньо його подрібнивши, а шпинат після промивки, видалення надлишкової вологи, після миття, в подрібненому стані. Додавання вказаної сироватки в кількості 0,5...1,5% в рецептурі полуфабрикатів покращує зовнішній вигляд, готове виробу характеризується ніжною консистенцією, а введення сиру сулугуни та шпинату надає продукту особливого, пикантного смаку та аромату готового виробу, зацікавлює дегустаторів. За результатами фізико-хімічних досліджень відмічено, що всі досліджені зразки мали pH, у межах норми та характерно для м'ясного сиров'язу. Неблизьке відхилення від норми було в зразках №1 та №4. Вміст вологи в досліджуваних зразках м'ясного фаршу коливався в межах 55...61%, який в залежності від виду та кількості м'ясного сиров'язу. В зразку під №4, вміст вологи був найнижчим. Влагосвязуюча здатність всіх зразків залежить від консистенції виробу. Встановлено, що при використанні запропонованих рецептурних компонентів в виробництві м'ясних полуфабрикатів тривалість організації виробництва не збільшується, додаткового обладнання не потрібно. Використання сухої сироватки молочної, збагаченої магнієм та марганцем, сиром сулугуни та шпинатом в технології м'ясних полуфабрикатів сприяє його збагаченню цінними мінеральними елементами.

Ключевые слова: сухая молочная сыворотка обогащенная; магниевый; марганцевый; сыр сулугуни; шпинат; полуфабрикаты

Надійшла (received) 08.05.2020

УДК 338.27/637.51

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.18

ВПЛИВ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ СІЧЕНИХ М'ЯСО-РОСЛИННИХ НАПІВФАБРИКАТІВ З ВИКОРИСТАННЯМ ФЕРМЕНТАЦІЇ**Д. А. ШВЕДЮК¹, В. М. ПАСІЧНИЙ²**¹ Проблемна науково-дослідна лабораторія Національного університету харчових технологій, Київ, УКРАЇНА² кафедра технологій м'яса та м'ясопродуктів Національного університету харчових технологій, Київ, УКРАЇНА

*e-mail: shvedyuk.d@ukr.net

АНОТАЦІЯ У статті досліджується вплив ферментативної обробки за допомогою протеази мікробіологічного походження, продукованої *Aspergillus niger* на функціонально-технологічні та фізико-хімічні характеристики котлет, рецептура яких включає різні види м'ясної та рослинної сировини. Мікробні протеази грають важливу роль у фізіологічних процесах, мають широку біохімічну мінливість, а також спектр призначень в аналітичному і промисловому застосуванні й можливості масового виробництва, включаючи простоту генетичних маніпуляцій для створення нових ферментів. В якості м'ясної сировини для порівняння обрано два види сировини – м'ясо курчат бройлерів (суміш фаршу зі стегна та гомілки 1,5:1) та свинину нежирну. В якості рослинної сировини обрано нут та сочевицю. Серед досліджуваних показників обрано загальний вміст вологи, вологосв'язуючу здатність (B33), рН водної витяжки продукту та пластичність фаршу. Усі вимірювання проведено на трьох етапах – до ферментації продукту, після ферментації до термічної обробки, та після завершення термічної обробки. В результаті доведено ефективність використання протеази *Aspergillus niger* для впливу на функціональні характеристики м'ясо-рослинних напівфабрикатів. Жодна з отриманих партій м'ясної сировини не була заморожена. Після подрібнення на вовчку з діаметром решітки 6 мм, в охолоджену сировину вносили фермент (протеазу, продуковану *Aspergillus niger*) у вигляді розчину згідно оптимального рівня для кожної групи зразків. Опіраючись на проведені дослідження, встановлено тривалість ферментації – 2 доби. Процес проводився за температури 4–6°C. Також у зразки вносили кухонну сіль у співвідношенні 2,5% до маси м'ясної сировини. Паралельно для кожної групи зразків було заплановано контрольний зразок, в який вносили лише кухонну сіль. Після закінчення процесу ферментації, з фаршу дослідних зразків було сформовано котлетні вироби товщиною 150–200 мм та масою 45–50 г. Отримані вироби, після пакування в плівку, піддавали термічній обробці шляхом варіння у воді за температури 75 °C протягом 30 хв. Після цього їх охолоджували за кімнатної (18–20 °C) температури протягом 1 год, було відібрано проби для вимірювання основних функціонально технологічних характеристик.

Ключові слова: напівфабрикати; протеази; м'ясо птиці; ферментація; термічна обробка

THE INFLUENCE OF HEAT TREATMENT ON THE CHARACTERISTICS OF CHOPPED MEAT AND VEGETABLE SEMI-FINISHED PRODUCTS USING FERMENTATION**D. SHVEDYUK¹, V. PASICHNYI²**¹ Problematic scientific laboratory of NUFT, Kyiv, UKRAINE² Department of meat and meat products technology of NUFT, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The article is devoted to study of the influence of enzymatic processing with the help of protease of microbiological origin, produced by *Aspergillus niger*, on the functional-technological and physicochemical characteristics of cutlets, the formulation of which includes different types of meat and vegetable raw materials. Microbial proteases play an important role in physiological processes; have broad biochemical variability, as well as a range of applications in analytical and industrial applications and the possibility of mass production, including the simplicity of genetic manipulation to create new enzymes. Two types of raw materials were selected as meat raw materials - broiler chicken meat (a mixture of minced meat from the thigh and shin 1,5:1) and pork filet. Chickpeas and lentils were selected as plant material. Among the studied parameters are selected the total moisture content, water-holding capacity (WHC), the pH of the water extract of the product and the plasticity of the stuffing. All measurements were performed in three stages – before fermentation of the product, after fermentation before heat treatment and after heat treatment. As a result, the effectiveness of the use of *Aspergillus niger* protease for influencing the functional characteristics of meat and vegetable semi-finished products was proved. None of the received batches of raw meat was frozen. After grinding on a top with a lattice diameter of 6 mm, the enzyme (protease produced by *Aspergillus niger*) was added to the cooled raw material as a solution according to the optimum level for each sample group. Based on the studies, the duration of fermentation was 2 days. The process was carried out at a temperature of 4–6°C. Also, the samples were made with salt in the ratio of 2.5% by weight of meat raw materials. In parallel, a control sample was planned for each group of specimens to which only salt was introduced. After the fermentation process, cutlets of 150–200 mm thickness and a mass of 45–50 g were formed from the forcemeat of the test samples. The obtained products, after packing in the film, were heat treated by boiling in water at 75°C for 30 min. After that, they were cooled at room temperature (18–20°C) for 1h, samples were taken to measure the main functional and technological characteristics.

Keywords: half-finished meat products; modified fat; pork fat; protein – fat emulsion; dietary fiber

Вступ

Значення протеолітичних ферментів у харчових технологіях обумовлене певною сукупністю факторів.

До цих факторів належать їхня здатність підвищувати доступність для травних ферментів та повноцінність білків оброблюваної сировини [1]. Також, важливу

роль відіграє безпосередньо природа та походження кожного певного виду ферментів. За своїм походженням усі протеолітичні ферменти, що використовуються у харчовій промисловості можна поділити на такі класи: рослинного, тваринного, мікробіологічного походження та синтетичні.

Серед усіх класів протеолітичних ферментів (протеаз) найменш дослідженим і найбільш оптимальним з точки зору собівартості при використанні на 1 кг оброблюваної сировини є протеази мікробіологічного походження [2]. Мікробні протеази відіграють важливу роль у фізіологічних процесах, мають широку біохімічну мінливість, а також напрями промислового застосування та аналітичних досліджень.

Важливими для застосування є можливість промислового відтворення протеаз та генетичних маніпуляцій для створення нових ензимів зі зміненими властивостями, які будуть специфічними за своєю дією на органічні сполуки. Мікробні протеази можуть бути як позаклітинними, так і внутрішньоклітинними, і на їх утворення впливають штами, харчові та фізико-хімічні фактори, такі як температура, значення рН, вміст азоту, джерела вуглецю і неорганічні солі.

Власне у харчовій промисловості найбільш перспективними є такі види протеаз мікробіологічного походження (залежно від назви мікроорганізмів, які їх продукують): *Aspergillus* (sp. 13.33-35, *awamori*, *clavatus*, *flavus*, *fumigates*, *niger*, *oryzae*), *Beauveria*, *Thermoascus aurantiacus*, а також протеази новітніх класів (в основному представлені AFP, HT та ProG) [3].

Таким чином, у процесі досліджень мікробіологічних протеаз встановлено такі їхні переваги – низька вартість відтворення ферментної сировини (згадані вище мікроорганізми, більшість з яких можуть виживати при екстремальних умовах, мають також і високу швидкість росту), широкий спектр умов активності отримуваних ферментів, можливість підбору широкого спектру мікроорганізмів для продукування потрібного виду ферментів та перспектива створення нових видів ферментів шляхом виведення нових підвидів мікроорганізмів або редагування геному вже існуючих видів.

Виходячи із завдань, покладених в основу роботи, необхідною частиною науково пошуку є дослідження характеристик готової продукції на основі сировини, що була піддана ферментації із застосуванням мікробіологічної протеази *Aspergillus niger*. Згідно з планом експерименту всі зразки було розділено за видом основної м'ясної сировини, яка складала основу рецептури відповідної групи зразків м'ясо-рослинних напівфабрикатів.

Обробка зразків напівфабрикатів проводилась, виходячи із встановлених раніше оптимальних рівнів введення ферменту. Дослідна група зразків напівфабрикатів на основі яловичини була зменшена

до 2 зразків (проти 3 зразків для м'яса курчат-бройлерів та свинини), з огляду на малу ефективність даного ферменту при обробці яловичини.

Жодна з отриманих партій м'ясної сировини не була заморожена. Після подрібнення на вовчку з діаметром решітки 6 мм, в охолоджену сировину вносили фермент (протеазу, продукovanу *Aspergillus niger*) у вигляді розчину згідно попередньо визначеного оптимального рівня для кожної групи зразків.

Опираючись на проведені дослідження, встановлено тривалість ферментації – 2 доби. Процес проводився в умовах типових для виробничих процесів соління та дозрівання – за температури 4–6°C. Також у зразки вносили кухонну сіль у кількості 2,5% до маси м'ясної сировини. Паралельно для кожної групи зразків напівфабрикатів був наявним контрольний зразок, в який вносили лише кухонну сіль.

Після закінчення процесу ферментації, з фаршу дослідних зразків було сформовано котлетні вироби товщиною 150–200 мм та масою 45–50 г.

Отримані вироби, після пакування в плівку, піддавали термічній обробці шляхом варіння у воді за температури 75 °C протягом 30 хв.

Після цього їх охолоджували за кімнатної (18–20°C) температури протягом 1 год, та відбирали проби для вимірювання основних функціонально-технологічних характеристик – вологозв'язувальної здатності (B33), вологоутримуючої здатності (BV3), жирутримуючої здатності (ЖУ3), вмісту вологи у продукті (%), а також рН водної витяжки продукту.

Мета роботи

Мета роботи полягала у дослідженні можливості комбінування м'ясної сировини (м'яса курчат-бройлерів, яловичини першого сорту, свинини нежирної) та різних видів рослинної сировини (нут та сочевиця гідратовані) у процесі виробництва січених напівфабрикатів (котлет) із застосуванням ферментативної обробки.

Досліджувана гіпотеза полягала у тому, що обробка протеазою мікробіологічного походження протягом 2 діб приведе до зростання значень функціонально-технологічних характеристик після закінчення повного процесу термічної обробки. Окрім вказаних цілей, дослідження також мало на меті встановити оптимальний вид сировини для виробництва січених м'ясо-рослинних напівфабрикатів із застосуванням обробки протеазою мікробіологічного походження.

Виклад основного матеріалу

У процесі досліджень визначали функціонально-технологічні характеристики сировини до та після ферментативної обробки, а функціонально-технологічні характеристики власне

напівфабрикатів до та після термічної обробки, у порівнянні з контрольним зразком напівфабрикатів без ферментації. Згідно з планом постановки експерименту за основу була взята рецептура напівфабрикату січеного м'ясо-рослинного, рецептурний склад якої був обґрунтований у попередніх дослідженнях.

Метою першого етапу досліджень був вибір оптимальної сировини з точки зору впливу ферментативної обробки, а також формування контрольної групи, для порівняння та визначення впливу ферментної обробки на усіх етапах досліджень.

Перший етап передбачав ферментативну обробку протеазою мікробіологічного походження *Aspergillus niger* у концентрації 30 мг ферментативного препарату на кожен кілограм оброблюваної сировини. Режими ферментативної обробки встановлені на підставі визначень у попередніх дослідженнях оптимальних значень протеолітичного впливу даного ферменту [4].

Таким чином, після обробки протягом 48 год при температурах 4–6 °С, було проведено відбір проб і визначення фізико-хімічних та функціональних характеристик. Визначення ВЗЗ проводили методом пресування наважки продукту (0,3 г) вагою 1 кг протягом 15 хв, після чого обраховували площу вологості плями. Площа плями фаршу в свою чергу дозволяє розрахувати пластичність сировини.

Визначення вмісту вологи проводили арбітражним методом із сушінням наважки у шафі до сталої маси. Значення рН середовища визначали потенціометричним методом. Дані отримані на першому етапі приведені у таблиці 1.

