

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

## **ВІСНИК**

**НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

*Серія: "Нові рішення в сучасних технологіях"*

**№ 18 (1190) 2016**

Збірник наукових праць

Видання засновано у 1961 р.

**Вісник Національного технічного університету «ХПІ».** Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190) – 189 с.

**Державне видання**  
**Свідоцтво Держкомітету з інформаційної політики України**  
**КВ №5256 від 2 липня 2001 року**

Збірник виходить українською, російською та англійською мовами.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ» внесено до «Переліку наукових фахових видань України, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора і кандидата наук», затвердженого рішенням Атестаційної колегії МОН України щодо діяльності спеціалізованих вчених рад, від 15 грудня 2015 р. Наказ № 1328 (додаток 8) від 21.12.2015 р.*

**Координаційна рада:**

Л. Л. ТОВАЖНЯНСЬКИЙ, д-р техн. наук, проф. (**голова**);

К. О. ГОРБУНОВ, канд. техн. наук, доц. (**секретар**);

А. П. Марченко, д-р техн. наук, проф.; Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.; Є. Є. Александров, д-р техн. наук, проф.; А. В. Бойко, д-р техн. наук, проф.; Ф. Ф. Гладкий, д-р техн. наук, проф.; М. Д. Годлевський, д-р техн. наук, проф.; А. І. Грабчєнко, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Д. Дмитриєнко, д-р техн. наук, проф.; І. Ф. Домнін, д-р техн. наук, проф.; В. В. Єпіфанов, канд. техн. наук проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; С. І. Кондрашов, д-р техн. наук, проф.; В. І. Кравченко, д-р техн. наук, проф.; Г. В. Лісачук, д-р техн. наук, проф.; О. К. Морачковський, д-р техн. наук, проф.; В. І. Ніколаєнко, канд. іст. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; В. А. Пуляев, д-р техн. наук, проф.; М. І. Рищенко, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Самородов, д-р техн. наук, проф.; Г. М. Сучков, д-р техн. наук, проф.; Ю. В. Тимофієв, д-р техн. наук, проф.; М. А. Ткачук, д-р техн. наук, проф.

**Редакційна колегія серії:**

**Відповідальний редактор:** Є. І. Сокол, член-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф.

**Відповідальний секретар:** Р. С. Томашевський, канд. техн. наук, доц.,

А.В. Грабовський, канд. техн. наук.

**Члени редколегії:** Л. Л. Брагіна, д-р техн. наук, проф.; В. Г. Данько, д-р техн. наук, проф.; В. Т. Долбня, д-р техн. наук, проф.; В. Я. Заруба, д-р техн. наук, проф.; В. Б. Клепиков, д-р техн. наук, проф.; Б. В. Кліменко, д-р техн. наук, проф.; О. С. Куценко, д-р техн. наук, проф.; Г. І. Львов, д-р техн. наук, проф.; П. Г. Перерва, д-р екон. наук, проф.; М. І. Погорелов, канд. екон. наук, проф.; Л. Г. Раскін, д-р техн. наук, проф.; Р. Д. Ситнік, д-р техн. наук, проф.; В. І. Шустіков, д-р техн. наук, проф.; О. Ю. Заковоротний, канд. техн. наук, доц.; О. О. Ларін, канд. техн. наук, доц.; В. В. Куліченко, канд. техн. наук, доц.

*Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Нові рішення в сучасних технологіях», індексується в наукометричних базах WorldCat, Google Scholar, Index Copernicus і включений у довідник періодичних видань бази даних Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).*

Рекомендовано до друку вченою радою НТУ «ХПІ»  
Протокол № 6 від «01» липня 2016 р.

© Національний технічний університет «ХПІ», 2016

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY  
“KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

# **BULLETIN**

**OF THE NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY  
“KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE”**

*Series: " New solutions in modern technologies"*

**№ 18 (1190) 2016**

Collected Works

The publication was founded in 1961

**Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: New solutions in modern technology.** – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 189 p.

## **State edition**

### **Certificate of State Committee of Ukraine for Information Policy KB №5256 from July 2, 2001**

The collection is published in Ukrainian, Russian and English.

*Bulletin of the National Technical University "KhPI" added to the "List of scientific professional publications of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences", approved by the Certifying Board of MES of Ukraine on the activity academic councils, December 15, 2015 . Order number 1328 (appendix 8) of 12.21.2015 p.*

#### **Coordinating Board:**

L. L. Tovazhnyanskyy, Dr. Tech. Sci., Prof. (**chief**);

K. A. Gorbunov, PhD. Tech. Sci., доц. (**secretary**);

A. P. Marchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; Ye. I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.; E. E. Aleksandrov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. V. Boyko, Dr. Tech. Sci., Prof.; F. F. Gladkiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. D. Godlevskiy, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. I. Grabchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. G. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. D. Dmitrienko, Dr. Tech. Sci., Prof.; I. F. Domnin, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. V. Epifanov, PhD. Tech. Sci., Prof.; Yu. I. Zaytsev, PhD. Tech. Sci., Prof.; P. A. Kachanov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.; S. I. Kondrashov, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Kravchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; G. V. Lisachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.; O. K. Morachkovsky, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Nikolaenko, PhD. Hist. Sci, Prof.; P. G. Pererva, Dr. Econ. Sci., Prof.; V. A. Pulyaev, Dr. Tech. Sci., Prof.; M. I. Rishchenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Samorodov, Dr. Tech. Sci., Prof.; G. M. Suchkov, Dr. Tech. Sci., Prof., Yu. V. Timofeev, Dr. Tech. Sci., Prof., M. A. Tkachuk, Dr. Tech. Sci., Prof.

#### **Editorial Board:**

**Editor:** Ye. I. Sokol, member NAS of Ukraine, Dr. Tech. Sci., Prof.

**Secretary:** R. S. Tomashevskiy, PhD. Tech. Sci.

A. V. Grabovskiy, PhD. Tech. Sci.

**Members of the editorial board:** L. L. Bragina, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. G. Danko, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. T. Dolbnya, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. Y. Zaruba, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. B. Klepikov, Dr. Tech. Sci., Prof.; B. V. Klymenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. S. Kutsenko, Dr. Tech. Sci., Prof.; G. I. Lvov, Dr. Tech. Sci., Prof.; P. G. Pererva, Dr. Econ. Sci., Prof.; N. I. Pogorelov, PhD. Econ. Sci, Prof.; L. G. Raskin, Dr. Tech. Sci., Prof.; R. D. Sytnik, Dr. Tech. Sci., Prof.; V. I. Shustikov, Dr. Tech. Sci., Prof.; A. U. Zakovorotnij, PhD. Tech. Sci.; A. A. Larin, PhD. Tech. Sci.; V. V. Kulichenko, PhD. Tech. Sci.

*Bulletin of the National Technical University "KPI" series "New solutions in modern technologies," scientometric databases indexed in WorldCat, Google Scholar, Index Copernicus and included in the directory of periodicals database Ulrich's Periodicals Directory (New Jersey, USA).*

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI"  
Protocol number 6 of July, 01, 2016

© National Technical University "KhPI", 2016



УДК 331.101.39

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.01

## МЕТОДИКА ОЦЕНИВАНИЯ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПРИГОДНОСТИ ОПЕРАТОРОВ

**С. Н. АРТЮХ**

*Кафедра Охраны труда, стандартизации и сертификации, УИПА, Харьков, УКРАИНА  
e-mail: artyh-sv@yandex.ua.*

**АННОТАЦИЯ** В статье выделены основные аспекты профессиональной пригодности операторов. Предложены для диагностического комплекса профессиональной пригодности операторов атомных станций рациональные психологические тесты. Описаны методика исследования профессиональной пригодности операторов технологических процессов и методика построения модели прогноза группы профессиональной пригодности операторов. Определены наиболее информативные психофизиологические показатели, обеспечивающие высокую точность прогноза.

**Ключевые слова:** работоспособность, профессиональный отбор, оператор технологических процессов, энергетика, профессиональная пригодность, надежность работы.

## METHODS OF ASSESSMENT OF INDICATORS OF PROFESSIONAL SUITABILITY OF OPERATORS

**S. ARTYUKH**

*Department of labor Protection, standardization and certification, pedagogical Academy, Kharkov, UKRAINE*

**ABSTRACT** The article highlights the main aspects of professional suitability of operators. Reviewed suitability as a key element of safety culture. Analyzes the main aspects of the inconsistencies of the individual characteristics of the worker requirements of occupations in the energy sector. The aim of this work is to develop techniques of psychophysiological professional selection of operators of utilities, which will ensure high accuracy of the forecast of professional competence, which in turn will reduce the number of accidents, accidents and injuries. The basic requirements for the assessment scales of psycho-diagnostic indicators. The distribution of the causes of accidents in the energy sector. Considered the human operator as a link in a closed control loop. For the proposed diagnostic complex of professional suitability of operators of nuclear power plants rational psychological tests. Define the concept of professionalism in the aspect of requirements for operator of nuclear power plants. The method of study of professional suitability of operators of technological processes and methods of building a forecast model of a group of professional suitability of operators. Developed evaluation criteria for groups of professional suitability of operators of nuclear power plants. The obtained data about the groups of professional suitability of operators of nuclear power plants. The most informative psychophysiological indicators that provide a high forecast accuracy. Highlighted ways to ensure maximum efficiency of the system "man – machine – environment". It is shown that the system of professional selection can use not only indicators of professional knowledge, but also objective physiological indicators of a person.

**Keywords:** health, professional selection, operator of technological processes, energy, professional competence, reliability.

### Введение

На современном этапе технического развития неуклонно возрастают требования к уровню и качеству профессиональной подготовленности персонала, подчеркивается необходимость не только достаточно высокого уровня его квалификационной подготовки, но и наличие такого важного элемента, как профессиональная пригодность. Она рассматривается в качестве ключевого и приоритетного элемента культуры безопасности. Такое положение обуславливается:

1) все возрастающими темпами технического развития, разработкой и внедрением различных систем управления объектами, технологическими и коммуникативными процессами и, как следствие, - появлением новых профессий операторского профиля; 2) высокой сложностью и ответственностью операторской деятельности, сопровождающейся в ряде случаев повышенной опасностью, о чем свидетельствует статистика аварийности на энергопредприятиях; 3) наличием феноменов

системной организации компонентов операторской деятельности, их тесной взаимосвязи и взаимозависимости, что определяет необходимость рассмотрения этой деятельности как осуществляющейся в системе «человек – машина – среда» [1-4].

Усложнение техники усиливает противоречие между требованиями производства и способностями людей, что, в свою очередь, вызывает повышенный интерес к «человеческому фактору». Сбой или отказ оборудования, ошибки операторского персонала сопряжены с весьма дорогостоящими, а подчас и катастрофическими последствиями, плата за которые неуклонно продолжает расти.

Необходимо отметить, что экономические потери, связанные с использованием на операторской работе лиц с недостаточно развитыми профессионально важными психофизиологическими и личностными качествами (ПВПЛК), обусловлены не только последствиями аварий и отказов, но и неэкономичной эксплуатацией энергооборудования. Ряд исследований показывают, что часто лица, не

© С. Н. АРТЮХ, 2016

обладающие достаточными способностями к определенному виду деятельности, не только значительно дольше других и с большими трудностями овладевают этой деятельностью, но и работают хуже других (чаще допускают ошибки и просчеты, являются виновниками аварий, обладают меньшей надежностью в работе). Кроме того, операторы, не соответствующие профессиональным требованиям, значительно чаще болеют и получают производственные травмы [5-7].

### Цель работы

Цель данной работы - разработка методики психофизиологического профессионального отбора операторов энергопредприятий, которая позволит обеспечить высокую точность прогноза группы профессиональной пригодности, что в свою очередь позволит сократить количество несчастных случаев, аварий и травм.

### Изложение основного материала

По данным многочисленных исследований, несоответствие индивидуальных особенностей работника требованиям профессии в энергетике является причиной 80% несчастных случаев, а в других отраслях промышленности - 43%. При этом больше всего несчастных случаев произошло с лицами, пострадавшими, как правило, из-за своих ошибочных действий (рис.1). Достаточно высоким уровнем травматизма продолжает оставаться среди руководителей и специалистов такого звена, как начальник цеха, мастер, что свидетельствует об их недостаточной подготовленности к производству работ на энергопредприятиях.

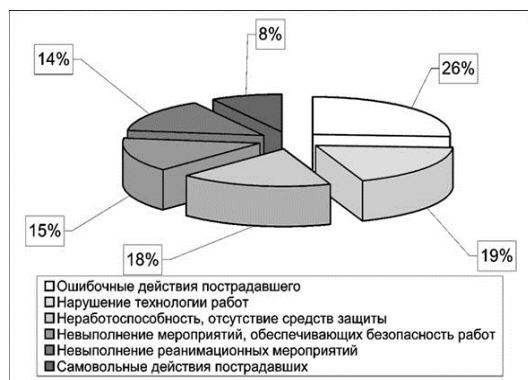


Рис. 1- Распределение причин несчастных случаев в энергетике

Поиск путей и механизмов повышения эффективности подготовки операторов энергопредприятий идет постоянно, при этом значительное внимание уделяется изучению и оцениванию именно психофизиологических показателей профессиональной пригодности.

Обеспечить максимальную эффективность работы системы «человек – машина – среда» можно 2 путями:

- разработкой таких конструктивных решений, которые бы наиболее полно соответствовали психофизиологическим возможностям человека;
- обучением, тренировкой, адаптацией человека к заданным условиям труда.

Первый, наиболее перспективный путь, наиболее часто является технически нереализуемым. В этой ситуации очень важной становится разработка системы мероприятий по профессиональному психофизиологическому отбору (ППО), позволяющая выбрать для работы в определенных условиях лиц, наиболее подходящих по своим психофизиологическим качествам. Наличие большого количества тестов, в том числе компьютерных, не решает эту проблему в силу того, что профессиональная пригодность человека является не просто суммой психологических показателей и физиологических параметров, соответствующих задаваемым уровням. Профпригодность – это системное качество, определяемое знаниями и умениями индивида, реализация которых зависит от уровня развития ПВПЛК.

### Особенности психофизиологического оценивания профпригодности операторов

Рассматривая человека-оператора как звено в замкнутом контуре управления, можно сформулировать задачу оператора как согласование системы управления с учетом возможностей и ограничений, как человека, так и техники, входящей в систему управления. Анализ оперативной деятельности операторов энергоустановок показал, что оператор должен иметь определенный объем теоретических знаний, необходимых для понимания оперативных ситуаций, возникающих при эксплуатации оборудования. А также навыки: обнаружения, опознавания и идентификации сигналов, логического мышления, дистанционного управления технологическими параметрами, взаимодействия с аппаратурой автоматического регулирования и вычислительного комплекса.

Рассмотрев приведенные навыки, необходимые для успешной работы оператора в нормальных и, особенно в аварийных ситуациях, можно сделать вывод о том, что ни один из них не может быть приобретен при обучении и тренировках на так называемых «компьютерных тренажерах». В связи с этим, приобретение каких-либо других навыков оператором в этом случае делает их отрицательными (то есть мешающими) по отношению к оперативной деятельности на реальном оборудовании и неизбежно ведет к резкому снижению надежности и безопасности работы электростанций и энергосистем.

Системы профессионального психофизиологического отбора направлены на оценку неспецифических профессионально значимых качеств, которые помогают (или препятствуют) овладению выбранной профессией или работе по

професії, дозволяють визначити ступінь відповідності рівня розвитку ПВПЛК індивіда професійним вимогам і способи спрямованого формування його професійної придатності в період профпідготовки. В якості найбільш перевірених і валідизованих на різних контингентах операторських професій використовуються показники структури особистості, структури інтелекту, типології і психодинаміки. [8] Найбільш інформативні показники включаються в модель «еталонного оператора», яка використовується в подальшому для прогнозу індивідуальної профпридатності.

Як показують виробничі дослідження професійної придатності операторів, модель прогнозу групи профпридатності (ГПП) повинна будуватися для конкретного підприємства. Такий підхід забезпечує найбільшу точність прогнозу, так як ефективність роботи операторів технологічних процесів визначається не тільки професійними знаннями, але і вмінням працювати колективно, оптимальним способом взаємодіючи з колегами. При цьому здатний колектив складається в процесі тривалого часу під впливом особливостей як трудового процесу на конкретному підприємстві, так і соціально-психологічних умов життя, а ефективність конкретного оператора визначається не тільки об'єктивними, але і суб'єктивними критеріями.

#### Методика дослідження

В теперішній час налічується більше 400 тестів для проведення професійного психофізіологічного відбору. Тому дуже актуальною є проблема вибору найбільш адекватних тестів для рішення конкретних виробничих завдань.

Представлений варіант батареї психодіагностических методик для прогнозування успішності освоєння і реалізації операторської діяльності створений з десятків тестів, використаних на етапі розробки психодіагностическої процедури з урахуванням позитивного досвіду інших авторів. [9,10] Вибір інформативних методик здійснювали на основі даних поетапного багатовимірного кореляційно-регресійного аналізу.

Для прогнозування надійності роботи оператора енергопідприємства в аварійній ситуації недостаточними критеріями, виробленими для цілей профотбору і навчання оперативного персоналу, необхідно проводити психологічну діагностику для отримання оцінки професійно-важливих якостей. З цією метою нами пропонується використовувати в діагностическому комплексі наступні психологічні тести:

- стандартизована методика дослідження особистості (СМІЛ) в скороченому варіанті (13 шкал) по Л.Н. Собчик;

- тест структури інтелекту по R. Amthauer (ТСІ);
- тест дослідження уваги і помехостійкості;
- тест перекодування інформації (варіант тесту 6 по Векслеру).

Виконання даного комплексу тестів вимагає витрат часу 3-3,5 години, що є достатньо великим навантаженням, тим більше, що тест структури інтелекту виконується з урахуванням часу, витрачаємого на рішення тестових завдань, і в умовах обмеженого часу на кожного окремого оператора. Тому технологія тестування передбачає 10-хвилинний перерив на відпочинок обстежуваного між другим і третім тестами. Цей перерив має велике фізіологічно-гігієнічне значення і відповідає ергономічним вимогам до організації робочого часу. З метою всебічного урахування психологічних особливостей обстежуваного після виконання всього комплексу тестових завдань, обстежуваний дає суб'єктивну оцінку виконаної роботи і свого стану. В разі невиконання всіх тестів по об'єктивним (технічним, організаційним) причинам, йому призначається інше час, а виконання тестів продовжується з початку того тесту, на якому дослідження було перервано.