З наведених даних можна зробити висновок, що краще ферментний препарат впливає на м'ясо курчат-бройлерів, що проявляється в максимальній зміні показників між контрольною та дослідними групами зразків. Загалом, різницю у значеннях вмісту вологи можна пояснити зміною сили хімічних зв'язків внаслідок протеолізу та утворення нових вільних пептидних сполук, які в свою чергу здатні зв'язувати воду. Усі дослідні зразки крім яловичини продемонстрували зростання рівня ВЗЗ після ферментації, а максимальна різниця між відповідними значеннями у дослідній та контрольній групах зразків становила 11,05% та зафіксована у м'ясі курчат-бройлерів. Значення рівня волого утримуючої здатності Для значень ВУЗ виражене зменшення значень спостерігалось для зразків яловичини – 9,05%, в той час як свинина та курятина продемонстрували ріст значення ВУЗ на 3,25 та 9,25% відповідно. ЖУЗ зросла для усіх зразків дослідної групи, а максимальна різниця між дослідним і контрольним значеннями становила 9,50 %. З огляду на отримані значення, тенденція до росту або зменшення значень рН під впливом протеолітичних процесів не проявляється. Різниця для зразків курятини та свинини становила 0,2, а для яловичини –

мінус 0,15. Значення пластичності фаршів підвищувались по мірі ферментативної обробки і ця зміна напряму залежала від збільшення вносимого ферментного препарату. Таким чином обробка протеазою *Aspergillus niger* має позитивний вплив на усі досліджувані функціонально-технологічні та фізико-хімічні характеристики свинини нежирної та м'яса курчат-бройлерів.

Проте, зміни характеристик сировини до термічної обробки не завжди можуть накладатись на характеристики готового продукту після термічної обробки [5].

Після проведення термічної обробки помітною залишилась різниця між зразками дослідної та контрольної групи для свинини та курятини. Представлені в табл. 2 дані варто аналізувати не лише з точки зору кінцевих показників готового продукту, але й з точки зору власне впливу нагрівання та ферментативної обробки. Для значень ВЗЗ у зразках м'яса курчат-бройлерів маємо чотири значення – значення контрольного зразка до та після термообробки, та значення дослідного зразка до та після термічної обробки.

Різниця в значеннях контрольного та дослідного зразків після термічної обробки (63,1 та 69,1% відповідно) складає 6,0%, а різниця між значеннями дослідного зразка до та після термічної обробки складає 12,24%.

Аналогічне значення (різниця, що виражає вплив термічної обробки на ВЗЗ) для контрольного зразка складає 7,19%.

З даної точки зору доволі важко констатувати переважну роль нагрівання або протеолітичного впливу ферменту. Виходячи із показників видно, що вплив протеолітичного ферменту на значення ВЗЗ до термічної обробки дозволяє суттєво компенсувати зниження ВЗЗ під впливом нагріву. Для значень рН після термічної обробки відбувається зростання після нагрівання для всіх зразків.

В усіх дослідних зразках окрім яловичини втрати вологи у процесі варки були меншими, ніж у зразках без внесення ферментного препарату. Найменші втрати вологи зафіксовані у зразку на основі м'яса курчат-бройлерів – 4,41 %, для контрольного зразка на основі тієї ж сировини – 13,64 %, таким чином демонструючи здатність даної сировини зберігати додатково 8,38 % вологи у процесі термічної обробки.

Для свинини різниця у втраті вологи між контрольним і дослідним зразками була меншою.

Втрати вологи в процесі термообробки склали відповідно 10,59% та 8,38 % для контрольного і дослідного зразків. Варто відмітити природну закономірність, що проявляється у зменшенні пластичності зразків після термічної обробки. Максимальна пластичність зафіксована у дослідному зразку на основі м'яса курчат-бройлерів – 20,4 см²/г.

Таблиця 1 – Показники рН, виходу і пластичності зразків м'ясних фаршів за різних умов оброблення

Номер зразка	Вид сировини	Частка внесення ферменту, мг/г	рН			Вихід, %	Пластичність фаршу, см ² /г		
			Сирі	Готові	Δ		Сирі	Готові	Δ
КК	М'ясо курчат - бройлерів	0	6,45	6,9	0,45	68,2	21,5	18,45	-3,05
2К		45	6,6	6,8	0,2	74,4	27,2	20,34	-6,86
КС	Свинина нежирна	0	5,5	6,1	0,6	71,2	18,26	15,68	-2,58
1С		45	5,7	6,15	0,45	77,2	20,70	19,25	-1,45
КЯ	Яловичина І сорту	0	6,1	6,4	0,3	69,8	12,52	8,46	-4,06
2Я		30	5,9	6,25	0,35	70,6	12,85	8,60	-4,25

Таблиця 2 – Показники функціонально-технологічні показники м'ясних фаршів за різних умов оброблення

Номер зразка	ВЗЗ, %			ВУЗ, %			ЖУЗ, %			Вміст води, %		
	Сирі	Готові	Δ	Сирі	Готові	Δ	Сирі	Готові	Δ	Сирі	Готові	Δ
КК	70,29	63,1	-7,19	54,2	51,11	-3,09	67,4	47,9	-19,5	76,11	62,47	-13,64
2К	81,34	69,1	-12,24	63,45	55,16	-8,29	76,9	52,7	-24,2	75,26	70,85	-4,41
КС	71	66,25	-4,75	65,5	54,6	-10,9	58,05	49,1	-8,95	67,12	56,53	-10,59
1С	76,25	72,04	-4,21	68,75	60,1	-8,65	63	53,12	-9,88	71,48	63,1	-8,38
КЯ	76,22	64,85	-11,37	79,15	70,12	-9,03	50,4	42,9	-7,5	64,05	55,25	-8,8
2Я	69,25	65,82	-3,43	72,09	67,15	-4,94	55,32	41,52	-13,8	64,35	55,05	-9,3

З представлених у табл. 1 і 2 даних можна зробити висновок, що ферментація не підвищує термостабільність сировини, але завдяки покращенню значень ВЗЗ, створює передумови для високих показників готового продукту.

Протеаза *Aspergillus niger* проявляє позитивний вплив на більшість основних функціональних характеристик м'яса курчат-бройлерів та свинини нежирної, проте не проявляє позитивного впливу на яловичину.

У подальших дослідженнях за основу рецептур модельних напівфабрикатів обрано рецептуру м'ясо-рослинних напівфабрикатів з попередньо визначеними фізико-хімічними показниками [4,5], які представлено в табл. 3.

При підготовці рослинної сировини використовували попередню гідратацію у співвідношенні сировини та води 1:2 відповідно. Введення шпиків потрібно з огляду на органолептичні характеристики готового продукту, а також для формування структури та вигляду на розрізі виробу після термічної обробки. Білково-жирова емульсія містить у своєму складі білки свинячої шкурки та суху молочну сироватку, що має на меті підвищення біологічної цінності.

Таблиця 3 – Рецептури модельних напівфабрикатів

Сировина	Зразок		
	К	А	В
Свинина нежирна, %	-	-	40
Курятина, %	40	40	-
Клітковина, %	6	5	5
шпик, %	10	10	10
Панірувальні сухарі, %	5	5	5
Вода, %	14	-	-
БЖЕ, %, в тому числі	25	-	-
Білок свинячої шкурки, %	4	-	-
Суміш кукурудзяної та ріпакової олій, %	5	-	-
Суха молочна сироватка, %	1	-	-
Вода, %	15	-	-
Нут гідратований	-	20	20
Сочевиця гідратована	-	20	20
Всього	100	100	100

Співвідношення між білками свинячої шкурки, сухою молочною сироваткою, жиром та водою становить відповідно 4:1:5:15. Застосування білків свинячої шкірки у БЖЕ дозволяє не тільки покращити реологічні характеристики продукту, але і підвищити стабільність продукту при термічній обробці [6–8]. На даному етапі досліджень важливим є виявити вплив не лише подрібнення та емульгування в поєднанні із впливом протеаз мікробіологічного походження, але і дослідити вплив більш жорстких режимів термічної обробки (при застосуванні смаження замість варіння).

Процес виробництва дослідних напівфабрикатів включав підготовку БЖЕ шляхом емульгування води з нежирною сировиною та поступовим введенням суміші олій, підготовку рослинної сировини шляхом гідратації, перемішування із ферментною сировиною у концентрації 30 мг на кожен кг сировини, витримування протягом 2 діб та подрібнення на вовчку з діаметром решітки 3 мм, подрібнення попередньо ферментованої (аналогічно першим етапам) м'ясної сировини на вовчку з решіткою 2 мм, змішування всіх рецептурних компонентів, формування виробів діаметром 80 мм та їх обсмажування до температури у товщі 76 ± 1 °C. Вибір даної температури обумовлений властивостями рослинної сировини [8–10].

Після проведення термічного оброблення та остигання виробів до температури в товщі 22 ± 2 °C відбирали проби для проведення фізико-хімічних та функціонально-технологічних досліджень.

Обговорення результатів

Отримані результати представлені у табл. 4. Після проведення обробки не було виявлено суттєвої (понад 5%) різниці між досліджуваними зразками. Проте, спостерігалися деякі принципові відмінності, які демонструють вплив протеази мікробіологічного походження.

Максимальний вихід зафіксовано у зразку А, що містив у рецептурі м'ясо курчат-бройлерів, – 103,9%. Вихід зразка на основі свинини (зразок В) становив 101,9 %. Вплив протеази мікробіологічного походження дозволяє частково компенсувати зменшення емульгуючої здатності при нагріванні БЖЕ [10].

Значення ВЗЗ для усіх зразків знаходились у діапазоні 76–81%. Максимальне значення зафіксовано у зразку А – 80,48%, а мінімальне у контрольному зразку – 76,25%.

Дана різниця в отриманих значеннях не демонструє значного впливу ферментації на характеристики готового продукту, проте свідчить про ефективність комбінування рослинної та м'ясної сировини при виробництві ферментованих продуктів. Усі отримані значення ВУЗ знаходяться в діапазоні 70–72%, виходячи з чого можна зробити висновок про

прийнятність ферментації для виробництва м'ясо-рослинних напівфабрикатів, зокрема у вигляді котлет. Значення ЖУЗ в контрольному зразку було значено меншим, ніж значення в зразках А та В з використанням рослинної сировини. Максимальне значення зафіксовано у зразку А – 67,10%, що свідчить про ключову роль у формуванні здатності продукту утримувати залежить від вмісту і якості жиру у зразку [11–13].

Таблиця 4 – Показники напівфабрикатів після термічної обробки

Показник	Варіанти зразків		
	К	А	В
Вихід, %	100,8	103,9	101,9
ВЗЗ, %	76,25	80,48	78,32
Вологість, %	75,38	74,12	70,24
pH	6,50	6,85	6,70
ЖУЗ, %	57,22	67,10	64,74
ВУЗ, %	70,65	72,18	71,70

Тенденція зростання значення pH разом із внесенням досліджуваної протеази мікробіологічного походження, яка зафіксована для м'ясної сировини, проявляється і для комбінованих фаршів напівфабрикатів в процесі теплової обробки.

Узагальнюючи результати досліджень, варто зазначити, що внесення гідратованих сумішей суміші нуту та сочевицю на заміну БЖЕ і частини м'ясної сировини при проведенні ферментації дозволяє отримати достатньо високі технологічні характеристики м'ясо-рослинних напівфабрикатів.

Висновки

З отриманих результатів можна зробити висновки, що обробка свинини нежирної та м'яса курчат-бройлерів протеазою мікробіологічного походження *Aspergillus niger* дозволяє досягнути зростання функціонально-технологічних характеристик сировини.

Використання яловичини для ферментативної обробки згаданого протеазою є недоцільним.

Введення до рецептури м'ясо-рослинних напівфабрикатів (котлет) гідратованої суміші нуту та сочевиці, з попередньою ферментацією протеазою *Aspergillus niger*, дозволяє досягнути високих фізико-хімічних та технологічних характеристик м'ясо-рослинних напівфабрикатів.

Список літератури

1. Українець А. І., Пасічний В. М., Шведюк Д. А., Мацук Ю. А. Дослідження здатності до протеолізу м'ясних січених напівфабрикатів функціонального призначення. Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій

імені СЗ Гжицького. Серія: Харчові технології. 2017. Т. 19. № 75. С. 129–133. doi:10.15421/nvlvet7526.

2. Dos Santos Aguilar J. G., Sato H. H. Microbial proteases: production and application in obtaining protein hydrolysates. *Food Research International*. 2018. V. 103. P. 253–262. doi: 10.1016/j.foodres.2017.10.044.
3. Souza P. M., Bittencourt D., Caprara M. L., Freitas, M. D., Almeida R. P. C. D., Silveira D., Magalhães P. O. A biotechnology perspective of fungal proteases. *Brazilian Journal of Microbiology*. 2015. 46(2), P. 337–346. doi: 10.1590/S1517-838246220140359.
4. Шведюк Д. А., Пасічний В. М., Прохоренко Ж. І. Дослідження фізико-хімічних властивостей напівфабрикатів м'ясних з додаванням білково-жирових емульсій на основі купажованих жирів. *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. Харків: НТУ «ХПІ». 2016. № 42 (1214). С. 223–227. doi:10.20998/2413 4295.2016.42.36.
5. Шведюк Д. А., Пасічний В. М., Радзівська І. Г., Мазук Ю. А. Амінокислотний склад та біологічна цінність м'ясних напівфабрикатів з використанням рослинної сировини та білково-жирових емульсій. *Науковий вісник Львівського національного університету ветеринарної медицини та біотехнологій імені С. З. Гжицького. Серія: Харчові технології*. 2017. Т. 19. № 80. С. 111–114.
6. Santhi D., Kalaikannan A., Sureshkumar S. Factors influencing meat emulsion properties and product texture: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*. 2017. V. 57. №. 10. С. 2021–2027. doi: 10.1080/10408398.2013.858027.
7. Yang H., Zhang W., Li T., Zheng H., Khan M. A., Xu X., Zhou G. Effect of protein structure on water and fat distribution during meat gelling. *Food chemistry*. 2016. V. 204. P. 239–245. doi: 10.1016/j.foodchem.2016.01.053.
8. Serdaroglu M., Nacak B., Karabiyikoglu M. Effects of beef fat replacement with gelled emulsion prepared with olive oil on quality parameters of chicken patties. *Korean journal for food science of animal resources*. 2017. V. 37. №. 3. P. 376. doi: 10.5851/kosfa.2017.37.3.376.
9. Rabeler F., Feyissa A. H. Kinetic modeling of texture and color changes during thermal treatment of chicken breast meat. *Food and Bioprocess Technology*. 2018. V. 11. №. 8. P. 1495–1504. doi:10.1007/s11947-018-2123-4.
10. Пасічний В. М., Страшинський І. М., Фурсік О. П. Дослідження емульсій на основі білковмісних функціональних харчових композицій. *Технологический аудит и резервы производства*. 2015. № 3(3). С. 51–55. doi: 10.15587/2312-8372.2015.44177.
11. Paszkiewicz W., Muszyński S., Kwiecień M., Zhyla M., Świątkiewicz S., Arczewska-Włosek A., & Tomaszewska E. Effect of Soybean Meal Substitution by Raw Chickpea Seeds on Thermal Properties and Fatty Acid Composition of Subcutaneous Fat Tissue of Broiler Chickens. *Animals*. 2020. V. 10. №. 3. P. 533. doi: 10.3390/ani10030533.
12. Apajalahti J., Vienola K. Interaction between chicken intestinal microbiota and protein digestion. *Animal Feed Science and Technology*. 2016. V. 221. P. 323–330. doi: 10.1016/j.anifeeds.2016.05.004.
13. Stadnik J., Kęska P. Meat and fermented meat products as a source of bioactive peptides. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*. 2015. V. 14. №. 3. P. 181–190. doi: 10.17306/J.AFS.2015.3.19.

References (transliterated)

1. Ukrainets, A., Pasichnyi, V., Shvedyuk, D., & Matsuk, Y. Investigation of proteolysis ability of functional destined minced half-finished meat products. *Scientific Messenger of LNU of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food Technologies*, 2017, V. 19(75), p. 129–133, doi: 10.15421/nvlvet7526.
2. Dos Santos Aguilar J. G., Sato H. H. Microbial proteases: production and application in obtaining protein hydrolysates. *Food Research International*, 2018, V. 103, p. 253–262, doi: 10.1016/j.foodres.2017.10.044.
3. Souza P. M., Bittencourt D., Caprara M. L., Freitas, M. D., Almeida R. P. C. D., Silveira D., Magalhães P. O. A biotechnology perspective of fungal proteases. *Brazilian Journal of Microbiology*, 2015, 46(2), p. 337–346, doi: 10.1590/S1517-838246220140359.
4. Shvediuk D. A., Pasichnyi V. M., Prokhorenko Zh. I. Investigation of physicochemical properties of meat semi-finished products with the addition of protein-fat emulsions based on blended fats. *Bulletin of NTU «KhPI». Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU «KhPI», 2016, no. 42 (1214), p. 223–227, doi:10.20998/2413 4295.2016.42.36.
5. Shvediuk D. A., Pasichnyi V. M., Radziivska I. H., Matsuk Yu. A. Aminokyslotnyi sklad ta biolohichna tsinnist miasnykh napivfabrykativ z vykorystanniam roslynnoi syrovyni ta bilkovo-zhyrovyykh emulsiy [Amino acid composition and biological value of meat semi-finished products using vegetable raw materials and protein-fat emulsions]. *Naukovyi visnyk Lvivskoho natsionalnoho universytetu vetrynarnoi medytsyny ta biotekhnolohii imeni S. Z. Gzhytskoho. Seriiia : Kharchovi tekhnolohii [Scientific Messenger of Lviv National University of Veterinary Medicine and Biotechnologies. Series: Food technology]*, 2017, V. 19, no. 80, p. 111–114.
6. Santhi D., Kalaikannan A., Sureshkumar S. Factors influencing meat emulsion properties and product texture: A review. *Critical reviews in food science and nutrition*, 2017, V. 57, no. 10. p. 2021–2027, doi: 10.1080/10408398.2013.858027.
7. Yang, H., Zhang, W., Li, T., Zheng, H., Khan, M. A., Xu, X., ... & Zhou, G. Effect of protein structure on water and fat distribution during meat gelling. *Food chemistry*, 2016, V. 204, p. 239–245, doi:10.1016/j.foodchem.2016.01.053.
8. Serdaroglu M., Nacak B., Karabiyikoglu M. Effects of beef fat replacement with gelled emulsion prepared with olive oil on quality parameters of chicken patties. *Korean journal for food science of animal resources*, 2017, V. 37, no. 3, p. 376, doi: 10.5851/kosfa.2017.37.3.376.
9. Rabeler F., Feyissa A. H. Kinetic modeling of texture and color changes during thermal treatment of chicken breast meat. *Food and Bioprocess Technology*, 2018, V. 11, no. 8, p. 1495–1504, doi:10.1007/s11947-018-2123-4.
10. Pasichnyi V. M., Strashynskyi I. M., Fursik O. P. Doslidzhennia emulsiy na osnovi bilokvmisnykh funktsionalnykh kharchovykh kompozitsii [Research of emulsions on the basis of protein-containing functional food compositions] *Tekhnolohycheskyi audyt y rezervy proyzvodstva [Technological audit and production reserves]*, 2015, no. 3(3), p. 51–55, doi: 10.15587/2312-8372.2015.44177.
11. Paszkiewicz W., Muszyński S., Kwiecień M., Zhyla M., Świątkiewicz S., Arczewska-Włosek A., & Tomaszewska E. Effect of Soybean Meal Substitution by Raw Chickpea Seeds on Thermal Properties and Fatty Acid Composition of

- Subcutaneous Fat Tissue of Broiler Chickens. *Animals*, 2020, V. 10, no. 3, p. 533, doi: 10.3390/ani10030533.
12. Arajalahti J., Vienola K. Interaction between chicken intestinal microbiota and protein digestion. *Animal Feed Science and Technology*, 2016, V. 221, p. 323–330, doi: 10.1016/j.anifeedsci.2016.05.004.
13. Stadnik J., Kęska P. Meat and fermented meat products as a source of bioactive peptides. *Acta Scientiarum Polonorum Technologia Alimentaria*, 2015, V. 14, no. 3, p. 181–190, doi: 10.17306/J.AFS.2015.3.19.

Інформація про авторів (About authors)

Шведюк Дмитро Анатолійович – аспірант, Проблемна науково-дослідна лабораторія, Національний Університет Харчових технологій, м. Київ, України; e-mail: shvedyuk.d@ukr.net.

Dmytro Shvedyuk – postgraduate student, National University of Food Technologies, Problematic scientific-research laboratory, Kyiv, Ukraine; e-mail: shvedyuk.d@ukr.net.

Пасічний Василь Миколайович – доктор технічних наук, професор, Національний Університет Харчових технологій, завідувач кафедри Технології м'яса та м'ясних продуктів, м. Київ, Україна; e-mail: pasww1@ukr.net.

Vasyl Pasichnyi – Doctor of Science, Professor, National University of Food Technologies, Head of Department of meat and meat products, Kyiv, Ukraine; e-mail: pasww1@ukr.net.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Шведюк Д. А., Пасічний В. М. Вплив термічної обробки на характеристики січених м'ясо-рослинних напівфабрикатів з використанням ферментації. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 38– . doi:10.20998/2413-4295.2020.02.18.

Please cite this article as:

Shvedyuk D., Pasichnyi V. The influence of heat treatment on the characteristics of chopped meat and vegetable semi-finished products using fermentation. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 38– , doi:10.20998/2413-4295.2020.02.18.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Шведюк Д. А., Пасичный В. Н. Влияние термической обработки на характеристики рубленых мясорастительных полуфабрикатов с использованием ферментации. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 38– . doi: 10.20998/2413-4295.2020.02.18.

АННОТАЦІЯ В статті досліджується вплив ферментативної обробки з допомогою протеази мікробіологічного походження, продуктом *Aspergillus niger* на функціонально-технологічні та фізико-хімічні характеристики котлет, рецептура яких включає різні види м'ясної та рослинної сировини. Мікробні протеази грають важливу роль у фізіологічних процесах, мають широкі біохімічні зміни, а також спектр застосування в аналітичній та промисловій сфері. Як сировина для порівняння обрано два види сировини – м'ясо цуплять бройлерів (сміс фарша з бедра та голени 1,5: 1) та свинина нежирна. Як рослинну сировину обрано нут та чечевицю. Серед досліджуваних показників обрано: загальне вміст вологи, вологостійкість, здатність до ферментації продукту, після ферментації до термічної обробки, і після завершення термічної обробки. В результаті дослідження ефективність використання протеази *Aspergillus niger* для впливу на функціональні характеристики мясорастительних полуфабрикатів. Ні одна з отриманих партій м'ясної сировини не була заморожена. Після дроблення на волчок з діаметром решітки 6 мм, в охолоджену сировину вносили фермент (протеазу, вироблену *Aspergillus niger*) в вигляді розчину відповідно оптимального рівня для кожної групи зразків. Опіраючись на проведені дослідження, встановлено тривалість ферментації – 2 доби. Процес проводився при температурі 4–6°C. Також, в зразки вносили варену сіль в співвідношенні 2,5% до маси м'ясної сировини. Паралельно для кожної групи зразків було заплановано контрольний зразок, в який вносили лише варену сіль. Після закінчення процесу ферментації, із фаршу дослідних зразків було сформовано котлетні вироби товщиною 150–200 мм і масою 45–50 г. Отримані вироби, після упаковки в плівку, піддали термічній обробці шляхом варки в воді при температурі 75 °C впродовж 30 хв. Після цього їх охолодили при кімнатній (18–20°C) температурі впродовж 1 ч, були отримані проби для вимірювання основних функціонально-технологічних характеристик.

Ключові слова: полуфабрикати; протеази; м'ясо птиці; ферментація; термічна обробка

Надійшла (received) 03.05.2020

УДК 621.316.9

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.19

ПЕРСПЕКТИВИ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Є. В. ГОНЧАРОВ^{1*}, І. В. ПОЛЯКОВ¹, В. С. МАРКОВ¹, Н. В. КРЮКОВА¹,
Д. О. БОЙКОВ², М. К. СКРЕБЦОВ²

¹ кафедра загальної електротехніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

² кафедра двигунів внутрішнього згоряння, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА

*e-mail: e.goncharov.v@gmail.com

АНОТАЦІЯ У статті проведено аналіз існуючих технічних рішень щодо контактних та безконтактних методів контролю електромережі. З аналізу глобального ринку рішень визначено, що у енергогалузі запит на системи контролю із застосуванням безпілотних літальних апаратів має стійкі перспективи зростання. Визначено, що одним з найбільш перспективних безконтактних методів контролю ліній електропередачі є метод застосування безпілотних літальних апаратів в галузі використання сучасних методів контролю ліній електропередачі. Зроблено висновки, що вагомою перевагою безпілотних літальних апаратів є їх транспортна прохідність, що зменшує витрати та підвищує ефективність використання. У зв'язку з переходом світової електроенергетичної галузі на енергоефективні технології, використання безпілотних літальних апаратів формує значний сегмент глобального енергетичного ринку. Виробники електроенергії щорічно відшкодовують втрати в енергогалузі, пов'язані з ремонтними роботами і виплатами компенсації. Відзначено, що використання безпілотних літальних апаратів дозволяє мінімізувати капітальні витрати. Зокрема, безпілотні літальні апарати з вбудованим вогнеметом ефективно використовують в усуненні "засмічень", що обтяжують лінії електропостачання. В статті зазначено, що безпілотні літальні апарати забезпечують здійснення моніторингу рівня рослинності на ділянках енергомереж, що спрощує проведення розрахунків для реалізації інвестицій у нові електроенергетичні об'єкти. Відмічається, що за рахунок використання безпілотних літальних апаратів підвищиться безпека праці співробітників з обслуговування атомних електростанцій, зокрема з проведення висотних інспекцій роботи об'єктів та ліній електромережі. Отримані результати аналізу технічного стану використання безпілотних літальних апаратів доводять перспективність при впровадженні систем безконтактного контролю та моніторингу експлуатаційного стану ліній електропередачі.

Ключові слова: безконтактні методи контролю; безпілотний літальний апарат; лінія електропередачі; коротке замикання; потужність; енергоефективність

PROSPECTS OF MODERN REMOTE METHODS CONTROL OF POWER TRANSMISSION LINES

Ye. HONCHAROV^{1*}, I. POLYAKOV¹, V. MARKOV¹, N. KRYUKOVA¹, D. BOYKOV²,
N. SKREBTSOV²

¹ Department of Applied Electrical Engineering, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

² Department of Internal Combustion Engines, NTU «KhPI», Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The article analyzes the existing technical solutions regarding contact and non-contact methods for monitoring electrical networks. From the analysis of the global solutions market it was determined that in the energy sector the demand for control systems using unmanned aerial vehicles has stable growth prospects. It is determined that one of the most promising non-contact methods for monitoring power lines is the method of using unmanned aerial vehicles in the field of application of modern methods for monitoring power lines. It is concluded that a significant advantage of unmanned aerial vehicles is their transport cross-country ability, which reduces costs and increases efficiency. In connection with the transition of the global electric power industry to energy-efficient technologies, the using of unmanned aerial vehicles forms a significant segment of the global energy market. Electric power producers annually compensate for losses in energy sectors associated with repair robots and compensation payments. It is noted that the use of unmanned aerial vehicles allows to minimizing investment. In particular, unmanned aerial vehicles with a built-in flamethrower are effectively used to eliminate "blockages", which burden the power lines. It is noted in the article, that unmanned aerial vehicles provide monitoring of the level of vegetation in the areas of energy networks, which simplifies the calculations for the implementation of investments in new electricity facilities. In particular, through the use of unmanned aerial vehicles, it is possible to increase the safety of employees serving nuclear power plants, in particular for conducting high-altitude inspections of facilities and power lines. The results of the analysis of the technical condition of the use of unmanned aerial vehicles prove the promise in the implementation of contactless monitoring systems and monitoring the operational status of power lines.