Аналіз результатів і побудова прогнозу профпридатності виконується автоматично в разі проходження всього дослідження повністю. Оцінки по окремих тестах і прогноз професійної придатності обстежуваних операторів заносяться в спеціальний протокол, який надається уповноваженому представнику адміністрації підприємства. Психодіагностическі показники оцінюються по 7-бальної шкалі: дуже високий, високий, середньовисокий, середній, середньнизкий, низкий, дуже низкий. Оціночні шкали розробляються по матеріалам дослідження первинної групи операторів енергопідприємства методом перцентилей. Середній рівень відповідає середнім оцінкам по групі, а 7-бальна шкала дозволяє оцінити не тільки загальний рівень вираженості того або іншого професійного якості, але і його відносний рівень по відношенню до професійної групи, в якій передбачено працювати обстежуваному кандидату в оператори, що створює передумовки для індивідуалізації підготовки оператора, якщо він допускається (рекомендується) до цієї професії, але якісь професійно-важливі психофізіологічні якості (ПВПК) вимагають спеціальної тренувки.

Вибір критеріїв професійної придатності до операторської праці виконується по матеріалам дослідження, шляхом розбиття всіх кандидатів на 4 групи професійної придатності, представлення про які і об оціночних критеріях розроблені і опробовані на операторах енергоблоків ТЭС України [11-13].

*Перша група* – абсолютно придатні. До неї відносяться здорові оператори з високим рівнем

развития ПВПК, надежности и эффективности профессиональной деятельности. В общей совокупности они составляют 15%, а среди виновников аварий – 3%.

*Вторая группа* – профпригодные. К ней относятся здоровые операторы со средним и выше среднего уровнем развития ПВПК. Они в обычной обстановке обеспечивают необходимую надежность управления энергооборудованием, но при переходных режимах функционирования могут допускать ошибки, которые обычно не приводят к серьезным нарушениям технологического режима вследствие их своевременного обнаружения оператором и исправления. В общей совокупности операторов они составляют 58 %, а среди виновников аварий – 30 %.

*Третью группу* - (условно пригодные) составляют здоровые и практически здоровые операторы (кандидаты в операторы) со средне низким уровнем развития ПВПК. Операторам этой категории свойственно снижение экономичности управления энергооборудованием в стационарном режиме, а при переходных - резкое возрастание вероятности ошибки управления, сочетающееся со снижением вероятности ее своевременного обнаружения и исправления. В общей совокупности операторов индивиды III группы профпригодности составляют 20 %, а среди виновников аварий – 46 %.

К *четвертой группе* профпригодности - непригодные к операторскому труду, относятся лица с низким и очень низким уровнем развития ПВПК, а также прогностически неблагоприятными изменениями в структуре личности. Для них характерен повышенный уровень заболеваемости, обусловленный несоответствием психофизиологического статуса требованиям операторской деятельности. Операторская деятельность у них не формируется даже при индивидуализации профподготовки, либо формируется с очень низким уровнем надежности. Более 20 % операторов, совершивших аварии относятся к IV группе профпригодности, хотя в общей совокупности они составляют менее 7 %.

В соответствии с данной классификацией получены данные о ГПП для всех обследованных операторов с помощью экспертных оценок (выставлялись 3 ведущими специалистами энергопредприятия, хорошо знающими конкретного оператора и его профессиональный уровень). Эти оценки ГПП вводились в базу данных обследованных с целью дальнейшего анализа [14-16].

### Выводы

Предлагаемая методика оценивания психофизиологических показателей профессиональной пригодности кандидатов на операторский труд, основанная на оптимально подобранном комплексе психологических тестов, позволяет на основе выделения наиболее значимых ПВПК определять интегральный критерий - группу профпригодности оператора. Кроме того показано, что системы

профотбора могут использовать не только показатели профессиональных знаний, но и объективные психофизиологические показатели человека, что повышает надежность и точность прогноза группы профессиональной пригодности оператора.

### Список литературы

1. ДК 003:2010: Класифікатор професій. – К.: КНТ. – 2012. – 544 с.
2. Ciapessoni, E. A. Probabilistic approach for operational risk assessment of power systems / E. Ciapessoni, D. Cirio, E. Gagleoti // *CIGRE*. – 2008. – P. 4-114.
3. Кундиев, Ю. И. Гигиена и физиология труда на тепловых электростанциях / Ю. И. Кундиев, А. О. Навакатитян, В. А. Бузунов // *Медицина* – М. – 1982. – 226 с.
4. Герасимов, А. В. Классификационная оценка электроэнцефалограмм при определении пригодности к обучению операторским профессиям / А. В. Герасимов // *Физиологический журнал*. – 1990. – Т.36, № 2. – С. 71-77.
5. Wilson, M. A. History of job analysis. Historical perspectives in industrial and organizational psychology / M. A. Wilson. – Mahwah, NJ. Lawrence Erlbaum Associates. – 2007. – P. 219-241.
6. Chernyi, S. Analysis of complex structures of marine systems with attraction methods of neural systems / S. Chernyi, A. Zhilenkov // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2015. – Vol. 1. – P. 37-44.
7. Hertz, T. Boosting Margin Based Distance Functions for Clustering / T. Hertz, A. Bar-Hillel, D. Weinshall // *Proceedings of the twenty-first international conference on Machine learning*, 2004. – 50 p. – doi:10.1145/1015330.1015389
8. Буров, А. Ю. Разработка и реализация интерактивных дисплейных систем психофизиологического отбора операторов / А. Ю. Буров, А. В. Герасимов, Ю. В. Четверня // *Энергетика и электрификация*. – 1993 – № 3. – С. 26-29.
9. Буров, А. Ю. Психофизиологические корреляты работоспособности операторов теплоэлектростанций / А. Ю. Буров // *Энергетика и электрификация*. – 1991. – №2. – С. 24-27.
10. McCormick, E. J. Job dimensions based on factorial analyses of worker-oriented job variables / E. J. McCormick, J. W. Cunningham, G. G. Gordon // *Personnel Psychology*. – 1967. – Vol. 20, Issue 4. – P. 417-430, doi:10.1111/j.1744-6570.1967.tb02442.x.
11. Zhilenkov, A. Investigation performance of marine equipment with specialized information technology / A. Zhilenkov, S. Chernyi // *Procedia Engineering*. – 2015. – Vol. 100. – P. 1247-1252, doi:10.1016/j.proeng.2015.01.490.
12. Заріцький, О. В. Класифікація сучасних інформаційних систем моделювання та управління людськими ресурсами / О. В. Заріцький, В. В. Судік // *Вісник Чернігівського державного технологічного університету. Серія «Технічні науки»*. – 2015. – № 1(77). – С. 98-108.
13. McGuinness, E. A Systems engineering approach to implementation of safety management systems in the Norwegian fishing fleet / E. McGuinness, I. B. Utne // *Reliability Engineering & System Safety*. – 2014. – Vol. 121. – P. 221-239. – doi:10.1016/j.ress.2013.08.002.
14. Dunlosky, J. Do students use testing and feedback while learning? A focus on key concept definitions and learning to criterion / J. Dunlosky, K. A. Rawson // *Learning and Instruction*. – 2015. – Vol. 39. – P. 32-44, doi:10.1016/j.learninstruc.2015.05.003.

15. **Вавилов, Ю. Н.** Психологическое обеспечение работы с персоналом в энергетике // **Ю. Н. Вавилов, Г. Е. Журавлев** – М.: МОСЭНЕРГО. – 1999. – 150 с.
16. **Буров, А. Ю.** Автоматизированный психофизиологический контроль работоспособности операторов систем управления / **А. Ю. Буров** // *Техника. Экономика. Сер. Эргономика.* – 1991. – Вып. 1 – С. 22-24.
17. **Заріцький, О. В.** Аналітичний огляд методологій та інформаційних систем моделювання та оцінки професійної діяльності людини / **О. В. Заріцький** // *Проблеми інформатизації та управління.* – 2015. – № 1(49). – С. 32-36.
9. **Burov, A. Yu.** Psychophysiological correlates of health operators of thermal power plants. *Energy and electrification*, 1991, **2**, 24-27.
10. **McCormick, E. J., Cunningham, J. W., Gordon, G. G.** Job dimensions based on factorial analyses of worker-oriented job variables. *Personnel Psychology*, 1967, 20(4), 417-430, doi:10.1111/j.1744-6570.1967.tb02442.x.
11. **Zhilentov, A., Chernyi, S.** Investigation Performance of Marine Equipment with Specialized Information Technology. *Procedia Engineering*, 2015, **100**, 1247-1252, doi:10.1016/j.proeng.2015.01.490.
12. **Zarits'kyj, O. V., Sudik, V. V.** Klyasifikatsiia suchasnykh informatsijnykh system modeliuвання ta upravlinnia liuds'kymy resursamy [Classification of modern information systems design and management of human resources]. *Visnyk Chernihiv's'koho derzhavnogo tekhnolohichnoho universytetu. Seriya «Tekhnichni nauky»*, 2015, **1(77)**, 98-108.
13. **McGuinness, E., Utne, I. B.** A systems engineering approach to implementation of safety management systems in the Norwegian fishing fleet. *Reliability Engineering & System Safety*, 2014, **121**, 221-239, doi:10.1016/j.res.2013.08.002.
14. **Dunlosky, J., Rawson, K. A.** Do students use testing and feedback while learning? A focus on key concept definitions and learning to criterion. *Learning and Instruction*, 2015, **39**, 32-44, doi:10.1016/j.learninstruc.2015.05.003.
15. **Vavilov, Yu. N., Zhuravlev, G. E.** Psychological support of work with personnel in the energy sector [Psychological support personnel work in the energy sector], Moscow: MOSENERGO, 1999, 150 p.
16. **Burov, A. Yu.** Automated control of psychophysiological rabotosposobnosti operators of control systems. *Technique. Economy. Ser. Ergonomics*, 1991, **1**, 22-24.
17. **Zarits'kyj, O. V.** Analitichnyj ohliad metodolohij ta informatsijnykh system modeliuвання ta otsinky profesijnoi diial'nosti liudyny [Analytical review methodologies and information systems modeling and evaluation of professional human activities]. *Problemy informatyzatsii ta upravlinnia*, 2015, **1(49)**, 32-36.

#### Bibliography (transliterated)

#### Сведения об авторах (About authors)

**Артюх Светлана Николаевна** – кандидат технических наук, доцент, Украинская инженерно-педагогическая академия, доцент кафедры Охраны труда, стандартизации и сертификации; г. Харьков, Украина; e-mail: artyh-sv@yandex.ua.

**Artyukh Svetlana** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Ukrainian engineering-pedagogical Academy, Docent of the Department of labor Protection, standardization and certification, Kharkiv, Ukraine; e-mail: artyh-sv@yandex.ua.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Артюх, С. Н.** Методика оценивания показателей профессиональной пригодности операторов / **С. Н. Артюх** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 5-9. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.01.

*Please cite this article as:*

**Artyukh, S.** Methods of assessment of indicators of professional suitability of operators. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 5-9, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.01.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Артюх, С. М.** Методика оцінювання показників професійної придатності операторів / **С. М. Артюх** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 5-9. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.01.

**АНОТАЦІЯ** У статті виділено основні аспекти професійної придатності операторів. Запропоновані для діагностичного комплексу професійної придатності операторів атомних станцій раціональні психологічні тести. Описано методику дослідження професійної придатності операторів технологічних процесів і методика побудови моделі прогнозу групи професійної придатності операторів. Визначено найбільш інформативні психофізіологічні показники, що забезпечують високу точність прогнозу.

**Ключові слова:** працездатність, професійний відбір, оператор технологічних процесів, енергетика, професійна придатність, надійність роботи.

Поступила (received) 08.05.2016

УДК 621.031:664.292

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.02

**АНАЛІЗ МЕТОДІВ ВИЗНАЧЕННЯ ШВИДКОСТІ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ХВИЛЬ В КАВІТАЦІЙНІЙ ОБЛАСТІ УЛЬТРАЗВУКОВОГО ПОЛЯ****I. М. БЕРНИК, О. Ф. ЛУГОВСЬКИЙ\***

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», Київ, УКРАЇНА

\*email: atoll-sonic@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** Використання ультразвуку, що пов'язане з обробкою рідинних середовищ є ефективним механізмом концентрації енергії звукової хвилі низької щільності у високу щільність енергії, яка зумовлена пульсаціями та захопленням кавітаційних бульбашок. Достовірний результат пов'язаний із методами вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в умовах розвиненої кавітації, оскільки вона є складовою практично всіх визначальних параметрів ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ. Досліджено застосування імпульсних, оптичних, амплітудно-фазових та енергетичних методів для вимірювання швидкості розповсюдження хвиль. Вибір схеми вимірювання обумовлений умовами експерименту. Встановлена суттєва розбіжність в числових значеннях швидкостей потребує застосування більш обґрунтованих моделей, що описують реальні умови протікання кавітаційного процесу дослідження та прийнятих припущень та передумов при постановці та проведенні досліджень.

**Ключові слова:** ультразвук, швидкість розповсюдження, технологічні середовища, методи вимірювання, кавітаційний процес.

**ANALYSIS METHODS OF DETERMINING VELOCITY DISTRIBUTION WAVES IN THE CAVITATION ZONE ULTRASOUND FIELD****I. M. BERNYK, O. F. LUGOVSKOY**

National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** The main parameters of cavitation processing technology environments is the speed of sound in a cavitation medium pressure, the duration, size: cavitation region, bubbles and core. The most successful use of ultrasound associated with handling liquid media, because in them the phenomenon of ultrasonic cavitation, which is an effective mechanism for concentration of energy of sound waves in the low-density high energy density, which is caused by pulsations and cavitation bubbles popping. An important component in ensuring an effective process of cavitation treatment process fluids is to calculate the ultrasonic technological devices that hold for precavitation mode with the following specification obtained by previous studies. However, reliable results associated with the methods of measuring the velocity of ultrasonic waves in a developed cavitation because it is a part of almost all the defining parameters of ultrasonic cavitation processing technology environments. Measuring the velocity of ultrasonic waves carried pulse, optical, amplitude-phase methods. Pulse methods have a wider dynamic range, measurement accuracy independent of the distance between the transmitter and the object opportunity emitter distance from the subject a considerable distance. Amplitude-phase methods require extended frequency band transceiver emitting element and amplifier path that reduces security and selectivity. Frequency and phase methods have the narrow bandwidth receiving radiating path that provides good value energy radiated and received signals, high noise immunity. Is an effective method for determining the rate for power characteristics, the essence of which is to determine the energy flux density and energy density relative to the ultrasound field. It has been found that the accuracy of measuring the speed of sound depends on whether it should receive the absolute value or relative value can restrict the speed of sound when changing any external parameters. Absolute measurement accuracy is about  $10^{-5}$ , while the relative change as accuracy is much higher, it reaches the order of  $10^{-7}$ . The choice of measurement due to the conditions of the experiment. The essential difference in the numerical values of the speed, complicates the acceptance of an opinion on the actual numerical value of speed and requires more informed research in determining the accepted assumptions and preconditions in the formulation and conduct research.

**Keywords:** ultrasound propagation velocity, technological environment, methods of measurement, cavitation.

**Вступ**

Основними параметрами кавітаційного процесу обробки технологічних середовищ є швидкість розповсюдження звуку в кавітаційному середовищі, тиск, час дії, розміри: кавітаційної області, бульбашок та активної зони. Особливе значення має швидкість розповсюдження хвиль, як складовою практично всіх визначальних параметрів ультразвукової кавітаційної обробки технологічних середовищ. Тому визначення швидкості є задачею актуальною, а її числові

значення, що адекватно відповідають реальним умовам на всьому етапі створення кавітаційної області, відкривають шляхи до інтенсифікації процесів та вдосконалення ультразвукового обладнання.

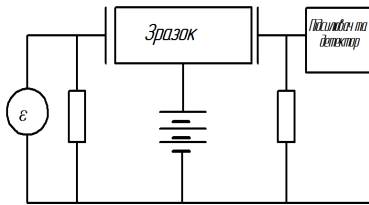
**Аналіз стану питання**

Методи вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль мають низку переваг і суттєві недоліки (рис. 1) [1-4].

**Методи вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль**

**Резонансний**

Заснований на явищі акустичного хвильового резонансу між власними частотами коливач зразка і відповідними частотами зовнішнього генератора. Діапазон – 0,1–15 МГц.

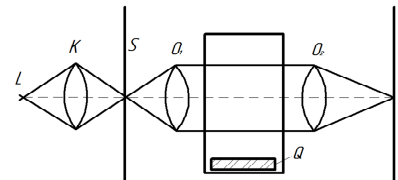


$$v_s = \omega / r = \omega_p l / n\pi = 2\nu_p l / n$$

**Оптичний**

Заснований на явищі дифракції світла на ультразвуковій решітці. Вимірювання акустичних параметрів виражені залежностями:

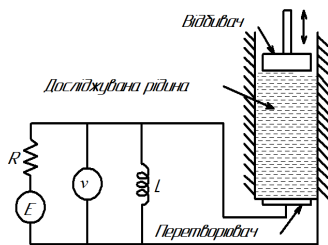
$$\lambda \sin \Theta_n = n\Lambda, \quad \Lambda = A$$



$$v_c = \nu\lambda,$$

**Акустичного інтерферометра**

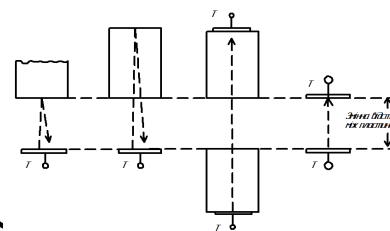
Створення в просторі між випромінювачем і технологічним середовищем інтерференції падаючої і відбитої звукових хвиль.



$$v_c = \nu\lambda$$

**Імпульсний**

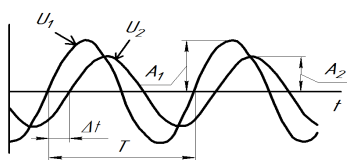
Заснований на дії електричного імпульсу малої тривалості, для генерування та виявлення ультразвукових хвиль в рідинах і твердих тілах широкосмуговим п'єзоелектричним перетворювачем



$$v_s = \Delta l / \Delta \tau$$

**Фазовий**

На основі вимірювання фази хвилі. Різниця фаз  $\Phi$  між сигналами джерела і приймача не залежить від часу і виражається функцією відстані та частоти:

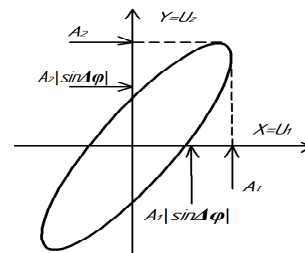


$$\Phi(x, f) = \varphi(0, t) - \varphi(x, t) = kx = \frac{2\pi}{c} fx$$

Для реалізації набули використання: безперервні та імпульсні коливання. Використовується для високоточних вимірювань в режимі біжучої хвилі.