Keywords: contactless control methods; unmanned aerial vehicle; power line; short circuit; power; energy efficiency

Вступ

При експлуатації ліній електропередачі (ЛЕП) виникають складнощі, які потребують своєчасного виявлення, а також впровадження заходів щодо їх

своєчасного усунення. Найбільший розвиток щодо вирішення задач з обслуговування ЛЕП набув контроль об'єктів енергетики, який є пріоритетним і в Україні.

Вирішення вказаних питань потребує використання сучасних досягнень науки і техніки, новітніх інформаційно-вимірювальних технологій. Їх ефективність залежить від стану розроблення і застосування апаратно-програмних вимірювальних комплексів та систем.

З розроблення систем моніторингу було запропоновано телеметричний контроль параметрів проводів ЛЕП, де струм у проводах ЛЕП є контрольованим параметром за допомогою телеметричного радіоканалу. До цього методу відноситься система дистанційного вимірювання струму у проводах з передачею виміряного значення по радіоканалу, яка захищена американським патентом (Remote measuring system). На базі чого пізніше було розроблено систему, в якій використовувалася транзисторна елементна база [1].

Мета статті

Метою статті є аналіз існуючих методів та систем дистанційного контролю ліній електропередачі. Задача роботи – порівняння існуючих систем моніторингу стану ліній електропередачі з методом заснованим на використанні безпілотних літальних апаратів.

Системи контролю ліній електропередачі

В даний час у всьому світі знаходять широке застосування різні системи моніторингу повітряних ЛЕП, що забезпечують системного оператора докладними відомостями про поточний стан повітряних кабельних мереж електропостачання. Система моніторингу складається з мережі вимірювальних блоків, пов'язаних через канал зв'язку з обладнанням на диспетчерському пункті. Диспетчерські пункти розташовані у вузлових точках мереж перерозподілу енергії. В даний час в них, як правило, використовуються системи SCADA, що забезпечують обробку та інтерпретацію отриманих від вимірювальних блоків даних.

У вимірювальний блок входять такі базові компоненти:

- група датчиків для вимірювання основних поточних параметрів провідної лінії;
- процесорний модуль для обробки виміряних даних;
- система передачі даних;
- модуль автономного живлення.

При діагностиці роботи ліній електропередачі звертають увагу на параметри: сила струму в електромережах; температури проводів; натяг проводів; критичне розхитування проводів; критичне провисання проводів; обмерзання проводів.

Для забезпечення відстеження перелічених параметрів в системах моніторингу можуть використовуватися різні типи датчиків: для вимірювання струму в проводі (вимірювання струму здійснюється безконтактним методом, для чого

використовуються датчики на основі ефекту Холла або котушки Роговського); температури проводів у прольоті; механічної напруги проводу в точках підвісу (тензодатчики) для вимірювання стріл провисання; вібраційних характеристик проводів (акселерометри).

У сучасний період для передачі даних в системах моніторингу високовольтної лінії в основному використовуються безпроводні канали зв'язку – це GSM або ж ISM-радіомодеми, що працюють на частотах до 2,4 ГГц.

GSM-модеми використовуються для передачі даних в системах моніторингу. У перших моделей можливості були обмежені передачею SMS-повідомлень і даних в аналоговому режимі. Система GPRS реалізує пакетну комутацію на всьому протязі каналу зв'язку, істотно оптимізуючи послуги передачі даних в мережах стандарту GSM. Вона практично миттєво встановлює з'єднання, що використовує мережеві ресурси і займає ділянку діапазону частот тільки в моменти фактичної передачі даних, що гарантує надзвичайно ефективне використання доступної смуги частот [2].

Кожна з систем відповідає вимогам контролю ЛЕП, які відрізняються за різноманітними параметрами та характеристиками. У статті розглянуто чотири системи контролю ЛЕП:

- система моніторингу "CAT-1";
- безконтактні вимірювачі з OTML-модулем;
- система моніторингу стану повітряних ліній "DiLin";
- система моніторингу стану проводів за допомогою безпілотних авіаційних комплексів (БАК).

Система моніторингу "CAT-1". Однією з перших комерційних систем моніторингу стала система "CAT-1", розроблена в 1991 р. американською компанією The Valley Group, Inc [2]. В даний час у всьому світі використовується понад 300 систем моніторингу "CAT-1". Система забезпечує моніторинг у реальному часі погодних умов і натягу проводів в точках кріплення до опор та працює при безпосередньому контакті модуля діагностики з електричними проводами, який монтується на опорі ЛЕП.

Датчики вимірювання напруги проводів являють собою тензодатчики в корпусі з нержавіючої сталі з кріпильними отворами, що встановлюються між ізолятором і опорою (рис. 1).

Основою тензодатчиків є вимірювальний перетворювач, ізольований від основної частини пристрою і захищений іскровим розрядником, він має захист від впливу електромагнітних полів і перехідних процесів. Для підключення до основного модуля датчики комплектуються спеціальним кабелем довжиною 24 метри. Основний модуль "CAT-1" складається з вологостійкого алюмінієвого корпусу з блоком електроніки, вбудованого модему, антен для передачі даних і кріпильних елементів. Модуль призначений для експлуатації в діапазоні

температур навколишнього середовища $-40...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$ [3,4]. Для безперервної роботи модуль використовує зарядний пристрій для 12 акумуляторних батарей та панелі сонячних батарей (рис. 2).

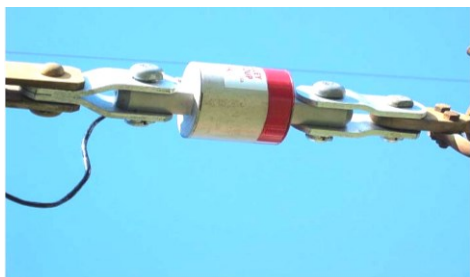


Рис. 1 – Датчики вимірювання напруги проводів



Рис. 2 – Панелі сонячної батареї модуля живлення системи "CAT-1"

Безконтактні вимірювачі з OTML-модулем.

OTML-модуль (Overhead Transmission Line Monitoring) – безконтактна система моніторингу ЛЕП, що конструктивно монтується на високовольтні проводи (рис. 3). Заміри сили струму в проводах та температури проводу проводяться в фіксованих точках. Дані вимірювань передаються в диспетчерський пункт, який обладнано системою "SCADA" через стандартний IEC-протокол (дані поступають через web-браузер) [5-7].

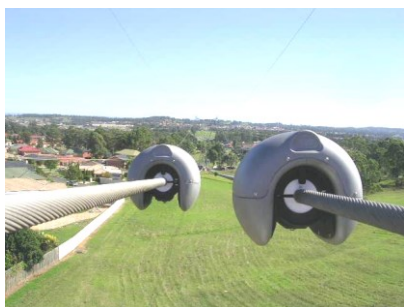


Рис. 3 – Безконтактні OTML-модулі

Вимірювання струму в проводі і живлення модуля здійснюється безконтактно. Живлення приладу здійснюється від енергії, одержуваної від проводу через струмовий трансформатор.

Основні характеристики вимірювального OTLM-модуля:

- діаметр капсули 305 мм;
- довжина 300 мм;

- вага капсули 10 кг;
- діапазон застосування на лініях ЛЕП до 420 кВ;
- частота 50 Гц;
- діаметр струмопровідного проводу 10-50 мм;
- діапазон робочих струмів 50-1100 А;
- діапазон вимірювання температури проводу $-40...+125\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- діапазон робочих температур $-40...+70\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- точність вимірювання температури до $1\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- GSM канал передачі даних (900/1900 МГц);
- протокол передачі SMS/GPRS.

Отримана енергія використовується для живлення всього пристрою, тобто зовнішніх джерел живлення не потрібно. Виміряні значення струму і температури прив'язані, таким чином, до конкретних координат положення блоку на ЛЕП та мітках точного часу.

Вимірювач струму містить первинний перетворювач магнітного поля в електричний сигнал на основі ефекту Холла, принаймні, одну керуючу польову систему типу метал-діелектрик-напівпровідник, струмопровідну шину, сформовану в одному напівпровідниковому чіпі з первинним перетворювачем магнітного поля у вигляді плоскої металевої стрічки, ізолюваною діелектричною плівкою від напівпровідника і навколишнього середовища, з контактами на кінцях.

Затвор, принаймні, однієї з систем метал-діелектрик-напівпровідник виготовлений з металу з високою магнітною проникністю, один кінець якого розташований над центральною частиною перетворювача магнітного поля, а інший розташований над вкритою діелектричною плівкою поверхнею струмопровідної шини та перекриває її.

Система моніторингу і діагностики технічного стану повітряних ліній "DiLin".

Для моніторингу довгих і розгалужених мереж використовується система моніторингу технічного стану повітряних ліній "DiLin" [8].

Система моніторингу стану повітряних ліній "DiLin" забезпечує:

- визначення поточної технологічної спроможності лінії забезпечувати підвищену пропускну здатність;
- проведення оперативної оцінки стану ізоляції ЛЕП, виявлення дефектів, оцінки ступеня розвитку дефектів;
- реєстрації перехідних процесів у лінії з метою точної локації місць виникнення дефектів вздовж ліній;
- підготовки конкретних рекомендацій по плануванню і проведенню ремонтних робіт;
- створення умов для комплексного аналізу роботи шляхів транзиту електричної енергії на основі прогнозування зміни технічного стану повітряних ліній.

Система DiLin складається з трьох основних елементів:

1) DiLin-Sensor – первинні датчики системи моніторингу, монтовані на проводах контрольованої повітряної лінії. Вся зареєстрована і оброблена датчиками інформація передається в систему по радіоканалу.

2) DiLin-Observer – локальний центральний модуль системи моніторингу, призначений для збору інформації з первинних датчиків марки DiLin-Sensor. Монтується на кожній стороні лінії, збирає і передає інформацію в комп'ютер системи.

3) комплекс програм марки “DiLin-inv” – математичне забезпечення верхнього рівня, що об'єднує інформацію від локальних вузлів DiLin-Observer, що реалізує комплексні діагностичні функції системи.

За допомогою датчика DiLin-Sensor, що монтується на проводах лінії, проводиться реєстрація і аналіз комплексної інформації про технічний стан ЛЕП:

- температура проводів ЛЕП;
- величина струму в лінії;
- механічні 3D коливання проводів;
- параметри навколишнього повітря - температура і вологість;
- наявність обледеніння проводів;
- локація місць виникнення дефектів в лінії.

Датчик DiLin-Sensor виготовлений у вигляді циліндра, що монтується на проводах ЛЕП, має діаметр 200 мм і завдовжки 300 мм. Конструкція датчика DiLin-Sensor наведена на рис. 4.



Рис. 4 – Датчик DiLin-Sensor

Живлення всіх електронних компонентів датчика здійснюється від струму навантаження, що протікає у проводах ЛЕП. Для передачі зареєстрованої інформації “на землю” використовується стандартний радіоканал або GSM зв'язок.

Вбудований датчик модуля радіозв'язку реалізує протокол ZigBee [9, 10]. Потужність передавача достатня для організації надійного зв'язку з максимальною відстанню між датчиками і базовим приладом DiLin-Observer до 1500 метрів.

Технічні параметри системи “DiLin”:

- робоча напруга лінії від 35 кВ;
- струм навантаження в лінії не менш 40 А;
- довжина контрольованої лінії до 100 км;
- частота імпульсів розрядів 0,5...15,0 МГц;
- похибка розрахунку місця дефекту $\pm 1\%$ довжини;

- діапазон робочих температур $-40...+60\text{ }^{\circ}\text{C}$;
- габаритні розміри DiLin-Sensor 240x240x580 мм;
- маса датчика DiLin-Sensor 15 кг;
- розміри DiLin-Observer 520x435x230 мм;
- маса у шафі DiLin-Observer 25 кг.

Моніторинг за допомогою безпілотних авіаційних комплексів

Актуальною є науково-технічна проблема, що полягає у створенні теоретичних засад, розробленні та практичному застосуванні мобільних комп'ютеризованих інформаційно-вимірювальних систем (КІВС) контролю, що забезпечують дистанційне визначення характеристик довкілля просторово розгалужених об'єктів енергетики з використанням БАК [11].

Розв'язання цієї проблеми спрямоване на створення та практичне застосування нового класу мобільних КІВС для дистанційного контролю на базі БАК, що забезпечить використання можливостей сучасних технологій контролю та вимірювань в автоматизованому режимі, функціонування систем у важкодоступних місцях та за умов техногенної небезпеки, багатофункціональність (адаптацію) призначення за рахунок зміни модулів сенсорних підсистем, проведення динамічних вимірювань у 3D просторових координатах.

Причинами, що викликають відключення ЛЕП, є такі ушкодження:

- пошкодження проводів – 56 %;
- пробій ізоляторів – 19 %;
- пошкодження опор – 15 %;
- пошкодження інших елементів ЛЕП – 10 %.

Для контролю характеристик довкілля просторово розгалужених об'єктів енергетики за останній час розроблені методи побудови КІВС на базі БАК [12]. При цьому основною складовою БАК є безпілотний літальний апарат (БПЛА) (рис. 5).