**Метод фігур Лиссажу**

Порівняння двох сигналів шляхом розгляду замкнутої траєкторії точки, що здійснює одночасно два гармонічні коливання в двох взаємно перпендикулярних напрямках.



$$\Delta x = cN / f$$

$$f = cN / x$$

Рис. 1 – Методи визначення швидкості розповсюдження звукових хвиль у середовищах

Найбільшу точність можна отримати, використовуючи імпульсно-фазові методи [5]. Оптичні методи дозволяють виміряти швидкість хвиль на гіперзвукових частотах (до 1011 – 1012 Гц). Імпульсні методи мають наступні переваги перед інтерферометричним методом: значно ширший динамічний діапазон; незалежність точності вимірювання від відстані між випромінювачем і об'єктом; можливість віддалення випромінювача від об'єкта на значну відстань. У свою чергу, імпульсний і амплітудно-фазовий методи вимагають розширеної

смуги частот приймально-випромінюючих елементів і підсилювального тракту, що знижує захищеність і вибірковість. Частотний і фазовий методи мають найбільш вузьку смугу частот прийому випромінюючого тракту, що забезпечує гарні енергетичні співвідношення випроміненого і прийнятого сигналів, високу перешкодозахищеність. Точність вимірювання швидкості звуку залежить від того, чи треба отримати її абсолютні значення, або ж можна обмежитися відносними значеннями швидкості звуку при зміні яких-небудь зовнішніх

параметрів. Точність  $\Delta c/c$  абсолютних вимірювань становить близько 10-5, тоді як точність відносних змін набагато вище, вона досягає величини порядку 10-7. Вибір схеми вимірювання обумовлений умовами експерименту.

### Мета роботи

Мета роботи полягає в аналізі та дослідженні існуючих методів визначення швидкостей розповсюдження хвиль в кавітуючому середовищі.

### Викладення основного матеріалу

Швидкість розповсюдження пружних хвиль  $c_k$  в акустичному середовищі визначається відомою із теорії коливань залежністю [6]:

$$c_0 = \sqrt{E/\rho}, \quad (1)$$

де  $E$  – модуль пружності середовища, що має щільність  $\rho$ .

Наведена залежність засвідчує, що за фізичним змістом вона визначає співвідношення пружних ( $E$ ) і масових ( $\rho$ ) характеристик середовища. Якщо залежність (1) здебільшого використовується для пружних середовищ, то для рідин, що насичені газом, застосовується формула [7]:

$$c_k = 1/\sqrt{\rho\beta_{ac}}, \quad (2)$$

де  $\beta_{ac}$  – адиабатична стискуваність. Порівнюючи собою співвідносяться як  $\beta_{ac} = 1/E$ .

Найбільш успішне використання ультразвуку пов'язане з обробкою рідинних середовищ, оскільки саме в них виникає явище ультразвукової кавітації, що є ефективним механізмом концентрації енергії звукової хвилі низької щільності у високу щільність енергії, яка зумовлена пульсаціями та захопленням кавітаційних бульбашок [8-16].

Важливою складовою в забезпеченні ефективної організації процесу кавітаційної обробки технологічних середовищ є розрахунок ультразвукових технологічних апаратів, який проводять для докавітаційного режиму з наступним уточненням згідно отриманих попередніх досліджень. Разом з тим, як це і зазначалося вище, достовірний результат пов'язаний із методами вимірювання швидкості розповсюдження ультразвукових хвиль в умовах розвиненої кавітації.

Саме виходячи з цього, визначенню швидкості розповсюдження хвиль присвячена низка робіт [12-16]. Так, в роботах [12, 13] відмічається, що швидкість звуку в технологічних газорідних середовищах залежить від співвідношення газової і рідинної компонент і, наприклад, для води, яка має газові бульбашки, діапазон зміни  $c_k$  коливається в доволі широких межах значень 20...100 м/с [12, 13].

За даними роботи [2] числові значення  $c_k$  в

кавітуючій рідині змінюються в більш вузьких межах:  $c_k = 25...30$  м/с, а в роботі [14] наводяться числові значення і ще в менших межах  $c_k = 10...12$  м/с.

За умови, що кавітаційне середовище складається із рідини з розподіленими в ній парогазовими бульбашками і розглядається, як однорідне двофазне з середніми значеннями щільності температури та тиску, швидкість розповсюдження хвиль визначається за формулою Мелока [13]:

$$c_k = \rho_c c_p^2 / [\rho_p \varphi (1 - \varphi)], \quad (3)$$

де  $\rho_c, \rho_p$  – відповідно щільність газу і рідини;

$c_p$  – швидкість звуку в рідині за умови відсутності кавітації;

$\varphi$  – відношення об'єму газової складової до об'єму газорідної суміші (об'ємна частина газу в рідині).

Із формули (3) випливає, що числове значення швидкості  $c_k$  залежить від співвідношення газової і рідинної складових, як це і було зазначено вище.

Варто зазначити, що для визначення швидкості звуку в рідині, де утворення бульбашок відбувається внаслідок кипіння, в роботі [13] приводиться наступна формула:

$$c_k = p_m L \mu / [\rho_p R T (C_p T)^{1/2}], \quad (4)$$

де  $p_m$  – тиск;

$L$  – питома теплота фазового переходу;

$C_p$  – теплоємність рідини;

$R$  – універсальна газова стала;

$\mu$  – молярна маса речовини;

$T$  – температура, за якої здійснюється фазовий перехід.

Використовуючи формулу (4), в роботі [16] здійснені розрахунки за числовими значеннями  $p_m = 4,7 \cdot 10^4$  Па і  $T = 290$  К, які дали значення для  $c_k = 0,77$  м/с, а за результатами експериментальних досліджень автора значення  $c_k = 2,0 \pm 0,5$  м/с.

Ці значення отримані в результаті розгляду стаціонарного кавітаційного процесу під каналом капіляра.

У роботі [15] приведені результати дослідження за умови, що характеристики кавітуючої рідини, представляються моделлю еквівалентного середовища з бульбашками кавітації, що лінійно коливаються [14]. Для такого середовища середня за період коливання щільність  $\rho_k$  і стисливість  $\beta_k$  визначаються згідно залежностей:

$$\left. \begin{aligned} \rho_k &= \rho_p (1-k) + \rho_c k \\ \beta_k &= \beta_p (1-k) + \beta_c k \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де  $k$  – середній за період індекс кавітації;

$\rho_c$  і  $\beta_c$  – щільність і стисливість парогазової



суміші в бульбашках, відповідно;

$\rho_p$  і  $\beta_p$  – щільність і стисливість крапельної рідини, відповідно.

Тут враховано, що щільність парогазової суміші в порожнинах кавітаційних бульбашок значно менша щільності крапельної рідини. Швидкість звуку в середовищі з кавітацією  $c_k$  визначалася за формулою (2).

В історичному розвитку опис утвореної кавітаційної порожнини розглядався [14] як самостійної, так і спільної складової загального процесу кавітації. Таким же чином, пояснювався і процес утворення кавітаційного факелу, переріз в основі якого був використаний для градування широкосмугового акустичного інтенсиметру [15].

Автор цієї роботи зазначає, що зміни чутливості інтенсиметру за інтенсивністю поля в середовищі з кавітацією мають бути пропорційними швидкості коливань в більшій частині робочої полоси частот пристрою, що потребує більш аргументованого пояснення, так як це представляє собою багатofакторну задачу. Не піддаючи сумніву проведені експериментальні дослідження, варто зазначити, що значення швидкості  $c_k$ , отриманої в роботі [15], має величину 766 м/с, що на три порядки вище, ніж в роботі [16]. На жаль, така розбіжність в значеннях  $c_k$  ускладнює прийняття висновку щодо дійсного числового значення швидкості  $c_k$  і очевидно необхідні більш обґрунтовані дослідження в тому числі при встановленні прийнятих припущень та передумов при постановці та проведенні досліджень.

Разом з тим, віддаючи належне параметру  $c_k$ , зупинимося іще на методі його визначення за енергетичними характеристиками, приведеними в роботі [16]. Сутність методу полягає у визначенні щільності потоку енергії та співвідношенні до щільності енергії ультразвукового поля.

Загальновідомо [1, 2], що щільність потоку енергії, яка переноситься хвилею визначається залежністю:

$$J_0 = p_{\max}^2 / (2\rho c), \quad (6)$$

де  $p_{\max}$  – максимальний тиск, за межею якою перевищується поріг кавітації і формується кавітаційна хмара.

А щільність енергії ультразвукового поля в даній області:

$$w_0 = p_{\max}^2 / (2\rho c^2). \quad (7)$$

Порівнюючи залежності (6) і (7) можна отримати формулу для визначення  $c$  в даному середовищі:

$$c = J_0 / w_0. \quad (8)$$

Отже, визначивши щільність потоку енергії, що переноситься через кавітуюче середовище  $I_k$  і щільність енергії в самому кавітуючому середовищі,

можна знайти значення швидкості розповсюдження звуку  $c_k$  в кавітуючому середовищі.

В роботі [16] використано цей підхід при проведенні дослідів на спеціальній експериментальній установці, яка реалізує звукокапілярний ефект.

Аналіз числових даних роботи [16] підтверджує, що суттєвий вплив на швидкість розповсюдження звуку в кавітаційному середовищі має тиск. Його збільшення в 4.0 рази для діаметра капіляру  $d=0.34$  мм приводить до збільшення швидкості в 4.8 рази із значення 6,67 м/с до 32,0 м/с. Інші характеристики не мають такого суттєвого впливу.

В цитованій роботі [16] не приводиться можливість виникнення дисперсії фазової швидкості поширення хвиль, яка для плоскої хвилі за даними роботи [2] має вигляд:

$$\frac{\omega_k}{c_k} = \frac{\omega}{c_0} \left( 1 + \frac{4\pi R_0 c_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega} \right)^{1/2}, \quad (9)$$

де  $\omega$  – частота хвилі;

$c_0, c_k$  – швидкість звуку в рідині без кавітації і

при наявності кавітації;

$n$  – кількість бульбашок в одиниці об'єму рідини;

$R_0$  – рівноважний радіус бульбашки;

$\omega_0$  – резонансна частота бульбашки;

$\mu$  – коефіцієнт згасання коливань бульбашки.

Вираз (9) представляє собою хвильовий коефіцієнт з урахуванням дисперсії та розсіяння енергії.

В роботі [17] ця залежність використовується з припущенням, що концентрація бульбашок в рідині невелика. Тому вираз (9) спрощується і приводиться до вигляду:

$$\frac{\omega_k}{c_k} = \frac{\omega}{c_0} \left( 1 + \frac{4\pi R_0 c_0^2}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\mu\omega} \right). \quad (10)$$

Розв'язок рівняння (10) для області частот  $\omega < \omega_0$  відносно переміщення представлено у вигляді графічної залежності переміщення  $u(x, \tau) / u_0$  від частоти  $\pi$  (рис. 2) [17].

Отримана графічна залежність (рис. 2) свідчить про наявність вищих гармонік [18], що підтверджує можливість виникнення кавітаційних процесів, де швидкість залежить від частоти коливань, однак в роботі [17] відсутні відомості для яких середовищ таке явище має місце.

Таким чином, проведений всебічний аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль у кавітуючому середовищі та оцінка числових значень швидкостей засвідчує, що на даному етапі не існує загальноприйнятої методики та єдиного уявлення про сутність реального процесу зародження кавітаційної області її розвитку та завершення.

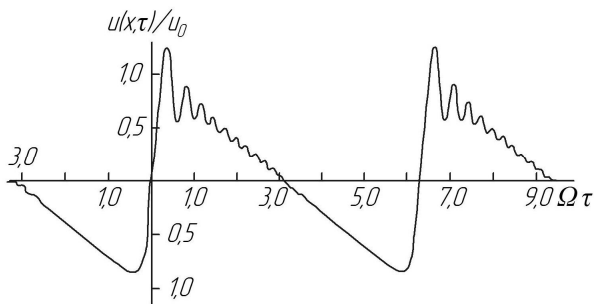


Рис. 2 – Зміна переміщення в залежності від частоти

### Висновки

1. Здійснений аналіз методів визначення швидкостей розповсюдження хвиль в дисперсних середовищах засвідчує значну відмінність в їх числових значеннях, що обумовлено відсутністю загальноприйнятої моделі кавітації.

2. Заслугує уваги енергетичний підхід для визначення швидкості розповсюдження хвиль в дисперсних середовищах, однак достовірність результатів розрахунків залежить від точності значень складових формули щільності енергії звукового поля.

3. Виникає необхідність в експериментальній перевірці запропонованих методів визначення швидкості розповсюдження хвиль, уточнення для конкретних технологічних середовищ їхніх числових значень з метою практичного застосування в розрахунках раціональних параметрів та режимів кавітації.

### Список літератури

1. Мэзон, У. Физическая акустика / У. Мэзон // *Методы и приборы ультразвуковых исследований*, М.: Мир. – 1966. – Т.1 – С. 327-397.
2. Колесников, А. Е. Ультразвуковые измерения / А. Е. Колесников. – М.: Издательство стандартов. – 1970. – 240 с.
3. Ноздрев, В. Ф. Молекулярная акустика / В. Ф. Ноздрев, Н. В. Федорищенко – М.: Высшая школа, 1974. – 288 с.
4. UA92949 Патент України на винахід, МПК – 2011.01. Спосіб вимірювання швидкості поширення ультразвукових коливань у середовищах, що рухаються / Сидоров Г. І. (Україна) G01N29/02; заявл. 05.01.2009; опубл. 27.12.2010, Бюл. № 24. – 3 с.
5. Зубков, О. В. Метод высокоточного измерения скорости распространения ультразвуковых колебаний в движущихся средах / О. В. Зубков, К. Н. Полтавский, Г. И. Сидоров // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. – 2012. – 2/9 (56). – С. 8-11.
6. Ультразвук. Маленькая энциклопедия. – М.: Сов. энцикл. – 1979. – 400 с.
7. Красильников, В. А. Введение в физическую акустику / В. А. Красильников, В. В. Крылов // М.: Наука. – 1984. – 400 с.
8. Kleiman, J. Benefits of ultrasonic peening treatment in fatigue improvement of welded elements // J. Kleiman, Kudryavtsev Y., Lugovskoy A. / *Proceeding of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Engineering OMAE 2012*. Rio de Janeiro, Brazil. – 2012.
9. Луговской, А. Ф. Ультразвуковая кавитация в

- современных технологиях / А. Ф. Луговской, Н. В. Чухраев – К.: Київський університет. – 2007. – 245 с.
10. Хмелев, В. Н. Ультразвуковые многофункциональные и специализированные аппараты для интенсификации технологических процессов в промышленности, сельском и домашнем хозяйстве./ В. Н. Хмелев, Г. В. Леонов, Р. В. Барсуков, С. Н. Цыганок, А. В. Шалунов. – Бийск: Изд-во Алт. гос. техн. ун-та. – 2007. – 400 с.
  11. Берник, І. М. Встановлення основних параметрів впливу технологічного середовища на робочий процес ультразвукової кавітаційної обробки / І. М. Берник, О. Ф. Луговський // *Вібрації в техніці та технологіях*. – 2014. – № 3 (75). – С. 121-126.
  12. Бэтчелор, Г. К. Волны сжатия в суспензии газовых пузырьков в жидкости / Г. К. Бэтчелор // *Механика. Сб. переводов иностранных статей*. – 1968. – 3 (109). – С. 65-89.
  13. Накоряков, В. Е. Распространение волн в газо- и жидкостных средах. / В. Е. Накоряков, Б. Г. Покусаев, И. Р. Шрейберг // *Новосибирск. Изд-во ИФТ АН СССР*. – 1983. – 237 с.
  14. Розенберг, Л. Д. Кавитационная область / Л. Д. Розенберг // *Мощные ультразвуковые поля*. – М.: Наука. – 1968. – С. 223-265.
  15. Давиденко, Л. А. Приведенные характеристики среды и акустического поля при кавитации / Л. А. Давиденко // *Тр. Одес. политехн. ун-та*. – Одесса. – 2008. – Вып. 1(29). – С. 245-250.
  16. Розина, Е. Ю. Звукокапиллярный метод определения скорости звука в кавитирующей жидкости / Е. Ю. Розина // *Акустичний вісник*. – 2005. – Том 8. – №4. – С. 51-58.
  17. Красильников, В. А. Распространение нелинейных звуковых волн в жидкости при кавитации / В. А. Красильников, В. П. Кузнецов // *Акустический журнал*. – 1974. – № 20 (3). – С. 473-477.
  18. Карпман, В. И. Нелинейные волны в диспергирующих средах / В. И. Карпман. – М.: Наука. – 1973. – 475 с.

### Bibliography (transliterated)

1. Mezon, U. Fizicheskaya akustika [Physical acoustics]. *Metody i pribory ul'trazvukovykh issledovaniy [Methods and tools for ultrasound]*, Moscow: Mir, 1966, 1, 327-397.
2. Kolesnikov, A. Ye. Ul'trazvukovyye izmereniya [Ultrasonic measurement], Moscow: Izdatel'stvo standartov, 1970, 240p.
3. Nozdrev, V. F., Fedorishchenko, N. V. Molekulyarnaya akustika [Molecular acoustics], Moscow: Vysshaya shkola, 1974, 288 p.
4. UA92949 Patent Ukrayiny na Vynakhid, MPK – 2011,01. Sposob vymiryuvannya shvidkosti Poshyrennya ul'trazvukovykh kolyvannya u seredovyshche, chto rukhayut'sya [Ukraine patent for invention, IPC - 2011.01. The method of measuring the speed of propagation of ultrasonic vibrations in environments that move], H. I. Sydorov, G01N29/02; zayavl. 05.01.2009; opubl. 27.12.2010, Byul. № 24, 3 p.
5. Zubkov, O. V., Poltavskiy, K. N., Sidorov, G. I. The method of precision measuring of propagation velocity of ultrasonic vibration in the moving environments, Eastern-European Journ. of Enterprise Technol., 2012, 2/9(56), 8-11.
6. Ul'trazvuk. Malen'kaya entsiklopediya [Ultrasound. Little encyclopedia], Moscow: Sov. Entsikl., 1979, 400 p.
7. Krasil'nikov, V. A., Krylov, V. V. Vvedeniye v fizicheskuyu akustiku [Introduction to Physical Acoustics], Moscow: Nauka, 1984, 400 p.