Рис. 5 – Контроль стану ЛЕП за допомогою БПЛА

Технічні характеристики розробленого БПЛА: злітна маса – 3,5 кг; маса планера – 1,5 кг; розмах крила – 1,8 м; довжина – 1,6 м; маса корисного навантаження $\leq 2\text{ кг}$; час польоту з вантажем 1 кг $\leq 60\text{ хв.}$; швидкість польоту 40–150 км/год; практична стеля $\leq 2000\text{ м}$; час підготовки до польоту $\leq 10\text{ хв.}$

Мобільна КІВС для контролю характеристик довкілля об'єктів задовольняє низці вимог: мобільності; дистанційності; безпеки життєдіяльності; можливості автономної роботи; переміщення сенсорів вимірювання фізичних величин у 3D просторі.

Використання БПЛА мультироторного типу дає можливість зробити понад 1000 тепловізійних знімків вказаних об'єктів при висоті польоту БПЛА від 30 до 100 м. Також типові тепловізійні зображення ділянок ЛЕП дозволяють спостерігати зміну температури проводів, що зумовлено зміною струмових навантажень.

Практичне застосування БПЛА, на відміну від існуючих засобів, забезпечує швидке проведення дистанційного температурного моніторингу протяжних об'єктів ЛЕП у важкодоступних та небезпечних місцях. БПЛА можуть із заданою періодичністю проводити аерофотозйомку досліджуваних об'єктів в оптичному та інфрачервоному діапазонах і вимірювати напруженості їх електричних та магнітних полів.

Безпілотні літальні апарати з вбудованим вогнеметом можуть використовуватись для усунення "засмічень", що обтяжують лінії електропостачання.

За допомогою визначення розподілу напруженості електричного та магнітного поля при роботі ЛЕП, отриманих в результаті вимірювань, а також достовірних схем систем захисту та електромережі складаються плани безпеки переміщення технічних працівників високовольтних підстанцій, а також розташування обладнання, яке особливо чутливе до можливого електромагнітного впливу.

За рахунок використання безпілотних літальних апаратів підвищиться безпека праці співробітників з обслуговування атомних електростанцій, зокрема з проведення висотних інспекцій роботи об'єктів та ліній електромережі, враховуючи сучасні вимоги з балансування енергосистеми.

У наведеній нижче табл. 1 подано порівняння цих чотирьох систем моніторингу. Багатофункціональність системи означає її застосування не тільки для контролю ЛЕП, але також для моніторингу параметрів іншого електрообладнання. Спеціалізовані системи відповідають за збір та обробку інформації безпосередньо ліній електропередачі.

Багатопараметровість означає відстеження декількох параметрів одночасно. У табл. 2 подана більш детальна інформація щодо реєстрації та обробки даних системою за наведеним параметром.

З урахуванням наведених показників для систем, можливо вибрати найбільш доцільну систему контролю стану ЛЕП, яка буде відповідати вимогам моніторингу в реальних умовах для конкретних об'єктів. Слід також підкреслити, що усі сучасні системи контролю забезпечують безпеку процесу

моніторингу для людини, що відповідає за проведення робіт по контролю стану ЛЕП.

Таблиця 1 – Порівняння систем моніторингу

Системи контролю ЛЕП	Багато-функціональність (б) або спеціалізованість (с)	Багато-параметровість	Безконтактне (б) або контактне (к) виконання
CAT-1	с	+	к
OTML-модуль	с	+	б
DiLin	с	+	к
За допомогою БАК	б	+	б

Таблиця 2 – Порівняння параметрів систем моніторингу

Системи контролю ЛЕП	Температура	Сила струму	Механічне коливання	Наявність обледеніння	Локація дефектів проводів
CAT-1	+	+	+	+	+
OTML-модуль	+	+	-	-	-
DiLin	+	+	+	+	+
За допомогою БАК	+	+	+	+	+

Крім того, БПЛА можуть забезпечити моніторинг рослинності по ділянках ЛЕП, що спрощує проведення розрахунків для реалізації нових електроенергетичних проектів.

На БПЛА встановлені камери високої роздільної здатності, які фіксують найменші деталі. БПЛА охоплюють ділянку лінії в 10 кілометрів – по 5 в кожен сторону. БПЛА літають на висоті близько 100 метрів та проводять моніторинг стану повітряних високовольтних ліній для запобігання від ушкоджень. Це дозволяє персоналу АК "Харківобленерго", перебуваючи на землі, за допомогою БПЛА відстежувати технічний стан елементів конструкцій [13].

Висновки

Напрямки з розвитку та удосконалення систем контролю ЛЕП пов'язані з постійним зростанням загальної протяжності електромереж. З сучасних методів діагностики стану ЛЕП за багатофункційністю до найбільш перспективних відноситься системи моніторингу з використанням безпілотних літальних апаратів. При цьому використовується не тільки контроль стану ЛЕП, а також відбувається реєстрації часткових розрядів оптичною реєстрацією за допомогою тепловізорів.

Список літератури

1. Momoh J. Smart Grid Design for Efficient and Flexible Power Networks Operation and Control. *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*. 2009. vol. 8, no. 1, P. 18-28. doi: 10.1109/PSCE.2009.4840074.
2. Yang Yang, Guangzhong Xie, Xiangdong Xu, Yadong Jiang. A Monitoring System Design in Transmission Lines based on Wireless Sensor Networks. *Energy Procedia*. 2011. 12. P. 192-199. doi: 10.1016/j.egypro.2011.10.027.
3. Nazare F. V. B., Werneck M. M. Temperature and Current Monitoring System for Transmission Lines Using Power-over-Fiber Technology. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*. 2010. doi: 10.1109/IMTC.2010.5488198.
4. Костиков И. Система мониторинга CAT-1 – повышение пропускной способности и надежности в ЛЭП. *Энергетика*. 2011. № 3 (38).
5. Power Donut2™ System for Overhead Transmission Line Monitoring. Product Overview. URL: www.usi-power.com.
6. Kryukova N. V., Goncharov E. V., Polyakov I. V. Modern Monitoring Systems of Electric Power Lines. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції. Ч. 2 (16–18 травня 2018 р., Харків)*. Харків: НТУ «ХПІ», 2018. С. 86.
7. Grozev D., Spasov G., Shopov M., Kakanakov N., Petrova G. Experimental study of Cloud Computing based SCADA in Electrical Power Systems. *IEEE XXV International Scientific Conference Electronics (ET)*. 2016. doi: 10.1109/ET.2016.7753482.
8. Диагностические решения в энергетике. URL: <https://dimrus.ru/dilin.html>.
9. Zhang Gang, Liu Shuguang. Study on electrical switching device junction temperature monitoring system based on Zigbee technology. *IEEE International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*. 2010. doi: 10.1109/ICCASM.2010.5620444.
10. Degang Gan, Fan Liu, Lin Du, Yuming Liu Research and implementation of on-line monitoring techniques for high voltage equipments in Smart Grid. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*. 2010. doi: 10.1109/ICHVE.2010.5640822.
11. Сокол Е. И., Резинкина М. М., Гриб О. Г. и др. Методика комплексного автоматизированного мониторинга объектов энергетической системы Украины с целью повышения безопасности ее функционирования. *Електротехніка і Електромеханіка*. 2016. № 2. С. 65-69. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.12.
12. Бабак В. П. Мобільний дистанційний моніторинг довкілля об'єктів енергетики. URL: https://er.knurd.edu.ua/bitstream/123456789/6652/1/MSIE2017_P015-017.pdf.
13. В Харьковской области за электросетями следят беспилотники. URL: <https://2day.kh.ua/v-harkovskoj-oblasti-za-elektrosetyami-sledyat-bespilotniki/>.

References (transliterated)

1. Momoh J. Smart Grid Design for Efficient and Flexible Power Networks Operation and Control. *IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, 2009, vol. 8, no. 1, pp. 18-28, doi: 10.1109/PSCE.2009.4840074.
2. Yang Yang, Guangzhong Xie, Xiangdong Xu, Yadong Jiang. A Monitoring System Design in Transmission Lines based on Wireless Sensor Networks. *Energy Procedia*, 2011, 12, pp. 192-199, doi:10.1016/j.egypro.2011.10.027.
3. Nazare F. V. B., Werneck M. M. Temperature and Current Monitoring System for Transmission Lines Using Power-over-Fiber Technology. *IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 2010, doi: 10.1109/IMTC.2010.5488198.
4. Kostikov I. Monitoring system CAT-1 – increasing throughput and reliability in power transmission lines. *Energetics*, 2011, no 3 (38).
5. Power Donut2™ System for Overhead Transmission Line Monitoring. Product Overview. Available at: www.usi-power.com.
6. Kryukova N. V., Goncharov E. V., Polyakov I. V. Modern Monitoring Systems of Electric Power Lines. *Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я. Тези доповідей XXVI міжнародної науково-практичної конференції. Ч. 1 (16–18 травня 2018 р., Харків)* [Information technology: science, engineering, technology, education, health. Abstracts of the XXVI Int. Sci.-Pract. Conf. Part 2 (16–18 May 2018, Kharkov)]. Kharkiv, NTU "KhPI" Publ., 2018, p. 86.
7. Grozev D., Spasov G., Shopov M., Kakanakov N., Petrova G. Experimental study of Cloud Computing based SCADA in Electrical Power Systems. *IEEE XXV International Scientific Conference Electronics (ET)*, 2016, doi: 10.1109/ET.2016.7753482.
8. Diagnostic solutions in the energy sector. Available at: <https://dimrus.ru/dilin.html>.
9. Zhang Gang, Liu Shuguang. Study on electrical switching device junction temperature monitoring system based on Zigbee technology. *IEEE International Conference on Computer Application and System Modeling (ICCASM 2010)*, 2010, doi: 10.1109/ICCASM.2010.5620444.
10. Degang Gan, Fan Liu, Lin Du, Yuming Liu Research and implementation of on-line monitoring techniques for high voltage equipments in Smart Grid. *IEEE International Conference on High Voltage Engineering and Application*, 2010, doi: 10.1109/ICHVE.2010.5640822.
11. Sokol E. I., Rezinkina M. M., Gryb O. G. and et al. A method of complex automated monitoring of Ukrainian power energy system objects to increase its operation safety. *Electrical engineering & Electromechanics*. 2016. no 2. P. 65-69. doi: 10.20998/2074-272X.2016.2.12.
12. Babak V. P. Mobile remote monitoring of energy technologies. Available at: https://er.knurd.edu.ua/bitstream/123456789/6652/1/MSIE2017_P015-017.pdf.
13. In the Kharkiv region, drones are monitoring electric networks. Available at: <https://2day.kh.ua/v-harkovskoj-oblasti-za-elektrosetyami-sledyat-bespilotniki/>.

Відомості про авторів (About the Authors)

Гончаров Євген Вікторович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, доцент кафедри загальної електротехніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-1924-8906; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Yevgen Honcharov – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Applied Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-1924-8906; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Поляков Ігор Володимирович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, доцент кафедри загальної електротехніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0001-9329-1705; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Igor Polyakov – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Applied Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0001-9329-1705; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Марков Владислав Сергійович – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, доцент кафедри загальної електротехніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0703-0918; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Vladislav Markov – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Applied Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-0703-0918; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Крюкова Наталія Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, доцент кафедри загальної електротехніки, м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-4600-1159; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Natalia Kryukova – Candidate of Engineering Science (Ph. D.), Associate Professor, Department of Applied Electrical Engineering, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; ORCID: 0000-0003-4600-1159; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Бойков Дмитро Олександрович – студент бакалаврата, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, кафедри двигунів внутрішнього згоряння, м. Харків, Україна; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Dmitry Boykov – bachelor student, Department of Internal Combustion Engines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Скребцов Микита Костянтинович – студент бакалаврата, Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, кафедри двигунів внутрішнього згоряння, м. Харків, Україна; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Nikita Skrebtsov – bachelor student, Department of Internal Combustion Engines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: e.goncharov.v@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю наступним чином:

Гончаров Є. В., Поляков І. В., Марков В. С., Крюкова Н. В., Бойков Д. О., Скребцов М. К. Перспективи сучасних методів дистанційного контролю ліній електропередачі. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 5–5. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.19.

Please cite this article as:

Honcharov Ye., Polyakov I., Markov V., Kryukova N., Boykov D., Skrebtsov N. Prospects of Modern Remote Methods Control of Power Transmission Lines. *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 5–5, doi:10.20998/2413-4295.2020.02.19.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Гончаров Е. В., Поляков И. В., Марков В. С., Крюкова Н. В., Бойков Д. А., Скребцов Н. К. Перспективы современных методов дистанционного контроля линий электропередачи. *Вестник Национального технического университета «ХПИ»*. Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2020. № 2 (4). С. 5–5. doi:10.20998/2413-4295.2020.02.19.

АННОТАЦІЯ В статті проведено аналіз існуючих технічних рішень щодо контактних і бесконтактних методів контролю електричних мереж. З аналізу глобального ринку рішень визначено, що в енергогосподарстві запит на системи контролю з використанням безпілотних літальних апаратів має стійкі перспективи зростання. Визначено, що одним з найбільш перспективних бесконтактних методів контролю ліній електропередачі є метод застосування безпілотних літальних апаратів в області застосування сучасних методів контролю ліній електропередачі. Сделано висновок, що вагомим перевагою безпілотних літальних апаратів є їх транспортна проходимость, яка зменшує витрати і підвищує ефективність використання. В зв'язі з переходом світової електроенергетичної області на енергоефективні технології, застосування безпілотних літальних апаратів формує значущий сегмент глобального енергетичного ринку. Виробники електроенергії щороку несуть втрати в енергогосподарстві, пов'язані з ремонтними роботами і виплатами компенсацій. Відзначено, що використання безпілотних літальних апаратів дозволяє мінімізувати капітальні витрати. В частині, безпілотні літальні апарати зі вбудованим оптоелектронним датчиком ефективно використовують для усунення “засорення”, що навантажують лінії електропостачання. В статті відзначено, що безпілотні літальні апарати забезпечують виконання моніторингу рівня вологості на ділянках енергосетей, що спрощує проведення розрахунків для реалізації інвестицій в нові електроенергетичні об'єкти. Відзначено, що за рахунок застосування безпілотних літальних апаратів можна підвищити безпеку роботи персоналу при обслуговуванні атомних електростанцій, в частині проведення робіт висотних інспекцій об'єктів і ліній електромереж. Отримані результати аналізу технічного стану застосування безпілотних літальних апаратів свідчать про перспективність при впровадженні систем бесконтактного контролю і моніторингу експлуатаційного стану ліній електропередачі.

Ключові слова: бесконтактні методи контролю; безпілотний літальний апарат; лінія електропередачі; коротке замикання; потужність, енергоефективність

Надійшла (received) 16.04.2020

УДК 621.315

doi:10.20998/2413-4295.2020.02.20

СТАТИСТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОСУВАННЯ БЛИСКАВКИ В НАПРЯМКУ НАЗЕМНИХ ОБ'ЄКТІВ

С. А. ЛИТВИНЕНКО

кафедра теоретичних основ електротехніки, НТУ «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
e-mail: svetlitynenkoua@gmail.com

АНОТАЦІЯ Запропоновано огляд методів фізичного та математичного моделювання процесу просування лідера блискавки з метою порівняння ефективності їхнього застосування при обранні засобу блискавкозахисту наземного об'єкта: дослідження фізичних процесів з використанням тригерної блискавки, запущеної ракетою, моделювання з використанням електро-геометричних методів та фрактальних моделей, та ін. Докладно розглянуто статистичне моделювання, яке описує процес просування лідера блискавки на останній фазі в напрямку наземного об'єкта, з урахуванням стохастичного характеру просування лідера на попередньому етапі. За використання статистичного моделювання є можливим обчислення часу просування низхідного лідера блискавки з висоти, на якій відбувається орієнтування на об'єкт, з урахуванням можливості виникнення від об'єкту зустрічного лідера протилежної полярності. Обчислений масив часу просування каналу лідера від кожної точки грозової хмари використаний при обчисленні ймовірності прикріплення низхідного лідера до наземного об'єкта за використання критерію «найбільший час-найменша ймовірність». Моделювання виконується з використанням систематизованих експериментальних даних, отриманих при численних дослідженнях тих електрофізичних процесів, які визначають напрямок просування лідерного каналу блискавки та визначають момент та місце в просторі початку орієнтування лідера на об'єкт: розподіл напруженості електричного поля навколо верхівки лідера та у повітряному проміжку, струм зворотного удару, рівень потенціалу верхівки каналу лідера, зміна швидкості просування лідерного каналу та ін. Використання інформації про статистичний розподіл величин струмів та потенціалів дозволило обчислити ймовірність ураження кожної ділянки об'єкту, враховуючи також і бічні удари. Розрахунки показали можливість використання запропонованої методики для оцінки ефективності системи блискавкозахисту при проектуванні через порівняння ймовірності ураження наземного об'єкта та середньорічної кількості прогнозованих ударів для різних систем блискавкозахисту.

Ключові слова: статистичне моделювання; електрофізичні процеси; лідерний канал блискавки; блискавкозахист; ймовірність ураження блискавою; прогнозована кількість ударів

STATISTICAL MODELING OF LIGHTNING PROPAGATION IN THE DIRECTION OF GROUND OBJECTS

S. LYTVYNYENKO

Department of Theoretical Electrical Engineering, NTU "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT An overview of physical and mathematical modeling methods of lightning leader propagation process in order to compare the effectiveness of their application in the selection of ground object lightning protection is proposed: the study of physical processes using a trigger lightning, launched by a rocket, modeling using electro-geometric methods and fractal models. Detailed statistical modeling that describes the process of moving the lightning leader in the last phase toward the grounded object is considered in detail. The stochastic nature of the leader propagation in the previous stage was used. Using statistical modeling, it is possible to calculate the time of the downward lightning leader propagation from the height at which the leader is oriented to the object, taking into account the possibility of the opposite polarity upward leader emerging from the grounded object. The calculated time of the leader channel propagation from each point in the thunderstorm cloud was used to calculate the probability of attaching a downward leader to a grounded object using the "highest time-least probability" criterion. The performed simulation is using systematic experimental data obtained from numerous studies of those electrophysical processes that determine the direction of the lightning channel propagation and determine the moment and place in the space of the initial orientation of the leader to the object: the distribution of electric field strength around the top of the leader and in the air gap, return stroke current, the level of the leader channel top potential, change of the leader channel propagation speed, etc. The use of information on the statistical distribution of currents and potentials made it possible to calculate the predicted probability of damage to each section of the object, including side impacts. The calculations showed the possibility of using the proposed methodology to evaluate the effectiveness of a lightning protection system in designing by comparing the probability of hitting a ground object and the average annual number of projected impacts for different lightning protection systems.

Keywords: statistical modeling; electrophysical processes; lightning channel leader; lightning protection; lightning strokes probability; predicted number of strokes

Вступ

Наближення низхідного лідера блискавки до землі призводить до збільшення напруженості електричного поля (ЕП) навколо заземлених об'єктів, що може спричинити виникнення висхідних лідерів та подальше прикріплення низхідного лідера до об'єкта.

З метою прогнозування місця ураження застосовується фізичне та математичне моделювання процесу просування лідерів блискавки в просторі між грозовою хмарою та землею.

Для дослідження фізичних процесів, які викликають появу та розвиток низхідних та зустрічних лідерів, проводиться фізичне моделювання розрядів в

великих проміжках в польових умовах. В [1] наведені результати експериментів із запуску блискавки, ініційованої ракетою, на лінії електропередачі з вимірюванням струму зворотного ходу для більш ніж 200 випадків зворотного удару. Зі статистичного аналізу отриманих даних зроблені висновки про зв'язок між величиною пікового струму зворотного ходу та перенесеним за першу 1 мс від початку зворотного ходу зарядом, також різний час наростання струму зворотного ходу для ударів по землі (0,4 мс) та в лінію електропередачі (1,2 мс) виявив зв'язок з електричними властивостями ураженого об'єкту. В [2] при дослідженні процесів прикріплення блискавки, запущеної ракетою, отримані виміри висоти початку зворотного ходу (23 м), початкової швидкості першого зворотного ходу $1,4 \cdot 10^8$ м/с та початкової швидкості поширення низхідного лідера $2,2 \cdot 10^7$ м/с. Результатом дослідження в [3] процесів розвитку двонаправленого лідера, приєднання низхідного лідера до землі є отримані за допомогою високошвидкісної камери виміри зміни швидкості просування лідерів обох полярностей, виміри розмірів лідерів на окремих стадіях (початковій та передпробійній). Надані криві зміни напруженості та швидкості просування лідерів в часі. Інформація, отримана з цих експериментів, може бути використана при аналізі процесу вибору місця можливого удару блискавки за різних конструкцій систем блискавкозахисту.

У вітчизняних та міжнародних стандартах з блискавкозахисту [4,5] для проектування систем захисту об'єктів від ураження блискавою використовують електро-геометричні методи, які дозволяють змоделювати процес поширення блискавки з урахуванням величини максимального значення струму зворотного удару та габаритів об'єкта захисту. Застосований підхід заснований на зв'язку між відстанню, з якої відбувається орієнтування блискавки на заземлений об'єкт, та формою та габаритами самого об'єкта. Цей метод не враховує фізичні процеси, які супроводжують просування лідера блискавки, отже є не достатньо точним з точки зору прогнозування місця удару та визначення ефективності системи блискавкозахисту. Електро-геометричний метод став основою для розробки методу сфер кочення [6,7]. За цим методом місце прикріплення низхідного ступінчастого лідера визначається критичною відстанню до заземленого об'єкта. Ця відстань обумовлена максимальним значенням струму зворотного удару та є радіусом уявної сфери, яка використовується для визначення захищених та незахищених зон об'єкта. Система блискавкозахисту проектується з урахуванням співвідношення між габаритами заземленого об'єкту та радіусом сфери. Але такі методи моделювання розвитку лідера є узагальненими та не враховують зміни таких фізичних параметрів, як потенціал верхівки низхідного лідера та швидкість поширення лідера, рівень напруженості ЕП в зоні поширення ступінчастого низхідного лідера. Це може призвести

до помилкових висновків з приводу відстані, на якій виконуються умови останнього стрибка, та ймовірного місця ураження об'єкту.

Розроблена в [8] фізична та математична моделі двостороннього лідера тригерної блискавки дозволила дослідити процес розвитку низхідного лідера від старту до моменту прикріплення до наземного об'єкту. Зафіксовано швидкість зміни рівня напруженості навколо заземленого об'єкта при наближенні низхідного лідера (від 30 кВ/м до 121 кВ/м). Процес виникнення та поширення зустрічного висхідного лідера від проводу довжиною 50 м супроводжувався збільшенням напруженості ЕП від 10 кВ/м до 45 кВ/м в момент прикріплення лідерів та імпульсами струму висхідного лідера шириною 20 мкс та з амплітудою, що збільшувалась до 200 А. Чисельне моделювання базувалось на представленні лідерів як заряджених осей, що просуваються в осьовому напрямку. Розподіл напруженості ЕП та потенціалів визначався з використанням методу моделювання зарядів (CSM). Рівень напруженості ЕП визначався як сума трьох компонентів: ЕП навколишнього середовища, ЕП двонаправленого лідера, обчисленого за спрощеною моделлю, локального ЕП, спричиненого каналом лідера та об'ємним зарядом зони корони. Такий спосіб моделювання процесу просування лідера в напрямку землі є надто спрощеним, бо не враховує стохастичний характер процесу просування та не дає можливості використання цього методу для визначення ймовірного місця удару блискавки.

Іншим підходом до моделювання лідерного каналу блискавки є використання фрактальної моделі [9]. В цій моделі враховано, що шлях блискавки до останнього етапу має стохастичний характер. Такі параметри як напрямок просування та ступінь розгалуженості лідера обумовлені зміною потенціалу його верхівки, їх визначають критична для просування лідера напруженість ЕП в повітряному проміжку, напруженість ЕП каналу лідера, його полярність, напруженість ЕП перед верхівкою лідерного каналу, відстань між верхівкою каналу та заземленим об'єктом. Умовою появи та розвитку висхідних лідерів від заземлених конструкцій при цьому є критична напруженість ЕП та фіксована критична відстань, виміри яких були проведені в експериментальних дослідженнях. Фрактальна модель дає змогу моделювати неповні розряди та відхилення каналів від ліній поля, що спричиняють бічні удари, прогнозувати кількість ударів, що залежить від струму блискавки, полярності лідера та геометричних параметрів об'єкта. У той же час модель не враховує інших важливих факторів розвитку блискавки, які впливають в тому числі і на вибір місця удару. Зокрема це швидкість зміни напруженості ЕП, час проходження відстані, яку долає лідер на останньому етапі просування до заземленого об'єкту.

Статистична модель [10] просування низхідного лідера розроблена з урахуванням можливості виникнення зустрічного висхідного лідера для

розрахунку ймовірності місця удару при подачі на високовольтний електрод позитивної та негативної напруги. З метою оцінки ефективності блискавководу стрижневого типу у [11] розроблена статистична модель просування лідера блискавки, в якій врахований стохастичний характер траєкторії просування лідера від початку і до моменту останнього удару. Модель описує завершальну стадію та визначає ймовірність ураження ділянок об'єкта. Використовуючи ймовірнісний розподіл величини струму зворотного ходу та враховуючи зміну швидкості просування лідера в останній стадії, що залежить від динаміки напруженості ЕП, яка призводить до зміни потенціалу лідера, був отриманий розподіл відносної ймовірності приєднання лідера до об'єкта. Розрахунок був виконаний в для різних рівнів потенціалу верхівки лідера (50 МВ та 3 МВ) з метою оцінки ефективності використання стрижневого блискавководу, розташованого на об'єкті захисту.

Мета роботи

Метою роботи є удосконалення методів оцінки ефективності засобів блискавкозахисту шляхом створення статистичної математичної моделі просування низхідного лідера в напрямку землі та заземлених об'єктів на останньому етапі з урахуванням статистичного розподілу струмів зворотного удару та потенціалів.

Основний матеріал

Потенціал верхівки лідера та висота, на якій відбувається орієнтування його на об'єкт, залежить від величини струму зворотного удару. Результати експериментів з вимірювання струму зворотного удару головної стадії в [4] систематизовані та представлені у вигляді розподілу ймовірності появи струму відповідної величини. Цей статистичний розподіл величин струмів зворотного удару блискавки та потенціалів верхівки лідера має бути врахований для прогнозування місця удару блискавки.

Прикріплення лідера до заземленого об'єкту відбувається за наявності в повітряному проміжку напруженості ЕП E , що перевищує критичне значення E_{cr} , за якого можливий розвиток лідера блискавки. Для негативних лідерів критичною є напруженість 1000 кВ/м, для позитивних – біля 500 кВ/м [12-14]. Зв'язок критичної напруженості з потенціалом верхівки лідера дає можливість визначити висоту, на якій відбувається орієнтація лідера на об'єкт:

$$l_0 = \frac{U_L}{E_{cr}}.$$

Опір каналу лідера Z прийнятий у розмірі 850 Ом [13]. Потенціал верхівки лідера може бути отриманий з виразу:

$$U_L \approx Z \cdot I_L,$$

Звідси

$$l_0 \sim 0,85 I_L.$$

Розрахункова система складається з двох областей: досліджувана поверхня землі S_G (площина 1 на рис. 1), поділена на N_G квадратних ділянок площею $S_{Gm} = S_G/N_G = \Delta^2$, та область грозової хмари, що має більшу площу S_T (область 2 на рис. 1), оскільки досліджувана ділянка землі може бути уражена блискавкою, ініційованою від значно ширшої області грозової хмари та за необхідності врахування всіх можливих місць утворення каналів низхідних лідерів для моделювання в тому числі і бічних ударів. При моделюванні ця область ділиться на N_T ділянок з площею $S_{Tm} = S_T/N_T = \Delta^2$. З метою спрощення моделювання прийнято, що ймовірність ураження розподілена елементарною площадкою S_{Gm} рівномірно.