8. **Kleyman, J., Kudryavtsev, Y. U., Lugovskoy, A.** Benefits of ultrasonic peening treatment in fatigue improvement of welded elements, *Proceeding of the ASME 2012 31st International Conference on Ocean, Offshore and Engineering OMAE 2012*. Rio de Janeiro, Brazil, 2012.
9. **Lugovskoy, A. F., Chukhrayev, N. V.** Ul'trazvukovaya kavitatsiya v sovremennykh tekhnologiyakh [Ultrasonic cavitation in modern technologies], Kyiv: Kiïvs'kiy unіversitet, 2007, 245 p.
10. **Khmelev, V. N., Leonov, G. V., Barsukov, R. V., Tsyganok, S. N., Shalunov, A. V.** Ul'trazvukovyye mnogofunktsional'nyye i spetsializirovannyye apparaty dlya intensivatsii tekhnologicheskikh protsessov v promyshlennosti, sel'skom i domashnem khozyaystve [Ultrasonic Multifunctional and Specialized Equipment for Intensification of technological processes in industry, agriculture and households], Biysk: Izd-vo Alt. gos. tekhn. un-ta, 2007, 400 p.
11. **Bernyk, I. M., Lugovskoy, O. F.** Determination of the basic parameters of influence of technological environment on the workflow ultrasonic cavitation treatment, *Vibration in engineering and technology*, 2014, **3(75)**, 121-126.
12. **Betchelor, G. K.** Volny szhatiya v suspenzii gazovykh puzyr'kov v zhidkosti [The compression waves in the suspension of gas bubbles in the liquid], *Mekhanika. Sb. perevodov inostrannykh statey [Mechanics. Coll. translations of foreign articles]*, 1968, **3(109)**, 65-89.
13. **Nakoryakov, V. Ye., Pokusayev, B. G., Shreyberg, I. R.** Rasprostraneniye voln v gazo- i zhidkostnykh sredakh, *Novosibirsk. Izd-vo IFT AN SSSR*, 1983, 237 p.
14. **Rozenberg, L. D.** Kavitatsionnaya oblast'. Moshchnyye ul'trazvukovyye polya [Cavitation region. Powerful ultrasonic fields], Moscow: Nauka, 1968, 223-265.
15. **Davidenko, L. A.** Privedennyye kharakteristiki sredey i akusticheskogo polya pri kavitatsii [These characteristics of the medium and the acoustic field with cavitation]. *Tr. Odes. politekhn. un-ta*, Odessa, 2008, **1 (29)**, 245-250.
16. **Rozenberg, L. D., Yu. Yu.** Zvukokapilyarnyy metod opredeleniya skorosti zvuka v kavitiruyushchey zhidkosti [Zvukokapilyarnyy method of determining the speed of sound in the liquid cavitation], *Akustichnyy visnik [Acoustic Bulletin]*, 2005, **4(8)**, 51-58.
17. **Krasil'nikov, V. A., Kuznetsov, V. P.** Rasprostraneniye nelineynykh zvukovykh voln v zhidkosti pri kavitatsii [Propagation of nonlinear acoustic waves in the fluid in cavitation], *Akusticheskyy zhurnal [Acoustic magazine]*, 1974, **20(3)**, 473-477.
18. **Karpman, V. I.** Nelineynyye volny v dispergiruyushchikh sredakh [Nonlinear waves in dispersive media], Moscow: Nauka, 1973, 475 p.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Берник Ірина Миколаївна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», докторант кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і мехатроніка»; тел.: (097)513-30-73; e-mail: iryna\_bernyk@i.ua

**Bernyk Iryna Mykolayivna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", doctoral student Department at Applied Hydro-Aeromechanics and Mechatronics; tel. (097)513-30-73; e-mail: iryna\_bernyk@i.ua

**Луговський Олександр Федорович** – доктор технічних наук, професор, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», завідувач кафедри «Прикладна гідроаеромеханіка і мехатроніка»; тел.: (067)250-02-92; e-mail: atoll-sonic@ukr.net

**Lugovskoy Oleksandr Fedorovich** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Head of the Department at Applied Hydro-Aeromechanics and Mechatronics; tel. (067)250-02-92; e-mail: atoll-sonic@ukr.net

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Берник, І. М.** Аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітаційній області ультразвукового поля / **І. М. Берник, О. Ф. Луговський** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 10-15. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.02.

Please cite this article as:

**Bernyk, I. M., Lugovskoy, O. F.** Analysis methods of determining velocity distribution waves in the cavitation zone ultrasound field. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 10-15, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.02.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Берник, И. М.** Анализ методов определения скорости распространения волн в кавитационной области ультразвукового поля / **И. М. Берник, О. Ф. Луговской** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 10-15. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.02.

**АННОТАЦИЯ** Использование ультразвука с целью обработки жидкостных сред является эффективным механизмом концентрации энергии звуковой волны низкой плотности в высокую плотность энергии, обусловленного пульсациями и захлопыванием кавитационных пузырьков. Достоверный результат связан с методами измерения скорости распространения ультразвуковых волн в условиях развитой кавитации, поскольку она является составной практически всех определяющих параметров ультразвуковой кавитационной обработки технологических сред. Исследовано применение импульсных, оптических, амплитудно-фазовых и энергетических методов для измерения скорости распространения волн. Выбор схемы измерения обусловлен условиями эксперимента. Установлено существенное расхождение в числовых значениях скоростей требует применения более обоснованных моделей, описывающих реальные условия протекания кавитационного процесса исследования, принятых допущений и предпосылок при постановке и проведении исследований.

**Ключевые слова:** ультразвук, скорость распространения, технологические среды, методы измерения, кавитационный процесс.

Надійшла (received) 14.05.2016

## СИСТЕМЫ С НАПРАВЛЕНИЕМ РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА В ОПЕРАЦИОННЫХ СТАНЦИЯХ С СИЛОВОЙ ГОЛОВКОЙ И НАСАДКОЙ

**В. М. БУРДЕЙНАЯ<sup>1</sup>, А. Р. ТРИЩ<sup>2</sup>, Н. А. ДОЦЕНКО<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Кафедра Охраны труда, стандартизации и сертификации, УИПА, Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> Аспирант, УИПА, Харьков, УКРАИНА

<sup>3</sup> Кафедра Общетехнических дисциплин, СГАУ, Сумы, УКРАИНА

**АННОТАЦИЯ** В статье рассмотрена функциональная зависимость изменения полей рассеяния размеров от базы и позиционных отклонения осей. Получены статистические характеристики распределения от базовой поверхности до оси отверстия и расположения осей отверстий. Предложены зависимости для расчета полей рассеяния размера от базы и позиционного отклонения при обработке отверстий в системах с направлением режущего инструмента. Определен удельный вес влияния факторов на точность обработки координированных отверстий в системах с направлением режущего инструмента.

**Ключевые слова:** точность, характеристика, координированные отверстия, размер, фактор, инструмент.

## SYSTEM WITH THE DIRECTION OF THE CUTTING TOOL IN OPERATIOG STATIONS WITH THE POWER HEAD AND ATTACHMENT

**V. BURDEINA<sup>1</sup>, A. TRICHSH<sup>2</sup>, N. DOTSENKO<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Department of labor protection, standardization and certification, UIPA, Kharkov, UKRAINE

<sup>2</sup> Graduate student, UIPA, Kharkov, UKRAINE

<sup>3</sup> Department of General Technical Sciences, SSAU, Sumy, UKRAINE

**ABSTRACT** The article considers the functional dependence of the stray fields from the base size and position deviation of the axes. The purpose of a comprehensive study of the influence of various elements of technological equipment of modular machines (power heads, jigs and fixtures) to provide the normalized precision machining of holes coordinated with consideration of the positional deviations of their axes during machining and without guiding the cutting tool. The obtained statistical characteristics of the distribution from the base surface to the bore axis and the location of the axes of the holes. Checked the hypothesis about the adequacy of the presented results of research at F-criterion and t-criterion. The dependences for calculation of the stray fields from the base size and position deviation in the machining of holes in the systems with the direction of the cutting tool. Set change limits when using drill bushings with factors such as the length of a guide portion, the overhang over the end of the sleeve, the diameter of the tool, the hardness of the processed material. Determined the proportion of influence of factors on the machining accuracy of holes in the coordinate systems with the direction of the cutting tool. The obtained values of parameters of statistical analysis models in a coordinated drilling of holes nozzles with the conductors. Determined the total effect of controllable factors on the magnitude of the stray fields of size from the base to the axis of the hole and the positional deviation of the bore axis, giving a substantial reserve regulation precision machining coordinated holes. The change in diameters does not lead to a significant increase in stray field.

**Keywords:** accuracy characteristics, the coordinated holes, size, factor, tool.

### Введение

В машиностроении показатели качества изделий тесно связаны с точностью обработки деталей, поскольку полученные размеры, форма и расположение элементарных поверхностей определяют фактические зазоры и натяги в соединениях, а, следовательно, не только технические параметры, но и такие характеристики как надежность и долговечность [1-3].

Общая погрешность обработки машиностроительных деталей обусловлена действием большого числа факторов технологического процесса, что проявляется в виде определенного количества отклонений параметров деталей от допустимых

величин, которые могут быть наблюдаемы на отдельных промежутках процесса[4-6].

### Цель работы

Целью работы является комплексное исследование влияния различных элементов технологической оснастки агрегатных станков (силовых головок, кондукторов и приспособлений) на обеспечение нормированной точности обработки координированных отверстий с учетом позиционного отклонения их осей при обработке отверстий без направления режущего инструмента.

**Методика исследования**

Для проведения экспериментальных исследований использована операционная станция с силовой головкой, насадкой и подвижным кондуктором [7].

На рис. 1 показана станция, предназначенная для одновременного сверления 2-х диаметрально противоположных отверстий Ø1, Ø2 и Ø3 мм.

1 – силовая головка, 2 – приспособление, 3 – заготовка, 4 – делительный стол, 5 – кондуктор, 6 – двухшпиндельная насадка.

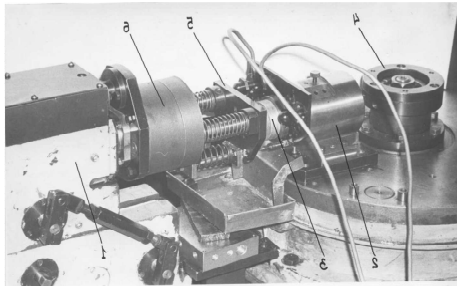


Рис. 1. Позиция для обработки с направлением режущего инструмента

Общий вид станции, содержащей силовой стол, представлен на рис. 2, где 1 – бабка, 2 – силовой стол, 3 – шпиндель с инструментом, 4 – заготовка, 5 – приспособление.

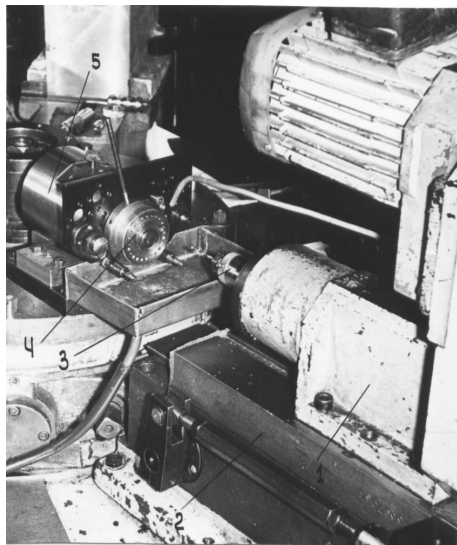


Рис. 2. Позиция для обработки с использованием поворотного стола

На представленных станциях стэнда обрабатывались заготовки из стали 45, СЧ 15 и алюминиевого сплава АЛ 9. [8]

**Точность систем с направлением режущего инструмента**

Функциональная зависимость изменения полей рассеяния размеров от базы и позиционные отклонения осей отверстий могут быть представлены в виде [9, 10]:

$$\omega_{в;о} = f(d_{и}, HB, l_{см}, l_x), \quad (1)$$

где  $\omega_{в;о}$  – поле рассеяния размера от базы или позиционного отклонения, мкм;

$d_{и}$  – диаметр инструмента;

$l_{см}$  – длина направляющей части кондукторной втулки, мм;

$l_x$  – вылет инструмента за торец кондукторной втулки, мм.

Планирование и проведение полного факторного эксперимента типа  $2^4$  позволяет получить математическую модель точности обработки координированных отверстий [11,12]. Отклонения размеров от базы и позиционных отклонений осей отверстий в каждой из 16 точек плана эксперимента обрабатывали в Exseel, в результате чего получены статистические характеристики распределений, представленные в таблице 1, для  $\omega_b$ , а в таблице 2 для  $\omega_o$ .

Таблица 1 – Статистические характеристики распределения от базовой поверхности до оси отверстия

Точки плана	Статистические характеристики					
	$\bar{X}$ , мм	S, мм	W, мм	$\omega_b$ , мм	$\lambda$	$\alpha$
1	0,504	0,683	0,4	0,525	0,342	1,27
2	0,508	0,0695	0,4	0,534	0,348	1,29
3	0,657	0,120	0,7	0,921	0,34	0,734
4	0,633	0,111	0,65	0,854	0,341	0,932
5	0,486	0,0621	0,35	0,477	0,355	1,749
6	0,454	0,0516	0,3	0,396	0,344	1,693
7	0,627	0,109	0,65	0,837	0,335	0,914
8	0,642	0,114	0,7	0,877	0,326	0,691
9	0,599	0,0997	0,6	0,676	0,332	0,83
10	0,657	0,119	0,7	0,917	0,34	0,734
11	0,69	0,13	0,8	0,999	0,325	0,6
12	0,648	0,116	0,7	0,889	0,331	0,708
13	0,541	0,802	0,5	0,616	0,321	0,856
14	0,486	0,619	0,35	0,476	0,354	1,749
15	0,654	0,118	0,7	0,909	0,337	0,726
16	0,651	0,117	0,7	0,895	0,334	0,717
17	0,533	0,778	0,45	0,598	0,346	1,346
18	0,505	0,835	0,5	0,641	0,334	0,82
19	0,547	0,824	0,5	0,633	0,329	0,989

Таблица 2 – Статистические характеристики распределений отклонений расположения осей отверстий

Точка и плана	Статистические характеристики					
	$\bar{X}$ , мм	S, мм	W, мм	$\omega_0$ , мм	$\lambda$	$\alpha$
1	2	3	4	5	6	7
1	1,444	0,348	2	2,349	0,348	- 0,394
2	1,447	0,349	2	2,357	0,349	- 0,397
3	1,432	0,440	2,5	2,971	0,8	0,106
4	1,515	0,405	2,5	2,734	0,324	0,172
5	0,988	0,316	1,8	2,136	0,351	0,422
6	0,967	0,989	1,8	1,955	0,321	0,188
7	1,208	0,400	2,4	2,701	0,333	0,035
8	1,453	0,406	2,5	2,745	0,325	0,122
9	1,335	0,385	2,4	2,604	0,321	0,875
10	1,348	0,417	2,5	2,809	0,323	0,384
11	1,453	0,451	2,8	3,043	0,322	0,00214
12	1,403	0,401	2,4	2,711	0,334	0,128
13	1351	0,351	1,8	2,367	0,39	0,286
14	0,997	0,299	1,8	2,023	0,332	0,522
15	1,427	0,409	2,5	2,766	0,227	0,872
16	1,409	0,403	2,4	2,723	0,336	0,158
17	1,447	0,349	2,0	2,357	0,349	0,397
18	1,244	0,348	2,0	2,357	0,348	0,194
19	1,151	0,350	2,0	2,366	0,350	0,101

Каждая точка плана эксперимента представляет собой один опыт и определяется практическим полем рассеяния  $\omega_b$  или  $\omega_0$ . Выходные характеристики экспериментальных моделей  $\omega_b$  и  $\omega_0$  в таблице плана эксперимента пересчитаны в логарифмическом виде. Гипотеза об однородности дисперсий полей рассеяния в каждой точке плана эксперимента проверялась по критерию Кохрена и показала их однородность.

Для проведения статистического анализа выполнена дополнительная серия опытов ( $n_0 = 3$ ) при нулевом уровне исследуемых факторов. За нулевой уровень принята обработка отверстий  $\varnothing 2$  мм в образцах из серого чугуна.

Коэффициенты регрессии  $\omega_0, \omega_i, \omega_{ij}$ , методика которых рассмотрена ранее, вычислены на основании данных матрицы плана ПФЭ  $2^4$ . Пределы изменения варьируемых факторов при сверлении координированных отверстий сведены в таблицу 4. Математические модели точности обработки определялись по методике, изложенной в работах [13-15].

По результатам экспериментов оценивались коэффициенты уравнения регрессии и находились

искомые математические модели полей рассеяния размеров и отклонений.

Для полей рассеяния размера от базовой поверхности до оси обрабатываемого отверстия записываем:

$$Y_B = 2,853 - 0,0043 Z_1 + 0,919 Z_2 - 0,0383 Z_3 + 0,361 Z_4 - 0,00243 Z_5 - 0,0178 Z_6 - 0,00006 Z_7 + 0,0299 Z_8 - 0,00536 Z_9 - 0,0068 Z_{10} + 0,0293 Z_{11} - 0,0056 Z_{12} - 0,0076 Z_{13} - 0,0055 Z_{14} + 0,0062 Z_{15} \quad (1)$$

– для полей рассеяния позиционных отклонения:

$$Y_0 = 3,405 - 0,00987 Z_1 + 0,04174 Z_2 - 0,0239 Z_3 + 0,0221 Z_4 - 0,00063 Z_5 - 0,00324 Z_6 + 0,002 Z_7 + 0,00141 Z_8 + 0,00376 Z_9 + 0,013 Z_{10} - 0,0017 Z_{11} - 0,00363 Z_{12} + 0,003666 Z_{13} + 0,00371 Z_{14} + 0,00379 Z_{15} \quad (2)$$

Таблица 4 – Область изменения независимых факторов при сверлении отверстий силовой головкой с насадкой при направлении режущего инструмента

Уровень варьирования	Независимые факторы и их логарифмы							
	длина кондукторной втулки		вылет инструмента		твердость обрабатываемого материала		диаметр инструмента	
	$l_{вт}$ , мм	$lg l_{вт}$	$l_x$ , мм	$lg l_x$	НВ, МПа	$lg НВ$	$d_n$ , мм	$lg d_n$
	Верхний (+1)	18	1,255	3,5	0,544	1930	3,286	3,0
Нулевой (0)	12,5	1,097	2,5	0,398	1240	3,093	2,0	0,301
Нижний (-1)	7	0,845	1,5	0,176	550	2,740	1,0	0
Интервал варьирования	-	0,205	-	0,184	-	0,273	-	0,239

В результате статистического анализа уравнений (1) и (2) установлено что коэффициенты от  $Z_5$  до  $Z_{15}$  в уравнениях незначимы, ибо они меньше доверительных интервалов ( $\Delta B_B = 0,2999$ , а  $\Delta B_0 = 0,137$ ) для коэффициентов этих уравнений.