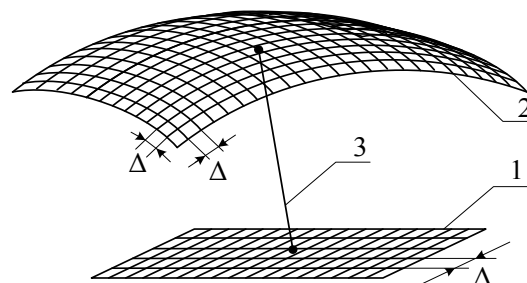


Рис. 1 – Розрахункова система поверхонь «Земля – грозова хмара»: 1 – досліджувана поверхня землі, 2 – область ймовірного старту орієнтованого лідера від хмари, 3 – канал лідера блискавки

При моделюванні також слід врахувати відхилення величини пробійної напруги від найбільш ймовірного значення для повітряних проміжків розміром від 2 м до 30 м. Це відхилення обумовлене відхиленням напруженості ЕП в стримерній та лідерній зонах, зміною швидкості їхнього просування, довжини стримерів та моменту утворення лідерів [13]. Для вищезазначеного діапазону величини проміжку відхилення пробійної напруги, отже і часу просування лідера на останньому етапі складає 6%–7%. В цій роботі відносне відхилення тривалості процесу розряду прийнято $\alpha=0,07$.

При моделюванні з усіх можливих комбінацій пробою від n -тої ділянки грозової хмари на m -ту ділянку земної поверхні під дією потенціалу верхівки каналу лідера U_k створений масив тривалості руху лідера на останній стадії $\{t_{nm}^k\}$. З цього масиву обирається найменше значення часу $t_{nm \min}^k$. Критерієм можливого ураження m -тої ділянки земної поверхні є виконання умови, що час руху до неї не перевищуватиме мінімальний час у $1+\alpha$ разів. Ділянки поверхні землі, що відповідають цій умові, в розрахунку мають індекс p . В моделі застосований принцип «найменший час – найбільша ймовірність».

Таким чином, кожному з лідерів, які можуть уразити N_p ділянок на землі, відповідає різна

імовірність цієї події. Решта лідерів вважаються неспроможними до прикріплення, тобто імовірність ураження дорівнює нулю.

Час руху лідера на останньому етапі просування від m -тої ділянки грозової хмари до p -тої ділянки землі враховує можливий вплив висхідного лідера, що виникає від заземленого об'єкта:

$$t_{pn}^k = \frac{H_{pn} - h_l^k}{v_{0dl}^k} + \frac{h_l^k}{v_{dl}^k + v_{ul}^k},$$

де H_{pn} – відстань між p -тою ділянкою на землі та m -тою ділянкою на грозовій хмарі на початку руху каналу лідера; h_l^k – висота розташування верхівки лідера з потенціалом U_k , на момент його орієнтації на заземлений об'єкт; v_{0dl}^k , v_{dl}^k – швидкість просування низхідного лідера відповідно перед та після початку останньої стадії пробую; v_{ul}^k – швидкість просування зустрічного лідера від заземленого об'єкта в напрямку низхідного лідера (у випадку відсутності умов для виникнення висхідного лідера ця швидкість дорівнює нулю).

Ймовірність ураження ділянки на землі зворотно пропорційна часу, який потрібен на подолання лідером відстані між нею та ділянкою грозової хмари:

$$P_{np}^k \sim \frac{1}{t_{np}^k},$$

де P_{np}^k – імовірність ураження p -тої ділянки на землі лідером блискавки з потенціалом k , що просувається від n -тої ділянки грозової хмари.

Ймовірність ураження ділянки на землі залежить від площі та кількості тих ділянок, які мають ненульову ймовірність ураження блискавкою. Для визначення цієї ймовірності необхідно обчислити коефіцієнти ймовірності ураження K для кожної ділянки з урахуванням того, що величина цього коефіцієнту варіюється в межах від 0 до 1. $K = 1$ для тих ділянок, яким відповідає найменший час просування лідера $t_{n \min}^k$, $K = 0$ для ділянок, яким відповідає час, у $1+\alpha$ разів більший за мінімальний, для решти випадків $0 < K < 1$. Для зручності запису використаємо позначення $L = 1/t$, мінімальний його рівень для тих лідерів, що задовольняють умові ураження, відповідатиме виразу $L_{n \min}^k = \frac{1}{(1+\alpha) \cdot t_{n \min}^k}$,

а максимальний – $L_{n \max}^k = \frac{1}{t_{n \min}^k}$. Обчислені

коефіцієнти ймовірності ураження K для всіх ділянок, що можуть бути уражені, належать проміжку:

$$L_{n \min}^k < K_{pn}^k = \frac{L_{pn}^k - L_{n \min}^k}{L_{n \min}^k - L_{n \max}^k} < L_{n \max}^k.$$

Якщо при обчисленні отримано негативний результат ($K_{pn}^k < 0$), приймається, що $K_{pn}^k = 0$.

Ймовірність кожного випадку ураження не може бути більшою за одиницю, отже при обчисленні вона має бути нормована сумою всіх коефіцієнтів K_{pn}^k :

$$P_{pn}^k = \frac{K_{pn}^k}{\sum_{p=1}^{N_p} K_{pn}^k}.$$

Така імовірність має бути обчислена для всіх Y можливих струмів I_k блискавки, що виникають з імовірністю P_k , згідно інформації, отриманої з узагальнення вимірів [5]. Для обчислення прогнозованої середньорічної кількості ударів у p -ту ділянку землі сума всіх ймовірностей P_{pn}^k має бути помножена на середньорічну кількість ударів блискавки на км² в конкретному регіоні N_m та на площу ділянки землі Δ^2 :

$$N_p = 10^{-6} \cdot N_m \cdot \sum_{k=1}^Y \left(P_k \cdot \sum_{n=1}^{N_T} [P_{pn}^k \cdot \Delta^2] \right).$$

Запропонований метод обчислення ймовірності удару блискавки був застосований для споруди, розташованої на території високовольтної підстанції. Площа будівлі складає 24x60 м², а висота – 24 м. Необхідність блискавкозахисту викликана наявністю в будівлі складного електронного обладнання систем контролю та зв'язку. З метою обрання найефективнішого виду блискавкозахисту було проведено обчислення прогнозованої відносної кількості ударів в кожен p -ту ділянку на досліджуваному об'єкті за формулою

$$P^* = \frac{N_p}{S},$$

де S – площа об'єкту в м², N_p – прогнозована середньорічна кількість ударів у p -ту ділянку землі.

Обговорення результатів

При розрахунку, докладно наведеному в [15], виконаному для будівлі за відсутності блискавкозахисту, отримані значні величини прогнозованої відносної кількості ударів ($P^* = 10^{-5}$) з істотним збільшенням в області кутів споруди ($P^* = 4 \cdot 10^{-5}$). За використання стрижневого блискавкопримача висотою від поверхні землі 56 м, розташованого посередині даху будівлі, ця величина значно зменшилась по всій площі будівлі, але в зоні блискавкоприймача суттєво збільшилась до рівня порядку $P^* = 60 \cdot 10^{-5}$. В даній роботі використана ідеалізована картина, в якій не враховано викривлення поля через наявність будівлі. На результати розрахунків не вплинула зміна висоти

блискавкоприймача від 56 м до 86 м (висота відносно рівня землі). За використання тросової системи блискавкозахисту, розташованої на висоті 34 м та на відстані 4 м від будівлі, прогнозована відносна кількість ударів в будівлю дорівнює 0, всі прогнозовані удари зосереджені на тросовій системі ($P^* = 30 \cdot 10^{-5}$).

Для порівняння ефективності засобів блискавкозахисту об'єкта для кожного випадку також було обчислено середньорічну кількість ударів як в об'єкт, так і в систему блискавкозахисту та ділянки землі навколо будівлі:

$$N_b = \sum_v N_v,$$

де v відповідає кількості ділянок з урахуванням тих, що безпосередньо прилягають до будівлі.

Результати розрахунку ймовірних місць ударів високовольтними розрядами при наявності та відсутності висхідних лідерів із наземних об'єктів порівняно з експериментальними даними фізичного моделювання в системі високовольтний електрод - заземлені стрижні 1, 2 та заземлена площина [13]. При подачі напруги на високовольтний електрод висхідні лідери утворюються від вищого стрижня 1 (стрижень, що імітує блискавквідвід), уразили $N_1 \approx 85\%$ усіх розрядів, жодні розряди не уразили менший стрижень 2, який імітує об'єкт ($N_2 = 0$), а $N_3 \approx 15\%$ розрядів вражають заземлену площину [13]. Математичне моделювання за допомогою описаного методу дало такі результати: $N_1 \approx 84\%$, $N_2 = 0$ та $N_3 \approx 16\%$. Таким чином, збіг експериментальних та розрахованих даних є прийнятним для опису статистичних процесів. Відносні відмінності – менше 17%.

Висновки

Дослідження процесу просування блискавки може бути виконане шляхом фізичного та математичного моделювання. Параметри штучної блискавки, отриманої при фізичному моделюванні через запуск ракет з електропровідним тросом, значно відрізняються від параметрів природних блискавок. Тож такий підхід не дозволяє дослідити процеси обрання місця прикріплення низхідних лідерів. На даний момент математичне моделювання процесів є прийнятним шляхом дослідження природної блискавки. Статистичне моделювання дає можливість враховувати геометричні параметри об'єкта та електрофізичні процеси при просуванні низхідного лідера. Воно показало свою ефективність при прогнозуванні місця удару блискавки в наземний об'єкт. Відхилення в порівнянні з отриманими експериментальними даними складає 17 %.

Список літератури

1. Schoene J., Uman M. A., Rakov V. A., Rambo K. J., Jerauld J., Mata C. T., Mata A. G., Jordan D. M., and Schnetzer G. H. Characterization of return-stroke currents in rocket-triggered lightning, *Journal of geophysical research*. 2009. vol. 114, D03106. doi:10.1029/2008JD009873.

2. Wang D., Gamera W. R., Uman M. A., Takagi N., Hill J. D., Pilkey J., Ngin T., Jordan D. M., Mallick S., Rakov V. A. Lightning attachment processes of an "anomalous" triggered lightning discharge. *J. Geophys. Res. Atmos.* 2014. vol. 119, P. 1524–1533. doi:10.1002/2013JD020787.
3. Tran M. D., and Rakov V. A. Initiation and propagation of cloud-to-ground lightning observed with a high-speed video camera. *Sci. Rep.* 2016. vol. 6, P. 39521. doi: 10.1038/srep39521.
4. ДСТУ EN 62305:2012 Блискавкозахист (IEC 62305:2011, IDT). Київ, Держстандарт України, 2012, 419 с.
5. IEC 62305-3. International standard "Protection against lightning – Part 3: Physical damage and life hazard", Geneva: IEC, 2010. 160 p.
6. Arevalo L., Cooray V. The mesh method' in lightning protection standards – Revisited. *Journal of Electrostatics*. 2010. Vol. 68, P. 311-314. doi 10.1016/j.elstat.2010.03.003.
7. D'Alessandro F., Gumley J. R. A "Collection Volume Method" for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning. *Journal of Electrostatics*. 2001. vol. 50, Issue 4, P. 279-302
8. Lalande P., Bondiou-Clergerie A., Laroche P., Bacchiega G. L., Bonamy A., Gallimberti I., Eybert-Berard A., Berlandis J. P., Bador B. Modelling of the lightning connection process to a ground structure. *Int. Conf. on Lightning Protection Florence (Italy)*. 23-27 sept. 1996.
9. Petrov N. I., Petrova G. N., D'Alessandro F. Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*. 2003. Vol. 10, P. 641 - 654. doi: 10.1109/TDEI.2003.1219649.
10. Резинкина М. М., Князев В. В., Кравченко В. И. Статистическая модель процесса ориентировки лидера молнии на наземные объекты. *Журнал технической физики*. 2005. Т. 75, вып. 9. С. 44-51.
11. Сокол Е. И., Резинкина М. М., Резинкин О. Л., Гриб О. Г., Светличная Е. Е. Статистическая модель для определения вероятности поражения молнией наземных объектов. *Техн. электродинамика*. 2016. № 2. С. 11-18.
12. Cooray V. *Lightning Protection*. London: The Institution of Engineering and Technology. 2010. 1036 p.
13. Bazelyan E. M., Yu. P. Raizer. *Lightning physics and lightning protection*. Bristol: Institute of Physics. 2000. 325 p.
14. Uman M. A. *The Art and Science of Lightning Protection*. New York: Cambridge University Press, 2008. 240 p.
15. Rezinkina M., Rezinkin O. and Lytyvnenko S. Simulation of Electrical Physical Processes in Electro-Energetic Systems at Thunderstorm Conditions. *Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of the 15th International Conference, (25–29 February 2020, Lviv-Slavske, Ukraine)*. IEEE, 2020. P. 106-108.

References (transliterated)

1. Schoene J., Uman M. A., Rakov V. A., Rambo K. J., Jerauld J., Mata C. T., Mata A. G., Jordan D. M., and Schnetzer G. H. Characterization of return-stroke currents in rocket-triggered lightning. *Journal of geophysical research*, 2009. vol. 114, D03106, doi:10.1029/2008JD009873.
2. Wang D., Gamera W. R., Uman M. A., Takagi N., Hill J. D., Pilkey J., Ngin T., Jordan D. M., Mallick S., Rakov V. A. Lightning attachment processes of an "anomalous" triggered lightning discharge. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 2014, vol. 119, pp. 1524–1533, doi:10.1002/2013JD020787.
3. Tran M. D., and Rakov V. A. Initiation and propagation of cloud-to-ground lightning observed with a high-speed video

- camera. *Sci. Rep.*, 2016, vol. 6, 39521, doi: 10.1038/srep39521.
4. DSTU EN 62305:2012 "Blyskavkozakhyt" (IEC 62305:2011, IDT) Kyiv, Derzhstandart Ukrainy, 2012, 419 p.
 5. IEC 62305-3. International standard "Protection against lightning – Part 3: Physical damage and life hazard", Geneva: IEC, 2010. 160 p.
 6. Arevalo L., Cooray V. The mesh method' in lightning protection standards – Revisited. *Journal of Electrostatics*, 2010, vol. 68, pp.311-314, doi 10.1016/j.elstat.2010.03.003
 7. D'Alessandro F., Gumley J.R., A "Collection Volume Method" for the placement of air terminals for the protection of structures against lightning, *Journal of Electrostatics*, 2001, vol. 50, Issue 4, pp. 279-302
 8. Lalande P., Bondiou-Clergerie A., Laroche P., Bacchiega G. L., Bonamy A., Gallimberti I., Eybert-Berard A., Berlandis J. P., Bador B. Modelling of the lightning connection process to a ground structure. *Int. Conf. on Lightning Protection Florence (Italy)*, 23-27 sept. 1996.
 9. Petrov N. I., Petrova G. N., D'Alessandro F. Quantification of the probability of lightning strikes to structures using a fractal approach. *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*. 2003, vol. 10, pp. 641 – 654, doi 10.1109/TDEI.2003.1219649.
 10. Rezinkina M. M., Knjazev V. V., Kravchenko V. I. Statisticheskaja model' processa orientirovki lidera molnii na nazemnye ob'ekty. *Zhurnal tehnichejskoj fiziki*, 2005, Vol. 75, vyp. 9, pp. 44-51.
 11. Sokol E. I., Rezinkina M. M., Rezinkin O. L., Grib O. G., Svetlichnaja E. E. Statisticheskaja model' dlja opredelenija verojatnosti porazhenija molniej nazemnyh ob'ektov. *Tehn. elektrodinamika*. 2016, № 2, pp. 11-18.
 12. Cooray V. *Lightning Protection*. London: The Institution of Engineering and Technology, 2010, 1036 p.
 13. Bazelyan E. M., Raizer Yu. P. *Lightning physics and lightning protection*. Bristol: Institute of Physics, 2000, 325 p.
 14. Uman M. A. *The Art and Science of Lightning Protection*. New York: Cambridge University Press, 2008, 240 p.
 15. Rezinkina M., Rezinkin O. and Lytvynenko S. Simulation of Electrical Physical Processes in Electro-Energetic Systems at Thunderstorm Conditions, *Telecommunications and Computer Engineering (TCSET): Proceedings of the 15th International Conference (Lviv-Slavske, Ukraine, 25–29 February 2020)*. IEEE, 2020, pp. 106-108.

Відомості про авторів (About authors)

Литвиненко Світлана Анатоліївна – аспірант кафедри «Теоретичні основи електротехніки», Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-0818-2470; e-mail: svetlitvinenkoua@gmail.com.

Svitlana Lytvynenko – postgraduate of the Theoretical Electrical Technique Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine, ORCID: 0000-0003-0818-2470; e-mail: svetlitvinenkoua@gmail.com.

Будь ласка, посилайтесь на цю статтю таким чином:

Литвиненко С. А. Статистичне моделювання просування блискавки в напрямку наземних об'єктів. *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія Нові рішення в сучасних технологіях. - Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2(4). С. 5 - 5 . doi:10/209998/2413-4295.2020.02.20.

Please cite this article as:

Lytvynenko S. Statistical modeling of lightning propagation in the direction of ground objects. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU :KhPI", 2020, no. 2 (4), pp. 5 - 5 . doi:10/209998/2413-4295.2020.02.20.

Пожалуйста, ссылайтесь на эту статью следующим образом:

Литвиненко С. А. Статистическое моделирование продвижения молнии в направлении наземных объектов. *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». 2020. № 2 (4). С. 5 - 5 . doi:10/209998/2413-4295.2020.02.20.

АННОТАЦІЯ Представлен обзор методов физического и математического моделирования процесса продвижения лидера молнии с целью сравнения эффективности их применения при выборе средств молниезащиты наземного объекта: исследование физических процессов с применением триггерной молнии, запущенной с помощью ракеты, моделирование с использованием электро-геометрических методов и фрактальных моделей и пр.. Подробно рассмотрено статистическое моделирование, которое описывает процесс продвижения лидера молнии на последней фазе в направлении наземного объекта, с учетом стохастического характера продвижения лидера на предыдущем этапе. Использование статистического моделирования дает возможность вычислить время продвижения нисходящего лидера молнии с высоты, на которой происходит ориентировка на объект, с учетом возможности возникновения от объекта встречного лидера противоположной полярности. Вычисленный массив времени продвижения канала лидера от каждой точки грозового облака используется при расчетах вероятности прикрепления нисходящего лидера к наземному объекту с применением критерия «наибольшее время - наименьшая вероятность». Моделирование выполняется с использованием систематизированных экспериментальных данных, полученных при многочисленных исследованиях тех электрофизических процессов, которые определяют направление продвижения лидерного канала молнии и определяют момент и место в пространстве начала ориентации лидера на объект: распределение напряженности электрического поля вокруг вершины лидера и в воздушном промежутке, ток обратного хода, уровень потенциала вершины канала лидера, изменение скорости продвижения лидерного канала и т.д.. Использование информации о статистическом распределении величин токов и потенциалов позволило рассчитать вероятность поражения каждого участка объекта, учитывая также и боковые удары. Расчеты показали возможность использования предложенной методики для оценки эффективности системы молниезащиты при проектировании посредством сравнения вероятности поражения наземного объекта и среднегодового количества прогнозируемых ударов для различных систем молниезащиты.

Ключевые слова: статистическое моделирование; электрофизические процессы; лидерный канал молнии; молниезащита; вероятность поражения молнией; прогнозируемое количество ударов

Надійшла (received) 18.05.2020

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<i>Данильченко Ю. М., Петришин А. І.</i> Вібродіагностика шпіндельних вузлів на опорах кочення по результатах вимірювань вібрацій корпусу	3
<i>Кусий Я. М.</i> Дослідження впливу викінчувальних операцій на формування параметрів якості поверхні втулок бурових pomp	14
<i>Лук'янов М. О.</i> Вентильно-індукторний двигун з покращеними тяговими характеристиками	23
<i>Лухтура Ф. І., Циганов В. І.</i> Переваги імпульсного підведення тепла для покриття змінних навантажень в системах теплопостачання	30
<i>Пантєлєєва І. В., Шматько Н. М., Глушко А. В.</i> Забезпечення енергозбереження при використанні установок на біопаливі	38

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

<i>Бондар А. В.</i> Динаміка інформаційної ентропії проєктів та практичні аспекти її оцінки	45
<i>Гигиняк В. В., Хлевний А. О.</i> Аналіз даних та машинне навчання на основі даних лабораторії ЦЕРН	53
<i>Колдун М. М., Грудзинський Ю. Є.</i> Побудова алгоритму прогностичної моделі при створенні предиктивного модуля передбачення нештатних ситуацій в роботі автоматизованої системи керування технологічними процесами	58
<i>Костенко В. Л., Кондратьєв С. Б., Ядрова М. В., Стельмах Д. Е.</i> Квазістереоскопічна система виявлення перешкод для сліпих на базі RASPBERRY PI 3 і STM8L	64
<i>Пустовойтов П. Є., Костик К. О., Компанієць В. О., Воронець В. М., Хайдар Х.</i> Математична модель опису інтенсивності запитів до сервера	76
<i>Становська І. І., Становський О. Л., Прокопович І. В., Науменко Є. О.</i> Метод експрес-вимірювання стану складних систем за допомогою параметричного показника	85

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

<i>Гармаш Д. В., Пасічний В. М.</i> Оптимізація процесу термічної обробки м'яса птиці за технологією sous vide із застосуванням фосфатної суміші	96
<i>Маринін А. І., Большак Ю. В., Святненко Р. С., Штепа Д. В.</i> Дослідження особливостей фізико-хімічних показників води, обробленої безреагентним електрохімічним методом	103
<i>Ненастіна Т. О., Ведь М. В., Сахненко М. Д., Зюбанова С. І.</i> Вплив морфології поверхні композиційних електролітичних покривів Co-W-ZrO ₂ на функціональні властивості сплавів	110
<i>Прісс О. П., Сердюк М. Є., Жукова В. Ф., Сухаренко О. І., Коляденко В. В.</i> Гарбузові цукати – ласощі з функціональними властивостями	119
<i>Сердюк М. Є., Григоренко О. В., Сухаренко О. І., Коляденко В. В.</i> Зміни функціональних властивостей фруктової та ягідної сировини протягом кріогенного зберігання	126
<i>Чернюшок О. А., Шевченко І. Ю.</i> Розробка м'ясних напівфабрикатів з використанням молочних продуктів та шпинату	133
<i>Шведюк Д. А., Пасічний В. М.</i> Вплив термічної обробки на характеристики січених м'ясо-рослинних напівфабрикатів з використанням ферментації	138

ЕЛЕКТРОФІЗИЧНІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕМС ТА БЛИСКАВКОЗАХИСТ

<i>Гончаров Є. В., Поляков І. В., Марков В. С., Крюкова Н. В., Бойков Д. О., Скрєбцов М. К.</i> Перспективи сучасних методів дистанційного контролю ліній електропередачі	145
<i>Литвиненко С. А.</i> Статистичне моделювання просування блискавки в напрямку наземних об'єктів	152

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

<i>Danylchenko Yu., Petryshyn A.</i> Diagnostic of spindle units on rolling bearings based on measuring of the housing vibrations	3
<i>Kusyi Ya.</i> Investigation of the influence of finishing operations on the formation of surface quality parameters of bushings of drilling pumps	14

Lukianov M. Switched-reluctance motor with improved traction characteristics	23
Lukhtura F., Tsiganov V. Advantage of pulse heat supply for covering variable loads in heat supply systems	30
Pantielieieva I., Shmatko N., Glushko A. Ensuring energy saving when using biofuel installations	38

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

Bondar A. Dynamics of information entropy of projects and practical aspects of its evaluation	45
Hyhnyiuk V., Khlevnyi A. Data Analysis and Machine Learning on the CERN data	53
Koldun M., Hrudzynskiy J. Construction of the algorithm of the forecast model at creation of the module of prediction of emergency situations in work of the industrial automation and control systems	58
Kostenko, V., Kondratyev, S., Yadrova, M., Stelmakh, D. Quasistereoscopic obstacle detection system for the blind on the basis RASPBERRY PI 3 and STM8L	64
Pustovoitov P., Kostyk K., Kompaniets V., Voronets V., Haidar H. Mathematical model of server requests intensity description	76
Stanovska I., Stanovskyi O., Prokopovich I., Naumenko I. Express method of the complex systems state measurement using the parametric indicator	85

CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

Garmash D., Pasichnyi V. Optimization of the poultry meat heat treatment process with phosphate mixture application	96
Marynin A., Bolshak Yu., Svyatnenko R., Shtepa D. Research of peculiarities of physicochemical indicators of water processed by reagent-free electrochemical method	103
Nenastina T., Ved' M., Saknienko M., Zubanova S. The effect of surface morphology of Co-W-ZrO ₂ electrolytic composite coatings on the functional properties of alloys	110
Priss O., Serdyuk M., Zhukova V., Sukharenko O., Koliadenko V. Candied pumpkins – a delicacy with functional properties	119
Serdyuk M., Hryhorenko O., Sukharenko O., Kolyadenko V. Changes in functional properties of fruit and berry raw materials during cryogenic storage	126
Chernyushok O., Shevchenko I. Development of semi-finished meat products using dairy products and spinach Development of meat products with the use of dairy products and spinach	133
Shvedyuk D., Pasichnyi V. The influence of heat treatment on the characteristics of chopped meat and vegetable semi-finished products using fermentation	138

ELECTROPHYSICAL TECHNOLOGIES, EMC AND LIGHTNING PROTECTION

Honcharov Ye., Polyakov I., Markov V., Kryukova N., Boykov D., Skrebtsov N. Prospects of modern remote methods control of power transmission lines	145
Lytyynenko S. Statistical modeling of lightning propagation in the direction of ground objects	152

НАУКОВЕ ВИДАННЯ

**ВІСНИК НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ "ХП".
СЕРІЯ: НОВІ РІШЕННЯ В СУЧАСНИХ ТЕХНОЛОГІЯХ**

Збірник наукових праць

№ 2(4)' 2020

Відповідальний редактор: Є. І. Сокол, чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП», Україна
Технічний редактор: С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХП», Україна
Відповідальний секретар: Р. С. Томашевський, д-р техн. наук, проф., НТУ «ХП», Україна
С. І. Меньшикова, канд. фіз.-мат. наук, НТУ «ХП», Україна

Відповідальний за випуск: д-р техн. наук, доц. Р. С. Томашевський

АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ ТА ВИДАВЦЯ: 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2, НТУ «ХП».
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: vestnik.nsm@gmail.com

Підп. до друку «31» травня 2020 р. Формат 60x84 1/8. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 13,0. Облік.вид.арк. 8,75.
Тираж 50 прим. Зам. № 44. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП». Свідоцтво про державну реєстрацію
суб'єкта видавничої справи ДК №5478 від 21.08.2017
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2