Поэтому уравнения (1) и (2) можно записать в следующем виде:

$$\hat{Y}_B = 2,853 - 0,0043 Z_1 + 0,919 Z_2 - 0,0383 Z_3 + 0,361 Z_4 \quad (3)$$

$$\hat{Y}_0 = 3,405 - 0,00987 Z_1 + 0,0417 Z_2 - 0,0239 Z_3 + 0,0221 Z_4 \quad (4)$$

Гипотезу об адекватности представленных результатов исследования можно считать правильной, ибо проверки, как по F-критерию, так и по t-критерию показали, что расчетные значения этих критериев меньше табличных. Результаты статистического

анализа представлены в таблице 5. Кодированное значение факторов при сверлении отверстий силовой головкой с насадкой и кондуктором представлено в таблице 6.

Таблица 5 – Значения параметров статистического анализа моделей при сверлении координированных отверстий насадками с кондукторами

Параметры статистического анализа	Обозначение параметра	Значение параметров для моделей	
		У <sub>В</sub>	У <sub>О</sub>
Критерий Фишера (F = 6,927, при 1% уровня значимости)	F	1,17	6,875
Критерий Стьюдента (t = 31,6, при 0,1% уровня значимости)	t	14,3	6,28
Доверительный интервал для коэффициентов регрессии	Δ <sub>bi</sub>	0,0299	0,0137
Дисперсия, характеризующая неадекватность математической модели	S <sub>на</sub> <sup>2</sup>	0,00046	0,0128
Дисперсия ошибки определения коэффициентов регрессии	S <sub>bi</sub> <sup>2</sup>	0,000016	0,00001
Дисперсия ошибки опыта	S <sub>ош</sub> <sup>2</sup>	0,000259	0,00016

Таблица 6 – Кодированное значение факторов при сверлении отверстий силовой головкой с насадкой и кондуктором

Наименование фактора	Код	Кодированное значение факторов
Длина втулки кондукторной	Z <sub>3</sub>	(lg l <sub>BT</sub> – 1,0969)/0,2051
Вылет инструмента за торец втулки	Z <sub>4</sub>	(lg l <sub>x</sub> – 0,3979)/0,184
Твердость обрабатываемого материала	Z <sub>2</sub>	(lg HB – 3,0934)/0,2726
Диаметр инструмента	Z <sub>1</sub>	(lg d <sub>и</sub> – 0,301)/0,2386
Допуск исходного зазора	Z <sub>5</sub>	(lg T <sub>S1</sub> – 1,3975)/0,301

Из зависимостей (3) и (4) видно, что увеличение диаметра сверла d<sub>и</sub> и длины направляющей втулки l<sub>BT</sub> уменьшает величину полей рассеяния размеров от базы и позиционных отклонений, а увеличение вылета инструмента и повышение физико-механических свойств обрабатываемого материала увеличивают ω<sub>в</sub> и ω<sub>о</sub>.

Воспользовавшись данными табл. 6, преобразуем кодовые значения зависимостей (3) и (4) в логарифмические:

$$\lg \omega_v = 1,9431 - 0,0018 \lg d_{и} + 0,337 \lg HB - 0,187 \lg l_{BT} + 0,196 \lg l_x ; \quad (5)$$

$$\lg \omega_o = 3,066 - 0,04137 \lg d_{и} + 0,1531 \lg HB - 0,1165 \lg l_{BT} + 0,12 \lg l_x. \quad (6)$$

Потенцируя уравнения (5) и (6), получаем зависимости для расчета полей рассеяния при обработке с направлением режущего инструмента:

$$\omega_v = 19,6 \frac{l_x^{0,2} HB^{0,34}}{d_{и}^{0,02} \cdot l_{BT}^{0,19}} \quad (7)$$

$$\omega_o = 19,6 \frac{l_x^{0,12} HB^{0,15}}{d_{и}^{0,04} \cdot l_{BT}^{0,12}} \cdot 10^3 \quad (8)$$

Уравнения (7) и (8) рекомендуются для расчета полей рассеяния при использовании кондукторных втулок, у которых диапазон длин направляющей части находится в пределах от 5 мм до 20 мм, вылеты инструмента за торец втулки изменяются в пределах от 1 мм до 5 мм. Пределы изменения диаметров 0,5 мм ≤ d<sub>и</sub> ≤ 3,5 мм, и твердость обрабатываемого материала 500 МПа ≤ HB ≤ 2500 МПа.

При проведении плана экспериментальных исследований не предусматривалось изменение такого фактора как зазор в соединении между кондукторной втулкой и режущим инструментом ввиду технологической сложности обработки малых отверстий кондукторных втулок [15,16]. Однако математические модели, получаемые при обработке планов экспериментов, позволяют включать дополнительные факторы, которые можно ввести, используя дополнительную информацию (ранжированием удельного веса факторов), полученную при исследованиях на подобных объектах.

Удельный вес влияния факторов на точность обработки координированных отверстий представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Удельный вес влияния факторов на величину полей рассеяния  $\omega_\alpha$  и  $\omega_\beta$  при сверлении с направлением режущего инструмента

Точностные характеристики	Удельный вес факторов, %			
	управляемых		неуправляемых	
	геометрических		заданных в чертеже	
	$I_{\text{BT}}$	$I_\chi$	HВ	$d_\alpha$
Размер от базы до оси обрабатываемого отверстия	16	16	39	4
Позиционное отклонение оси отверстия	16	8	29	7

### Выводы

Определено, что суммарное влияние управляемых факторов ( $I_{\text{BT}}$  и  $I_\chi$ ) на величину полей рассеяния размера от базы до оси обрабатываемого отверстия и на позиционное отклонение оси отверстия - существенно (7) и составляет соответственно 32% и 24%, что дает значительный резерв регулирования точности обработки координированных отверстий. Исследованиями установлено, что изменение диаметров не ведет к существенному увеличению полей рассеяния.

### Список литературы

1. **Hirsch, W.** Differential Equations, dynamical systems, and an introduction to chaos / **M. W. Hirsch, S. Smale, R. Devaney** // *Academic Press*. – 2003. – 425 p.
2. **Gurevich, V.** Electronic Devices on Discrete Components for Industrial and Power Engineering / **V. Gurevich**. – CRC Press, New York. – 2008. – 418 p.
3. **Костин, А. В.** Рождение квалиметрии / **А. В. Костин**. – М.: Стандарты и качество. – 2010. – 349 с.
4. **Carlos, G.** Analysis and Design of Marine Structures / **G. Carlos O. Soares**. – CRC Press. – 2009. – 321 p
5. **Oberg, E.** Gage design and gage making / N.-Y. – 1920. – 305 p.
6. **Ettinger, W. J.** Basis for Determining Manufacturing Tolerances / **W. J. Ettinger, W. Bartky** // *The Maschinist*. – 1936. – vol.80 № 36. – P 23-28.
7. **Гугнін, В. П.** Метрологічне забезпечення та перевірка засобів виміральної техніки фізичних величин / **В. П. Гугнін, Г. О. Оборський**. – К.: Наука і техніка. – 2011. – 220 с.
8. **Кондратюк, О. Л.** Підвищення ефективності силових головок для обробки отворів малого діаметра за рахунок застосування електромагнітного приводу подачі: дис. канд. техн. наук / **О. Л. Кондратюк**; наук. кер. **О. А. Мельниченко**. – *Нац. техн. ун-т "ХПИ"*. – Х. – 2008. – 178 с.
9. **Гугнін, В. П.** Основи метрології та виміральної техніки / **В. П. Гугнін, Г. О. Оборський**. – Одеса: Астропринт. – 2003. – 200 с.
10. **Пашенко, Е. А.** Исследование факторов, определяющих точность обработки деталей на агрегатных станках

- ХПО. Отчет о НИР. / **Э. А. Пашенко, В. А. Чепела, Н. В. Латышев** // *УЗПИ*. – Инв. № 02840041668. – Харьков. – 1983. – 90 с.
11. **Арпентьев, Б. М.** Оценка качества сборки соединений по критерию биения / **Б. М. Арпентьев, Н. Ю. Ламнауэр** // *Вісник НТУ "ХПИ"*. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2005. – №9. – С. 48-54. – doi:10.20998/2413-4295.2005.10.09.
  12. **Анурьев, В. И.** Справочник конструктора-машиностроителя / **В. И. Анурьев**; под ред. **И. Н. Жестковой**; 8-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение. – 2001. – Т2. – 912 с.
  13. **Пашенко, Е. А.** Исследование точности обработки деталей на агрегатных станках с применением различных технологических схем Отчет о НИР. / **Э. А. Пашенко, В. А. Чепела, Н. В. Латышев** // *УЗПИ*. – Инв. № В 979436. – Харьков. – 1980. – 132 с.
  14. **Бурдейная, В. М.** Особенности обеспечения точности координированных размеров при использовании типовых технологических схем / **В. М. Бурдейная, Р. М. Триц** // *Технологический аудит и резервы производства*. – 2014. – №3/4 (17). – С. 14-18. – doi.org/10.15587/2312-8372.2014.05.29.
  15. **Ламнауэр, Н. Ю.** Обеспечение качества вращающихся соединений сборкой с термовоздействием.: Дисс. на соиск. учен. степ. к-та техн. наук: / **Н. Ю. Ламнауэр**. – Х.: *Украинская инженерно-педагогическая академия*. – 2006. – 218 с.
  16. **Ламнауэр, Н. Ю.** Модель поля рассеивания погрешности геометрической формы и ошибки взаимного положения поверхностей / **Н. Ю. Ламнауэр, Р. М. Триц** // *Вісник Національного технічного університету "ХПИ"*. – Харків: НТУ "ХПИ". – 2004. – №44. – С.106-110. – doi:10.20998/2413-4295.2004.04.05.

### Bibliography (transliterated)

1. **Hirsch, W., Smale, S., Devaney, R.** Differential Equations, dynamical systems, and an introduction to chaos. *Academic Press*, 2003, 425 p.
2. **Gurevich, V.** Electronic Devices on Discrete Components for Industrial and Power Engineering, CRC Press, New York, 2008, 418 p.
3. **Kostin, A. V.** Birth qualimetry. Moscow: Standards and Quality, 2010, 433 p.
4. **Carlos, G., Soares, O.** Analysis and Design of Marine Structures. CRC Press, 2009, 321 p.
5. **Oberg, E.** Gage design and gage making. N.-Y., 1920, 305 p.
6. **Ettinger, W.J. Bartky, W.** Basis for Determining Manufacturing Tolerances. *The Maschinist*, 1936, **36**(80), 23-28.
7. **Gugin, V. P., Oborskiy, G. O.** Metrologichne zabezpechennya ta povirka zasobiv vimiryuvальної техніки фізичних величин [Metrological maintenance and calibration of measuring instruments of physical quantities]. *Nauka i tehnika [Science and Technology]*, Kyiv, 2010, 220 p.
8. **Kondratyuk, O. L.** Improving the efficiency silverlook for processing small diameter holes through the use of an electromagnetic actuator innings: dis. Cand. tekhn. Sciences. Nat. tekhn. University "KhPI, 2008, 178 p.
9. **Gugin, V. P., Oborskiy, G. O.** Osnovi metrologiyi ta vimiryuvальної техніки [Metrology and Instrumentation]. *Astroprint*, Odesa, 2003, 200 p.
10. **Pashchenko, E. A., Csepel, V. A., Latyshev, N. V.** Study of factors determining the precision of machining on transfer



- machines and machining units CVD. Research report. UZPI inv. No. 02840041668, Kharkov, 1983, 90 p.
11. **Arpentiev, B. M., Lamnauer, N. Yu.** Assessment of build quality connections by the criterion of beats. Bulletin of NTU "KhPI", Kharkov, 2005, **9**, 48-54, doi:10.20998/2413-4295.2005.10.09.
  12. **Anurev, V. S., Zhestkova, S. N.** Reference designer-mechanical engine. Mashinostroenie, Moscow, 2001, 912 p.
  13. **Paschenko, E. A., Csepel, V. A., Latyshev, N. V.** Study of the accuracy of machining on transfer machines and machining units with the use of different technological schemes the research Report. UZPI, inv. No 979436, Kharkov, 1980, 132 p.
  14. **Burdeina, V. M., Trichsh, R. M.** Specific features of ensuring the accuracy of coordinated dimensions when using typical technological schemes. Technology audit and production reserves, 2014, **3/4(17)**, 14-18, doi:10.15587/2312-8372.2014.05.29
  15. **Lamnauer, N. Yu.** Quality assurance of the rotating connection assembly with thermal impact. Diss. on competition of a scientific degree: Ukrainian engineering-pedagogical Academy, 2006, 218 p.
  16. **Lamnauer, N. Yu. Trichsh, R. M.** Model field dissipation errors of geometrical form and of the error of the relative position of surfaces. Bulletin of National technical University "KhPI", Kharkov, 2004, **44**, 106-110. doi:10.20998/2413-4295.2004.04.05.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Бурдейная Виктория Михайловна** – Украинская инженерно-педагогическая академия, ассистент кафедры Охраны труда, стандартизации и сертификации; г. Харьков, Украина; e-mail: zamorskavika@mail.ua.

**Burdeina Vyktozia** – Ukrainian engineering - pedagogical Academy, assistant of the Department of labor Protection, standardization and certification; Kharkov, Ukraine; e-mail: zamorskavika@mail.ua.

**Доценко Наталья Андреевна** – кандидат технических наук, Сумской государственный аграрный университет, ассистент кафедры Общетеchnических дисциплин, г. Сумы, Украина, e-mail: gorbenkonatalija@rambler.ru

**Триш Андрей Романович** – Украинская инженерно-педагогическая академия, аспирант кафедры Охраны труда, стандартизации и сертификации; г. Харьков, Украина; e-mail: trich\_@ukr.net@gmail.com.

**Trichsh Andrei** – Ukrainian engineering - pedagogical Academy, graduate student of the Department of labor Protection, standardization and certification; Kharkov, Ukraine; e-mail: trich\_@ukr.net@mail.ua.

**Dotsenko Natalya** – Candidate of Technical Sciences, Sumy state agrarian University, assistant of the Department of General Technical Sciences, Sumy, Ukraine, e-mail: gorbenkonatalija@rambler.ru

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Бурдейная, В. М.** Системы с направлением режущего инструмента в операционных системах с силовой головкой и насадкой / **В. М. Бурдейная, А. Р. Триш, Н. А. Доценко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 16-21. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.03.

*Please cite this article as:*

**Burdein, V., Trichsh, A., Dotsenko, N.** System with the direction of the cutting tool in operating systems with the power head and attachment. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 16-21, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.03.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Бурдейна, В. М.** Системи з напрямком ріжучого інструменту в операційних системах з силовою головкою і насадкою / **В. М. Бурдейна, А. Р. Триш, Н. А. Доценко** // *Вісник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 43 (1016). – С. 16-21. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.03.

**АНОТАЦІЯ** У статті розглянута функціональна залежність зміни полів розсіяння розмірів від бази і позиційних відхилення осей. Отримані статистичні характеристики розподілу від базової поверхні до осі отвору і розташування осей отворів. Запропоновані залежності для розрахунку полів розсіяння від розміру бази та позиційного відхилення при обробці отворів в системах з напрямком ріжучого інструменту. Визначено питому вагу впливу факторів на точність обробки координованих отворів в системах з напрямком ріжучого інструменту.

**Ключові слова:** точність, характеристика, координовані отвори, розмір, фактор, інструмент.

*Поступила (received) 15.05.2016*

## ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТАКТИКО-ТЕХНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВІЙСЬКОВИХ ГУСЕНИЧНИХ І КОЛІСНИХ МАШИН НА ЕТАПІ ПРОЕКТНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

**А. В. ГРАБОВСЬКИЙ\***, **А. Ю. ВАСИЛЬЄВ**, **М. М. ТКАЧУК**, **А. Ю. ТАНЧЕНКО**,  
**О. В. МАРТИНЕНКО**, **Д. В. КИРИЧУК**, **С. В. БОРИСЕНКО**, **О. І. КАСАЙ**

*Кафедра теорії і систем автоматизованого проектування механізмів і машин, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА*

\*email: grabovski@tmm-sapr.org

**АНОТАЦІЯ** У роботі міститься постановка задачі забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень. Запропонована адаптація методу узагальненого параметричного моделювання до розв'язання задач аналізу динаміки та міцності елементів військових гусеничних і колісних машин. Розглянуті декілька частинних задач. У процесі досліджень використані сучасні програмні комплекси. Розроблені методи та моделі можуть бути застосовані до розв'язання задач обґрунтування параметрів елементів об'єктів бронетанкової техніки за критеріями міцності, захищеності, точності ведення вогню

**Ключові слова:** військова гусенична і колісна машина, тактико-технічна характеристика, режим бойового застосування, напружено-деформований стан, аналіз динаміки та міцності, контактний тиск

## PROVIDING OF TACTICAL AND TECHNICAL CHARACTERISTICS OF MILITARY CATERPILLAR AND WHEELED VEHICLES ON STAGE OF DESIGN RESEARCHES

**A. V. GRABOVSKIY**, **A. YU. VASILIEV**, **M. M. TKACHUK**, **A. YU. TANCHENKO**,  
**O. V. MARTYNENKO**, **D. V. KYRYCHUK**, **S. V. BORYSENKO**, **O. I. KASAI**

*Department theory and systems of automated design of mechanisms and machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkov, UKRAINE*

**ABSTRACT** The paper contains a statement of the problem to ensure performance characteristics of military tracked and wheeled vehicles at the stage of design research. A method of adapting a generalized parametric modeling to solving problems of dynamics analysis and durability of elements of military tracked and wheeled vehicles. We consider particular problems associated with the contact interaction of elements of military vehicles, interaction of shock wave loading hulls with light armored cars, the impact of jet impact forces on the strength of hulls, as well as the interaction of the kinetic ammunition with armored obstacle. During the study used modern software systems. Designed methodological approach combines the flexibility and adaptability by appropriate modification of the operator describing the processes and conditions. The important point is that at this time to address the problems of the analysis is the ability to use powerful software systems that implement, for example, a finite element method. Thus, the combination of these instruments on the basis of the proposed methodology makes it possible to develop a parametric numerical models that can be directly used for the project to ensure tactical and technical characteristics of advanced domestic military tracked and wheeled vehicles. The developed methods and models can be applied to the solution of armored vehicles parameter study problems of elements of objects according to the criteria of strength, security, accuracy of fire.

**Keywords:** military wheeled and caterpillar vehicles, tactical and technical characteristics, mode of combat use, stress-strain state, dynamics and strength analysis, contact pressure

### Вступ

Ситуація на світовому і вітчизняному ринках науково-технічних розробок в області створення, виготовлення і дослідження елементів бронетанкової техніки. Аналіз публікацій [1-12], матеріалів виставок, Internet-матеріалів, а також практики бойових дій у східних областях України дає змогу провести експрес-аналіз стану як ринку озброєнь та військової техніки в цілому, так і його науково-дослідницького сегменту з акцентом на вітчизняних розробників, виробників і постачальників. При цьому можна виділити наступні закономірності.

Характерні особливості ринку науково-технічних розробок в області створення, виготовлення і дослідження об'єктів бронетанкової техніки обумовлюються сучасни-

ми тенденціями її розвитку, а саме зсувом акцентів в озброєнні озброєних сил, різким підвищенням тактико-технічних характеристик створюваних зразків техніки і зниженням термінів їх проектування, дослідження і виготовлення. Спостерігається збільшення в цілому інтересу до легкої бронетанкової техніки при його збереженні до важкої бронетанкової техніки. Відбувається зростання інтересу до модернізації бронетанкової техніки, що перебуває на озброєнні багатьох країн світу.

Для ринку науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт характерне, з одного боку, збільшення інтеграції проектно-дослідницьких робіт і виробничої кооперації в міжнародних масштабах, а також обмежені можливості провідних західних фірм (в тому числі з країн НАТО) допускати передачу в Україну передових

технічних рішень, – з іншого.

Протягом декількох років відбулося різке зменшення закупівель військової техніки Збройними Силами України, яке останнім часом потрібно наростити настільки ж різко. Основні центри науково-дослідних робіт СРСР залишилися в Росії. Там же – основні банки науково-технічної інформації, даних експериментальних досліджень і полігонних випробувань, а також – лабораторні бази і спецобладнання. При цьому доступ до них був істотно обмежений, а в сьогоденних умовах – неможливий. Разом із тим в Україні існує потужна науково-дослідницька інфраструктура, яка за умов системного підходу може бути мобілізована задля розв'язання задач забезпечення тактико-технічних характеристик (ТТХ) військових гусеничних і колісних машин (ВГKM) на етапі проектних досліджень

Відмічені особливості дають підставу зробити висновок про те, що в області науково-дослідних і дослідно-конструкторських робіт (НДДКР) з тематики розробки і модернізації бронетанкової техніки, у першу чергу – військових гусеничних і колісних машин, склалася якісно нова ситуація, в якій виникає необхідність зробити акценти на наступні напрями робіт:

- рішуча відмова від старих форм і методів проведення НДДКР, для яких характерні висока витратність, низька оперативність і слабе застосування сучасних комп'ютерних технологій;
- впровадження, причому в найкоротші терміни, найбільш передових технологій проектування, дослідження і виготовлення в практику роботи підприємств ОПК. Важливо при цьому дотримувати можливість безконфліктного обміну даними у взаємоузгодження форматах даних;
- активне проведення моніторингу стану досліджень у фірмах та країнах-конкурентах і отримання консультативної інформації зі всіх доступних питань;
- активний моніторинг і прогнозування тематики досліджень, які представляють або представлятимуть інтерес для потенційних замовників і споживачів, у першу чергу – ЗСУ;
- концентрація зусиль на ключових напрямках досліджень.

### Постановка задачі

На теперішній час забезпечення ТТХ військових гусеничних і колісних машин здійснюється на етапі розробки на основі аналізу проектних досліджень фізико-механічних процесів і станів, які реалізуються в елементах машин у процесі експлуатації та бойового застосування. Це зумовлено тими обставинами, що від складових ВГKM вимагається не тільки виконання певних функцій, але й висока міцність і надійність. При цьому на елементи машин діють у процесі експлуатації та бойового застосування різноманітні силові, теплові, хімічні впливи. Основною тенденцією останнім часом є якраз як інтенсифікація режимів бойового застосування, що призводить як до зростання рівня окремих чинників ураження, так і розширення множини чинників, які діють у сукупності на один і

той же елемент ВГKM. Відповідно, виникає потреба у створенні нових, більш досконалих, адекватних і точних математичних і числових моделей виникаючих у елементах ВГKM фізико-механічних процесів і станів, оскільки комп'ютерне моделювання дає змогу більш оперативно та економічно обґрунтувати проектно-технологічні параметри їхніх елементів, що забезпечують потрібний рівень ТТХ.

Дослідженням різноманітних фізико-механічних процесів і станів в елементах ВГKM присвячено багато досліджень [13-15]. Разом із тим у цих дослідженнях аналізуються переважно окремі зовнішні та внутрішні чинники. У той же час, як відзначалося вище, ці чинники діють у сукупності. Тому їх потрібно враховувати у створюваних математичних і числових моделях якраз у сукупній дії. Отже, постає проблема розробки таких моделей, які природним чином інтегрують різні чинники, параметри, структури та розподіли. Основною вимогою до цих моделей є можливість їхньої варіативності та керованості із одночасним збереженням цілісності, безконфліктності, а також взаємовпливу різних чинників.

### Метод розв'язання задачі

Для розв'язання поставленої задачі доцільно застосовувати як основу метод узагальненого параметричного моделювання [16]. За його використання кожен компонент цілісної моделі розглядається як узагальнений варіюваний параметр. Це дає змогу формально застосувати усі операції традиційного параметричного аналізу, проте враховуючи кожен раз специфіку тієї чи іншої задачі. Отже, увівши у розгляд масив узагальнених параметрів  $P = \{p_j\}$ , можна поставити у загальному вигляді задачу параметричного синтезу:

$$I(p) \rightarrow \min; L(p, u, f, t) = 0; H_j \leq [H_j]; T_k \geq [T_k].$$

Тут  $I$  – деяка цільова функція,  $L$  – оператор початково-крайової задачі, що описує фізико-механічний процес або стан об'єкту у вигляді просторово-часового розподілу;  $H_j$ ,  $[H_j]$  – відповідно певні характеристики процесів і станів, а також граничні їхні величини (що визначають допустимий рівень тих чи інших характеристик),  $j = 1, \dots, N_H$ ;  $T_k$ ,  $[T_k]$  – поточні та ті, що вимагається досягнути, рівні компонент тактико-технічних характеристик ВГKM,  $k = 1, \dots, N_T$ .

### Контактна взаємодія елементів ВГKM

У даному випадку маємо взаємозв'язані процеси руху того чи іншого елемента машини чи озброєння, з одного боку, його контактну взаємодію зі спряженими елементами, – з іншого боку, а також напружено-деформований стан (НДС) контактуючих тіл. Це, наприклад, рух кульових поршнів радіальної гідропередачі ГОП-900 танкової трансмісії [17] у взаємодії зі статорним кільцем та блоком циліндрів; рух снаряда та взаємодія із стінками гарматного ствола; взаємодія елементів кочення пагону башти танка чи легкоброньованої машини із його

напрямними елементами у процесі здійснення пострілів, наведення на ціль чи руху на місцевості.

Отже, оператор  $L$  у даному випадку розпадається на співвідношення

$$L_1(p_R, v_R, f_R, t) = 0; \quad L_2(f_R, q) = 0; \quad L_3(u, q, t) = 0.$$

Тут  $v_R$  – узагальнені координати, що описують рух досліджуваного елемента, що залежать від масиву параметрів  $p_R$  (наприклад, тиск на елемент), а  $f_R$  – відповідні зусилля, які виникають при цьому. Ці зусилля трансформуються у контактні напруження  $q$ , які викликають напружено-деформований стан, що описується розподілом переміщень  $u$  точок досліджуваного тіла, компонентів тензора деформацій  $\varepsilon = \varepsilon(u)$  та напружень  $\sigma = \sigma(u)$ .

Основна увага, зокрема, приділена аналізу контактної взаємодії кульового поршня з біговою доріжкою в радіальній ГОП (рис. 1). Розглянуто досить загальний клас профілів бігових доріжок на кільці статора (рис. 2). Профіль бігової доріжки в центральній своїй частці є дугою кола радіуса  $R_i$  з кутовою величиною  $2\theta$ . Таким чином, середня частка бігової доріжки є жолобом торіодальної форми, по якому перекочується поршень при обертанні ротора. Радіуси жолоба і поршня передбачається робити близькими для того, щоб зменшити первинний зазор між поршнем і біговою доріжкою в поперечному напрямі. У результаті форма бігової доріжки як поверхні обертання повністю визначається параметрами її профілю:  $R_i, R_c, \theta$ . При цьому значення конструктивних параметрів:  $R_p=31,75$  мм,  $R_{sp}=128$  мм,  $R_{st}=159,75$  мм.

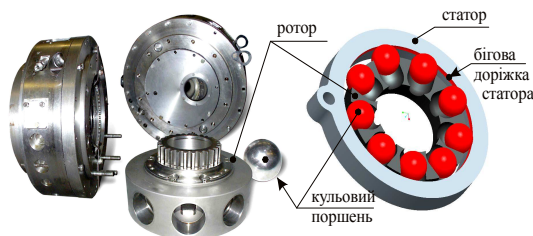


Рис. 1 – Радіальна гідропередача ГОП-900 (ХКБМ)

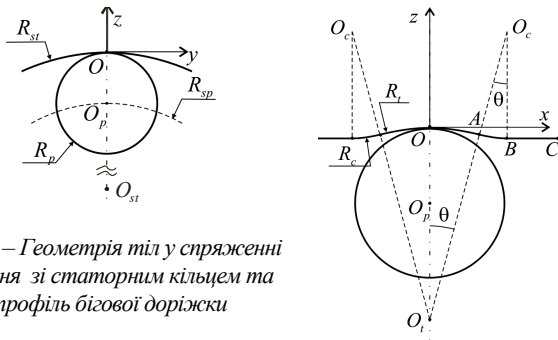


Рис. 2 – Геометрія тіл у спряженні поршня зі статорним кільцем та профіль бігової доріжки

Вплив варійованих параметрів на характер контактної взаємодії поршня з кільцем статора за відсутності тертя і локальний НДС демонструється результатами розрахунків, проведених різними методами. Видно (рис. 3, 4), що форма розглянутих поперечних профілів зумовлює характер розподілу контактного тиску, суттєво відмінний

від герцевського, що необхідно враховувати при виборі значень радіусу центральної частки бігової доріжки статора ГОП та інших її конструктивних параметрів.

Рис. 5 демонструє області застосування та порівняльну точність результатів, одержаних за Герцом, методом скінчених елементів (МСЕ) та методом граничних елементів (МГЕ), а рис. 6 – характер НДС в контактуючих

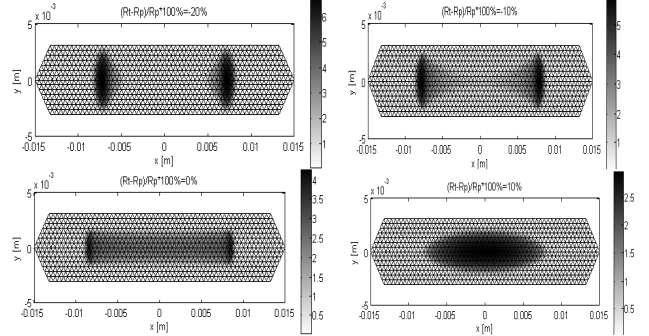


Рис. 3 – Розподіли контактного тиску при різних значеннях різниці радіусів жолоба і поршня

Рис. 4 – Розподіл контактного тиску на осі Ox при малих різницях радіусів жолоба та поршня порівняно з аналогічним розподілом у випадку контакту з циліндром

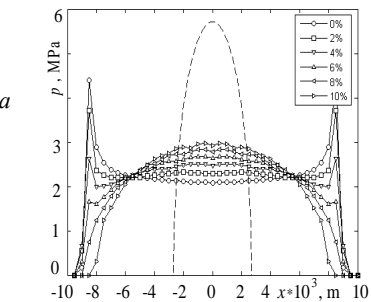


Рис. 5 – Залежності значень максимального контактного тиску від відносної різниці радіусів жолоба та поршня

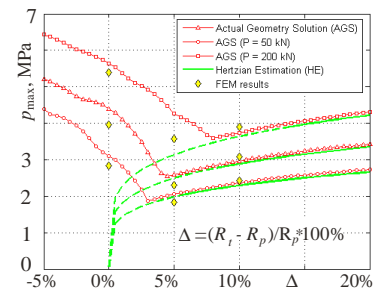
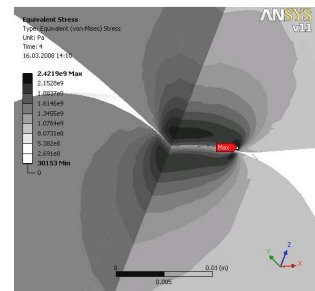


Рис. 6 – Розподіл напружень за Мізесом в кульовому поршні та статорі при зусиллі стискування 200 кН (МСЕ, четвертина моделі)



тілах. Дані результати стали основою для визначення раціональної форми бігових доріжок радіальних ГОП з умов контактної міцності.

**Взаємодія ударно-хвильового навантаження із бронькорпусом легкоброньованої машини**

Пов'язані між собою процеси обтікання ударною

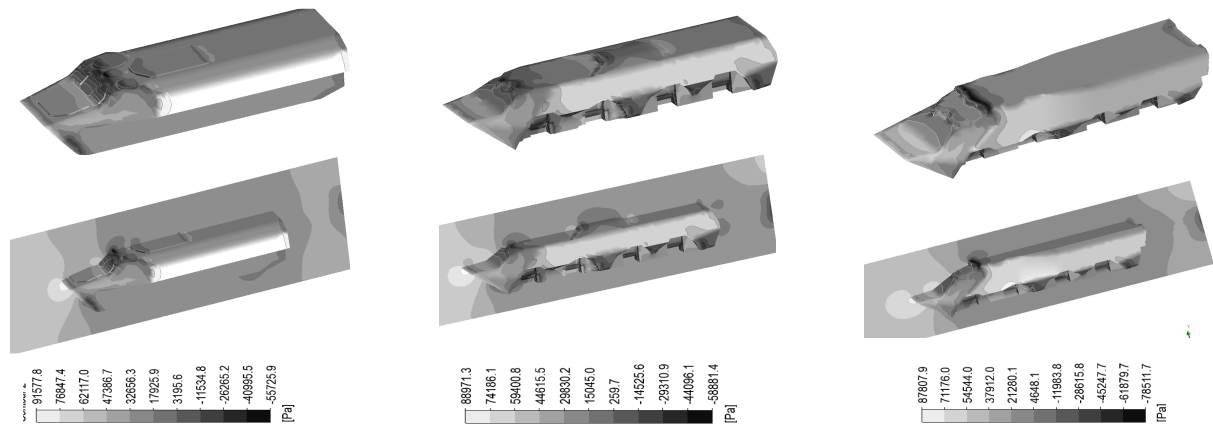
хвилею бронекорпусу легкоброньованої машини та його напружено-деформований стан описуються системою рівнянь [5, 15, 16]

$$L_4(p_V, v_V, u, \Gamma, q, t) = 0; \quad L_5(q_V, u) = 0.$$

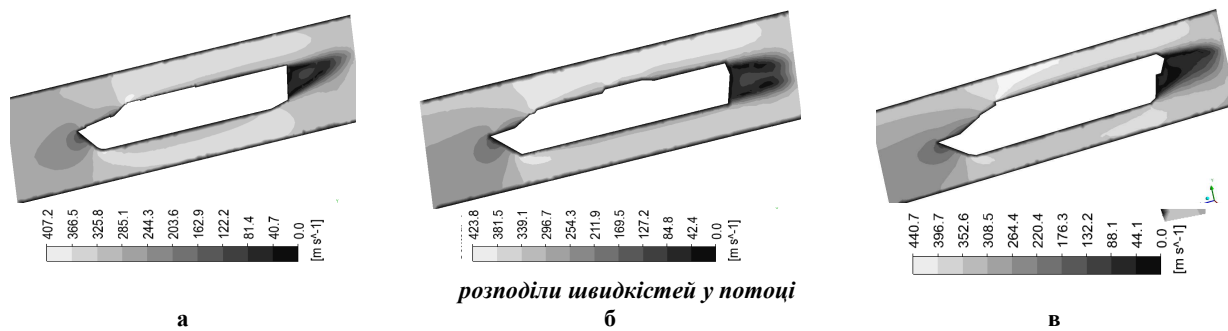
Тут  $L_4$  – оператор газодинамічного процесу;  $L_5$  – оператор для опису напружено-деформованого стану бронекорпусу легкоброньованої машини. При цьому бронекорпус задається формою його обводу. На нього набігає ударна хвиля

із параметрами  $p_V$  (швидкість, напрям, величина надлишкового тиску у фронті тощо). Відповідно  $v_V$  – змінні, що описують газодинамічний потік  $V$  (швидкість, тиск, температура), а  $q_V$  – відповідне силове навантаження від потоку на бронекорпус. Переміщення  $u$  точок бронекорпусу, з одного боку, описують НДС бронекорпусу, а, з іншого, – відповідають за зміну геометрії обводу бронекорпусу.

Зокрема, суттєве значення має геометрична форма обводів бронекорпусів. На рис. 7 представлені порівняль-

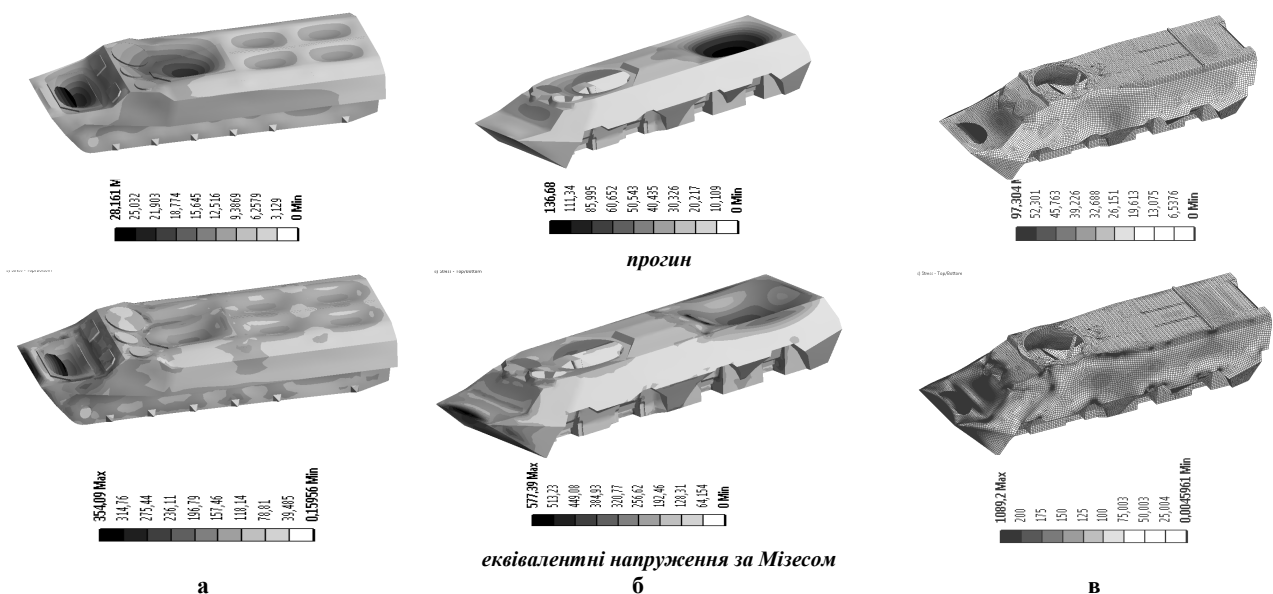


розподіли надлишкового тиску на бронекорпус: на вході – тиск 50 кПа, на виході – швидкість 300 м/с



розподіли швидкостей у потоці

Рис. 7 – Розподіли надлишкового тиску та швидкостей у потоці на бронекорпуси: а – МТ-ЛБ, б – БТР-80, в – БТР-3Е



еквівалентні напруження за Мізесом

Рис. 8 – Розподіли прогинів та еквівалентних напружень за Мізесом для "моношарових" варіантів бронекорпусів з товщиною елементів 6 мм в бронекорпусах: а – МТ-ЛБ, б – БТР-80, в – БТР-3Е

ні характерні розподіли надлишкового тиску на бронекорпуси МТ-ЛБ, БТР-80 та БТР-3Е. Видно суттєву різницю полів розподілу надлишкового тиску. Це, у свою чергу, здійснює вплив на напружено-деформований стан силової структури бронекорпусів (на рис. 8 – розподіли прогинів та еквівалентних напружень за Мізесом в бронекорпусах МТ-ЛБ, БТР-80 та БТР-3Е для "монотовщинних" варіантів бронекорпусів з товщиною елементів 6 мм).

Таким чином, сукупно на напружено-деформований стан бронекорпусів легкоброньованих машин впливають і параметри ударної хвилі, і проектні рішення (як геометрія зовнішніх обводів, так і внутрішня

силова структура, а також – товщини листових панелей).

Отже, така структура моделювання дає змогу напряму встановити закономірності впливу технічних характеристик елементів бронекорпусів на міцність та захищеність при дії ударних хвиль з тими чи іншими параметрами.

**Вплив реактивних зусиль віддачі на міцність бронекорпусів**

Маємо у цьому випадку опис процесу пострілу з параметрами  $p_S$  і змінними  $v_S$

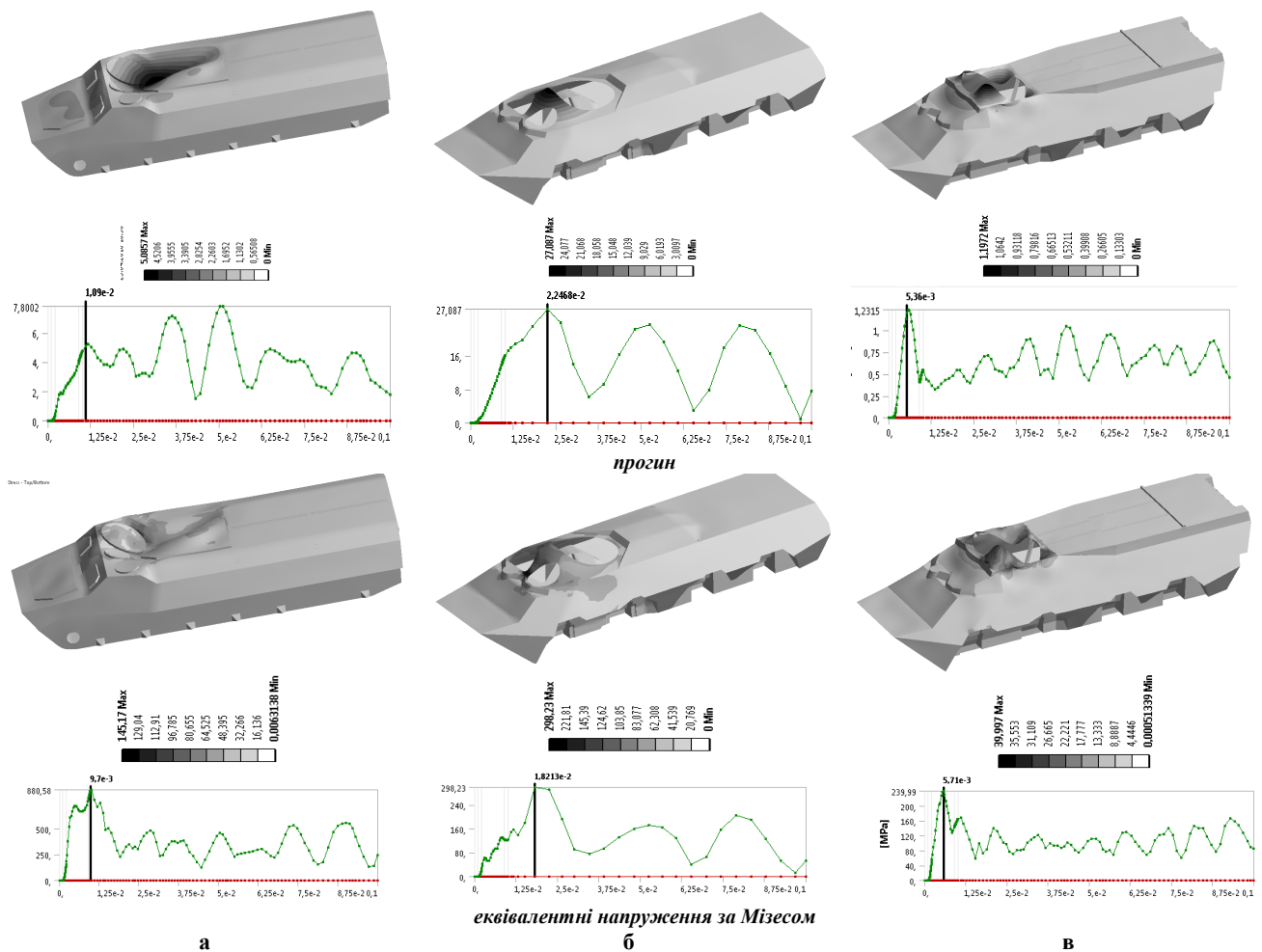
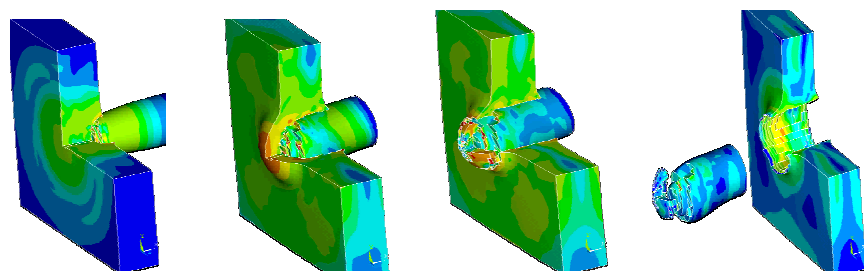


Рис. 9 – Розподіли компонент напружено-деформованого стану вектора переміщень та еквівалентних напружень за Мізесом при дії реактивних зусиль віддачі при здійсненні пострілів із власних бойових модулів різних бронемашин (зусилля 10 кН прикладається на висоті 0.5 м від центру погінного кільця):  
а – МТ-ЛБ, б – БТР-80, в – БТР-3Е

Рис. 10 – Ілюстрації різних етапів взаємодії кінетичного боєприпасу із бронеперешкодою





$$L_6(p_s, v_s, q_s, t) = 0$$

та динамічного напружено-деформованого стану бронекорпусу

$$L_7(q_s, u, t) = 0.$$

У цьому випадку реактивні зусилля віддачі викликають напружено-деформований стан, що, як і вище, характеризується вектором переміщень точок бронекорпусу  $u$ .

На рис. 9 наведені характерні розподіли компонент напружено-деформованого стану вектора переміщень та еквівалентних напружень за Мізесом при дії реактивних зусиль віддачі при здійсненні пострілів із власних бойових модулів різних бронемашин (для тих же, що й вище, "монотовщинних" варіантів бронекорпусів). Із аналізу цих розподілів випливає, що реактивні зусилля віддачі впливають на міцність та жорсткість бронекорпусів. Отже, із критеріїв міцності та точності ведення вогню стає можливим визначити такі проектні рішення бронекорпусів, які забезпечують заданий рівень ТТХ військових гусеничних і колісних машин, що проектуються.

#### Взаємодія кінетичного боєприпасу із бронеперешкодою

У даному випадку потрібно дослідити рівняння зовнішньої балістики

$$L_8(p_B, v_B, q_B, t) = 0$$

та співвідношення для опису процесу взаємодії боєприпасу із бронеперешкодою:

$$L_9(q_B, u, t) = 0.$$

Тут  $p_B$  – параметри зовнішньої балістики (точка пострілу, початкова швидкість та кути метання тощо),  $v_B$  – змінні, що описують положення снаряда у просторі,  $q_B$  – кінематичні та силові характеристики системи "снаряд – броня" у момент зустрічі;  $u$ , як і вище, – змінні, що описують НДС системи тіл "снаряд – бронеперешкода".

На рис. 10 показані ілюстрації різних етапів взаємодії кінетичного боєприпасу із бронеперешкодою. У результаті одержано "віртуальний випробувальний стенд", який дає змогу оперативно проводити аналіз захищеності бронекорпуса ВГКМ при дії кінетичного боєприпасу того чи іншого калібру, при тій чи іншій швидкості зустрічі із перешкодою, а також при заданому куті зустрічі та структурі й властивостях матеріалу боєприпасу (кулі, снаряда). Вбудовуючи цей "віртуальний випробувальний стенд" у процеси проектних досліджень, можна обґрунтувати проектні параметри бронекорпусів ВГКМ за критерієм захищеності.

#### Висновки

Запропонований у роботі підхід до визначення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень дає змогу високооперативно, з високою точністю та помірними витратами проводити проектні дослідження та обґрунтувати проектні технологічні параметри, які забезпечують задані тактико-технічні характеристики об'єктів бронетанкової техніки. При цьому цей підхід поєднує

методологічну універсальність та можливість адаптації за рахунок відповідної модифікації операторного опису процесів і станів. Важливим моментом є те, що на даний час для розв'язання задач аналізу є можливим застосування потужних програмних комплексів, які реалізують, наприклад, метод скінченних елементів. Крім того, для варіативного опису геометричних форм добре пристосовані сучасні САД-системи типу Creo, SolidWorks, Catia, Inventor тощо. Отже, об'єднання цих інструментів на запропонованій методологічній базі надає можливість розробляти параметричні числові моделі, які можуть бути напряму застосовані для проектного забезпечення ТТХ перспективних вітчизняних військових гусеничних і колісних машин.

#### Список літератури

1. **Чепков, І. Б.** Основні напрями розвитку озброєння і військової техніки. Організаційні і економічні механізми державної підтримки оборонної промисловості / **І. Б. Чепков** // *Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід*. – К.: ТОВ "Міжнародний виставковий центр". – 2015. – С. 8-14.
2. **Марченко, А. П.** Двигунобудування для бронетехніки: історія, сучасний стан і перспективи / **А. П. Марченко** // *Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід*. – К.: ТОВ "Міжнародний виставковий центр". – 2015. – С. 30-33.
3. **Ткачук, М. А.** Науковий супровід проектно-технологічних розробок задля забезпечення тактико-технічних характеристик бойових броньованих машин / **М. А. Ткачук, О. В. Литвиненко, А. В. Грабовський** // *Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід*. – К.: ТОВ "Міжнародний виставковий центр". – 2015. – С. 61-65.
4. **Гайворонский, А. А.** Сопrotивляемость сварных соединений стальной высокой твердости специального назначения образованию холодных трещин / **А. А. Гайворонский, В. Д. Позняков, А. В. Клапатюк** [и др.] // *Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід*. – К.: ТОВ "Міжнародний виставковий центр". – 2015. – С. 185-190.
5. **Васильев, А. Ю.** Методи забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень / **А. Ю. Васильев, М. М. Ткачук, А. Ю. Танченко** [та інш.] // *Перспективи науково-технологічного забезпечення оборонно-промислового комплексу України: Інформаційно-комунікативний захід*. – К.: ТОВ "Міжнародний виставковий центр". – 2015. – С. 234-238.
6. **Hetherington, J. G** Military terrain vehicles / **J. G. Hetherington, J. N. White** // *Journal of Terramechanics*. – 2007. – No 1(44). – P. 23-34. – doi:10.1016/j.jterra.2006.01.003.
7. **Krylov, V. V.** Calculation of ground vibration spectra from heavy military vehicles / **V. V. Krylov, S. Pickup, J. McNuff** // *Journal of Sound and Vibration*. – 2010. – No 329. – P. 3020-3029. – doi:10.1016/j.jsv.2013.03.036.
8. **Rudiger Kieneke** Active Seat Suspension with Two Degrees of Freedom for Military Vehicles / **Rudiger Kieneke, Christian Graf, Jürgen Maas** // *IFAC Proceedings Volumes*. – 2013. – Vol. 46, Is. 5. – P. 523-529. – doi:10.3182/20130410-3-CN-2034.00085.
9. **Kanea James R.** Multipass coefficients for terrain impacts based

- on military vehicle type, size and dynamic operating properties / **James R. Kanea, Paul Ayersa, Heidi Howardb, Alan Andersonb, Daniel Kochb** // *Journal of Terramechanics*. – 2013. – Vol. 50, Is. 3. – P. 175-183. – doi:10.1016/j.jterra.2013.04.001.
10. **Els, P. S.** The applicability of ride comfort standards to off-road vehicles / **P. S. Els** // *Journal of Terramechanics*. – 2005. – Vol. 42, Is. 1. – P. 47-64. – doi:10.1016/j.jterra.2004.08.001.
  11. **Ault, J. Peter** Corrosion durability testing of military vehicles / **J. Peter Ault** // *Metal Finishing*. – 1999. – Vol. 97, Is. 10. – P. 20-23. – doi:10.1016/S0026-0576(00)80959-9.
  12. **Hetherington, J.G.** An investigation of pressure under wheeled vehicles / **J. G. Hetherington, J. N. White** // *Journal of Terramechanics*. – 2002. – Vol. 39, Is. 2. – P. 85-93. – doi:10.1016/S0022-4898(02)00006-X.
  13. **Чепков, И. Б.** Классификация защитных устройств динамического типа / **И. Б. Чепков** // *Артиллер. и стрелковое вооружение*. – 2004. – № 3. – С. 24-28.
  14. **Чепков, И. Б.** Модель обоснования технических решений защитных устройств боевых бронированных машин / **И. Б. Чепков** // *Артиллер. и стрелковое вооружение*. – 2011. – № 4. – С. 42-46.
  15. **Лапицкий, С. В.** Основы военно-технических исследований. Теория и приложения: монография [в 4 т.]. Методология исследования сложных систем военного назначения / **С. В. Лапицкий, А. В. Кучинский, А. И. Сбитнев** [и др.]; ред.: **С.В. Лапицкий**. – К. – 2013. – Т.4. – 417с.
  16. **Ткачук, Н. А.** Конечные-элементные модели элементов сложных механических систем: технология автоматизированной генерации и параметризованного описания / **Н. А. Ткачук, Г. Д. Грищенко, А. Д. Чепурной** [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2006. – № 1. – С. 57-79.
  17. **Аврунин, Г. А.** Объемная гидроредукция с шариковыми поршнями ГОП-900: характеристики и технический уровень / **Г. А. Аврунин, И. В. Кабаненко, В. В. Хавиль** [и др.] // *Механіка та машинобудування*. – 2004. – № 1. – С. 14-21.
- Bibliography (transliterated)**
1. **Chepkov I. B.** Osnovni napryamy rozvytku ozbroyennya i viys'kovoyi tekhniki. Orhanizatsiyni i ekonomichni mekhanizmy derzhavnoyi pidtrymky oboronnoyi promyslovosti [The main directions of development of weapons and military ma-ki. Organizational and economic mechanisms of state maintenance of defense industry]. *Perspektyvy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiyno-komunikatyvnyy zakhid*, Kyiv: "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2015, 8-14.
  2. **Marchenko, A. P.** Dvyhynobuduvannya dlya bronetekhniki: istoriya, suchasnyy stan i perspektyvy [Engine for armored vehicles: history, current state and prospects]. *Perspektyvy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiyno-komunikatyvnyy zakhid*, Kyiv: "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2015, 30-33.
  3. **Tkachuk, M. A., Lytvynenko, O. V., Grabovskiy, A. V.** Naukovyy suprovid proektno-tehnolohichnykh rozrobok zadlya zabezpechennya taktyko-tehnichnykh kharakterystyk boyovykh bron'ovanykh mashyn [Scientific support project-by-technological developments to provide tactical and technical characteristics boyo of new armored vehicles] *Perspektyvy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiyno-komunikatyvnyy zakhid*, Kyiv, "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2015, 61-65.
  4. **Gajvoronskiy, A. A., Poznjakov, V. D., Klapatjuk, A. B.** [i dr.] Soprotivljaemost' svarnykh soedinenij stalej vysokoj tverdositi special'nogo naznachenija obrazovaniju holodnykh treshhin [The resistance of welded joints of steels of high hardness special purpose formation of cold-tion of cracks]. *Perspektyvy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiyno-komunikatyvnyy zakhid*, Kyiv: "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2015, 185-190.
  5. **Vasylyev, A. Yu., Tkachuk, M. M., Tanchenko, A. Yu.** [at al.] Metody zabezpechennya taktyko-tehnichnykh kharakterystyk viys'kovykh husenychnykh i kolisnykh mashyn na etapi proektnykh doslidzhen' [Methods of providing tactical and technical characteristics of military tracked and wheeled vehicles during the project-Studies] *Perspektyvy naukovo-tehnolohichnoho zabezpechennya oboronno-promyslovoho kompleksu Ukrainy: Informatsiyno-komunikatyvnyy zakhid [Prospects of scientific and technological support enforcement about-industrial complex of Ukraine: information and communication event]*, Kyiv "Mizhnarodnyy vystavkovyy tsentr", 2015, 234-238.
  6. **Hetherington, J. G., White, J. N.** Military terrain vehicles, *Journal of Terramechanics*, 2007, 1(44), 23-34, doi:10.1016/j.jterra.2006.01.003.
  7. **Krylov, V. V., Pickup, S., McNuff, J.** Calculation of ground vibration spectra from heavy military vehicles. *Journal of Sound and Vibration*, 2010, 329, 3020-3029, doi:10.1016/j.jsv.2013.03.036.
  8. **Rudiger Kieneke, Christian Graf, Jürgen Maas** Active Seat Suspension with Two Degrees of Freedom for Military Vehicles. *IFAC Proceedings Volumes*, 2013, 5(46), 523-529, doi:10.3182/20130410-3-CN-2034.00085.
  9. **Kanea James R., Ayersa Paul, Howardb Heidi, Andersonb Alan, Kochb Daniel** Multipass coefficients for terrain impacts based on military vehicle type, size and dynamic operating properties, *Journal of Terramechanics*, 2013, 3(50), 175-183, doi:10.1016/j.jterra.2013.04.001.
  10. **Els, P. S.** The applicability of ride comfort standards to off-road vehicles. *Journal of Terramechanics*, 2005, 1(42), 47-64, doi:10.1016/j.jterra.2004.08.001.
  11. **Ault, J. P.** Corrosion durability testing of military vehicles. *Metal Finishing*, 1999, 10(97), 20-23, doi:10.1016/S0026-0576(00)80959-9.
  12. **Hetherington, J. G., White, J. N.** An investigation of pressure under wheeled vehicles. *Journal of Terramechanics*, 2002, 2(39), 85-93, doi:10.1016/S0022-4898(02)00006-X.
  13. **Chepkov, I. B.** Klassifikacija zashitnykh ustrojstv dinamicheskogo tipa [Dynamic Classification protective devices of type]. *Artiller. i strelkovoje vooruzhenie [Artillery. and strelkovoje vooruzhenye]*, 2004, 3, 24-28.
  14. **Chepkov, I. B.** Model' obosnovanija tehniceskikh reshenij zashitnykh ustrojstv boevykh bronirovannykh mashin [Model study of technical solutions of safety devices armored combat vehicles]. *Artiller. i strelkovoje vooruzhenie [Artillery and small arms]*, 2011, 4, 42-46.
  15. **Lapickij, C. B., Kuchinskiy, A. B., Sbitnev, A. I.** [i dr.] Osnovy voenno-tehnicheskikh issledovanij. Teorija i prilozhenija: monografija [v 4 t.]. Metodologija issledovanija slozhnykh sistem voennogo naznachenija [Fundamentals of military-technical research. Theory and supply: the monograph. The research methodology of complex systems voennogo destination], red. **S.V. Lapickij**, Kyiv, 2013, 4, 417 p.
  16. **Tkachuk, N. A., Gricenko, G. D., Chepurnoj, A. D.** [i dr.] Konechno-jelementnye modeli jelementov slozhnykh mekhanicheskikh sistem: tehnologija avtomatizirovannoj generacii i parametrizovannogo opisanija [Finite element models of complex elements fur-mechanical systems: the technology of automated gene-radio and parameterized descriptions]. *Mekhanika ta mashynobuduvannya [Mechanics and Mechanical Engineering]*, Kharkiv, NTU "KhPI", 2006, 1, 57-79.
  17. **Avrunin, G. A., Kabanenke, I. V., Havil', V. V.** [i dr.] Ob'emnaja gidroperedacha s sharikovymi porshnjami GOP-900:



harak-teristiki i tehnicheskij uroven' [Volume hydraulic transmission with ball pistons GOP-900: features and technical level].

*Mekhanika ta mashynobuduvannya [Mechanics and Mechanical Engineering]*, Kharkiv, NTU "KhPI", 2004, 1, 14-21.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Грабовський Андрій Володимирович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", старший науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин"; тел.: (057) 7076166; e-mail: grabovskiy@tmm-sapr.org

**Grabovskiy Andrey Vladimirovich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Senior Researcher of Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, tel.: (057) 7076166; e-mail: grabovskiy@tmm-sapr.org

**Васильєв Антон Юрійович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", докторант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

**Vasiliev Anton Yurievich** – Ph.D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", doctorante at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, e-mail: AVasiliev@tmm-sapr.org.

**Ткачук Микола Миколайович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", докторант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", e-mail: myk.tkachuk@gmail.com

**Tkachuk Mykola Mykolayovych** – Ph.D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", doctorante at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, e-mail: myk.tkachuk@gmail.com.

**Танченко Андрій Юрійович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", докторант кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", e-mail: ATanchenko@tmm-sapr.org.

**Tanchenko Andrii Yurievich** – Ph.D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", doctorante at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, e-mail: ATanchenko@tmm-sapr.org.

**Мартиненко Олександр Вікторович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", науковий співробітник кафедри "Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин", e-mail: MartynenkoAV@tmm-sapr.org.

**Martynenko Oleksandr Viktorovych** – Ph.D., National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", senior researcher at the Department of theory and computer-aided design of mechanisms and machines, e-mail: MartynenkoAV@tmm-sapr.org.

**Киричук Дмитро Валентинович** – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", студент гр. ТМ-82Б

**Kyrychuk Dmytro Valentynovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student of TM-82B group

**Борисенко Сергій Вікторович** – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", студент гр. ТМ-82Б

**Borysenko Serhii Viktorovych** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student of TM-82B group

**Касай Олена Ігорівна** – Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", студент гр. ТМ-82Б

**Kasai Olena Igorivna** – National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", student of TM-82B group

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Грабовський, А. В.** Забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень / **А. В. Грабовський, А. Ю. Васильєв, М. М. Ткачук, А. Ю. Танченко, О. В. Мартиненко, Д. В. Киричук, С. В. Борисенко, О. І. Касай** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ "ХПІ". – 2016. – № 18 (1190). – С. 22-29. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.04.

*Please cite this article as:*

**Grabovskiy, A. V., Vasyliiev, A. Y., Tkachuk, M. M., Tanchenko, A. Y., Martynenko, O. V., Kyrychuk, D. V., Borysenko, S. V., Kasai, O. I.** Providing of tactical and technical characteristics of military caterpillar and wheeled vehicles on stage of design researches. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 18 (1190), 22-29, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.04.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Грабовский, А. В.** Обеспечение тактико-технических характеристик военных гусеничных и колесных машин на этапе проектных исследований / **А. В. Грабовский, А. Ю. Васильев, М. М. Ткачук, А. Ю. Танченко, А. В. Мартыненко, Д. В. Киричук, С. В. Борисенко, Е. И. Касай** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 22-29. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.04.

**АННОТАЦИЯ** В работе содержится постановка задачи обеспечения тактико-технических характеристик военных гусеничных и колесных машин на этапе проектных исследований. Предложена адаптация метода обобщенного параметрического моделирования к решению задач анализа динамики и прочности элементов военных гусеничных и колесных машин. Рассмотрены несколько частных задач. В процессе исследований использованы современные программные комплексы. Разработанные методы и модели могут быть применены к решению задач обоснования параметров элементов объектов бронетанковой техники по критериям прочности, защищенности, точности ведения огня.

**Ключевые слова:** военная гусеничная и колесная машина, тактико-техническая характеристика, режим боевого применения, напряженно-деформированное состояние, анализ динамики и прочности, контактное давление.

*Надійшла (received) 17.15.2016*

УДК 621.313: 621.929.2.7

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.05

## ОСОБЛИВОСТІ ПРИВОДНИХ СИСТЕМ ЕКСТРАКЦІЙНОГО ОБЛАДНАННЯ З КОЛИВАЛЬНИМ ЕФЕКТОМ РОБОЧОГО СЕРЕДОВИЩА

**В. Л. ЗАВ'ЯЛОВ<sup>1</sup>, В. С. КОСТЮК<sup>2</sup>, В. С. БОДРОВ<sup>1</sup>, Є.В. КОСТЮК<sup>2</sup>, Т.Г. МИСЮРА<sup>1\*</sup>,  
Ю.В. ЗАПОРОЖЕЦЬ<sup>1</sup>, Н.В. ПОПОВА<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Кафедра процесів і апаратів харчових виробництв, Національний університет харчових технологій, м. Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup> Кафедра технічної механіки і пакувальної техніки, Національний університет харчових технологій, м. Київ, УКРАЇНА

<sup>3</sup> Кафедра експертизи харчових продуктів, Національний університет харчових технологій, м. Київ, УКРАЇНА

\*email: Taras\_as@i.ua

**АНОТАЦІЯ** Викладено аналіз використання різних типів вібраційних приводів та наведено можливості їх застосування в апаратах і обладнанні для проведення процесів віброекстрагування сировини харчового призначення. Розглянуто витрати енергії на проведення процесу екстрагування із застосуванням електромеханічного кривошипно-шатунного та безшатунного ексцентрикового приводу.

**Ключові слова:** вібраційний привод, коливальні процеси, робоче середовище, коливальний ефект, загальні та її складові витрати енергії, частота та амплітуда коливань

## FEATURES OF PRIVATE EXTRACTION EQUIPMENT WITH VIBRATIONAL EFFECT WORKSPACE

**V. ZAVIALOV<sup>1</sup>, V. KOSTYUK<sup>2</sup>, V. BODROV<sup>1</sup>, E. KOSTYUK<sup>2</sup>, T. MYSYURA<sup>1\*</sup>,  
Y. ZAPOROZHETS<sup>1</sup>, N. POPOVA<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> Department of Processes and Apparatus for Food Production, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Technical Mechanics and Packaging Machinery, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

<sup>3</sup> Department of Foodstuff Expertise, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

\*email: Taras\_as@i.ua

**ABSTRACT Introduction.** In the food industry to extract soluble substances from plant material used efficiently process vibroextractions using suitable devices of various designs. The aim of this report is to present the results of the analysis of a sufficiently large number of references on the vibration characteristics of drive systems extraction equipment.

**Materials and methods.** Drivers that generate oscillatory movement is an integral part of vibrating devices. There are several ways and means of vibration excitation, including: depending on the type of energy used to excite vibrations vibrofeeders distinguish between mechanical, electrical, pneumatic and hydraulic; kind of driving force - inertial, Eccentric, electromagnetic, pneumatic and hydraulic; in design - inertial (debalance), Crank (Eccentric) and electromagnetic piston (pneumatic and hydraulic); from the viewpoint of regulation of drive distinguish drive and uncontrollable. Adjustable vibration amplitude; the nature of regulation - drive smooth and step regulation. Classification of vibration drives containing the following ways excitation vibrations: mechanical, eccentric; hydraulic, inertia, electromagnetic, pneumatic.

**Results and Conclusions.** Analysis of vibration excitation methods allowed to formulate the advantages and disadvantages of known types Vibration actuators. Performed Searches classification study to optimize the methods and ways of using vibration actuators.

**Keywords:** drive vibration, oscillation, workspace oscillatory effect, its components and the general cost of energy, frequency and amplitude

### Вступ

В харчовій промисловості для добування розчинних речовин з рослинної сировини шляхом вилучення одного або кількох компонентів за допомогою відповідного розчинника широко використовується процес екстрагування. Зокрема, він знаходить своє застосування у виробництві цукру, олії, ефірних олій, вин, пива, крохмалю, розчинних кави і чаю тощо. Великий асортимент сировини і різноманітні властивості її структур, що піддаються екстрагуванню, характеризуються відповідно і різними конструкціями екстракторів. Складність процесу екстрагування обумовлюється фізико-механічними і реологічними характеристиками

двофазових систем і відповідно вирішується у різних способах та апаратах періодичної та безперервної дії. Порівняно з традиційними способами до сьогодні найбільш ефективним вважається процес віброекстрагування із застосуванням відповідних пристроїв різних конструкцій [4, 5].

Енергія коливань таких пристроїв з керованими частотами та амплітудами надходить зокрема від приводів різних конструкцій та принципів дії, тому метою даної статті є проаналізувати особливості приводних систем екстракційного обладнання з коливальним ефектом робочого середовища із застосуванням вібраційних приводів.

### Мета роботи

Аналіз особливостей процесів екстрагування з використанням коливального ефекту робочого середовища завдяки використанню вібраційних приводів [1-7].

### Матеріали та методи

По мірі розвитку техніки спостерігається все більше використання коливань та вібрацій. Коливальні процеси супроводжують створення нової техніки різностороннього характеру і дії. Технологічні процеси, пов'язані з механічним впливом на матеріал або виріб, як правило, потребують достатньо великих сил. Ці сили можуть бути прикладені різними способами: статично (або майже статично), чи динамічно у вигляді імпульсів, що періодично повторюються. Роль збудника періодичних імпульсів ефективно виконує вібрація. Ця особливість підтверджує актуальність задач дослідження і розроблення нових машин та апаратів, що найбільш повно задовольняють різноманітним вимогам процесів та виробництв. Зокрема, використання вібраційного приводу для екстрагування, де має місце взаємодія рідких і твердих фаз, або одних тільки рідких. Тут розрізняють екстракцію твердих тіл і екстракцію рідин. В харчовій промисловості мають місце ці два види екстракції, але особливо широке розповсюдження отримала екстракція в системі тверде тіло – рідина.

### Результати і обговорення

Приводні механізми, які генерують коливальний рух, є невід'ємною складовою вібраційних апаратів. Зокрема, запропоновані різні апарати для технологічних процесів, що протікають у віброкиплячому шарі сипкого матеріалу в газовому середовищі. Технологічні процеси у віброкиплячому

шарі ведуть до значного їх прискорення, підвищення якісних показників, зменшення розмірів апаратів.

Менше уваги приділяється використанню віброкиплячого шару в рідкому середовищі, так як у цих випадках, як правило, великий ефект дає вібраційний вплив на більш значний об'єм суспензії в камері апарата. В рідких середовищах ефективним способом інтенсифікації технологічного процесу є вібраційне перемішування, яке може здійснюватися різними способами. Один з них – вібраційне збудження безлічі затоплених турбулентних струменів в робочому об'ємі рідини [8].

Існує декілька способів і засобів збудження вібрації, що використовується в технологічних процесах [9-10].

В залежності від виду енергії, що використовується для збудження вібрацій, розрізняють віброзбудники механічні, електричні, пневматичні і гідравлічні, від роду рушійної сили – інерційні, ексцентрикові, електромагнітні, пневматичні і гідравлічні.

Різноманітність типів і модифікацій вібраційних машин, а також умов їх використання обумовлює наявність ряду специфічних вимог до принципового влаштування, конструктивного виконання і експлуатаційних характеристик приводів – віброзбудників.

За конструкцією віброзбудники поділяються на 4 основні групи: інерційні (дебалансні), кривошипно-шатунні (ексцентрикові), електромагнітні і поршневі (пневматичні і гідравлічні).

З точки зору можливості регулювання привода розрізняють привод з регульованою і нерегульованою амплітудами коливань. Регульований у свою чергу поділяється на регульований без зупинки машини, і привод, регульований в неробочому стані машини. За характером регулювання розрізняють приводи з плавним і ступінчастим регулюванням. Класифікація вібраційних приводів наведена у таблиці 1.

Від правильного вибору типу і конструкції приводу залежать техніко-економічні показники роботи апарата.

Таблиця 1 – Класифікація віброприводів

Вид енергії	Механічна	Електрична	Пневматична	Гідравлічна
Рушійна сила	Інерційна	Електромагнітна	Пневматична	Гідравлічна
Конструкція віброзбудника	Інерційні (дебалансні), Кривошипно-шатунні (ексцентрикові)	Електромагнітні	Поршневі пневматичні	Поршневі гідравлічні
Тип приводу	Механічний	Електричний	Пневматичний	Гідравлічний
		Електромагнітний		
	Комбінований			
Спосіб збудження	Механічний	Електромагнітний	Пневматичний	Гідравлічний
	Комбінований			
Вид регулювання	Регульований	Нерегульований		
Характер регулювання	Ступінчастий	Плавний		
Форма коливань	Прямолінійні, кругові, еліптичні, прямокутні, комбіновані			
Вид вібрації	Лінійна, плоска, просторова, кутова або обертальна, комбінована			

*Механічний спосіб збудження вібрації* здійснюється механічними вібраторами. Елементарний з них – це дебалансний вібратор, що представляє собою ексцентрик, при обертанні якого виникають кругові відцентрові сили, які передаються на об'єкт. Часто використовуються кривошипно-шатунні або відцентрові (дебалансні або інерційні) типи. Відцентровий тип приводу виділяється простотою конструкції та універсальністю з використанням в діапазоні частот 150...500 с<sup>-1</sup>, амплітуд  $(0,5...3) \cdot 10^{-3}$  м. Верхня межа робочих частот обмежується критичною частотою підшипників кочення.

В *ексцентриковому віброприводі* використовується принцип перетворення обертального руху вала у поступальний за рахунок диску або циліндра, насадженого на вал із зміщенням своєї осі відносно осі вала. Він може комплектуватися як жорстким (забезпечує робочий орган постійною амплітудою коливань у всьому діапазоні роботи), так і пружним шатуном (створює м'які умови пуску і більш легке налаштування на власну частоту коливань системи). Дозволяє створювати великі амплітуди коливань і збуджуючі сили за невисоких частот обертання приводного вала; використовується у низькочастотних машинах.

*Гідралічний привід* теж може створювати великі збуджуючі сили за великих розмахів коливань, маючи досить компактну конструкцію; є найбільш ефективним у машинах великої довжини і продуктивності. В поршневих віброприводах збуджуюча сила створюється за рахунок енергії рідини. Передача цієї сили робочому органу вібромашини, з'єднаному із штоком циліндра, може виконуватися безпосередньо (активно), шляхом подачі змінного тиску в порожнину циліндра або реактивно, – внаслідок зворотно-поступального руху поршня чи іншого елемента, що його замінює.

*Інерційний привід* представляє собою конструкцію із ряду валів з дебалансами, механічно зв'язаних між собою, які приводяться в рух зовнішнім двигуном. В ньому збуджуюча сила створюється обертанням однієї або декількох не зрівноважених мас. Ця сила може бути такою, що обертається, тобто безперервно змінює свій напрям, або стало направлена. У віброзбудниках з направленою збуджуючою силою остання постійно діє в одному і тому ж напрямку і змінюється тільки за величиною. У спеціальних типах інерційних віброзбудників створюється збуджуючий крутний момент або різні види комбінації збуджуючих сил і крутних моментів. Інерційний привід доцільно використовувати у обладнанні, що експлуатується за середніх частот коливань 12...25 Гц. За високих частот тут значно збільшуються опорні реакції у підшипниках, що веде до їх швидкого виходу із ладу або до необхідності встановлення великогабаритних підшипників. Інерційний привід дозволяє отримати великі збуджуючі сили при невеликих габаритах і масі

привода, та є незамінним в потужних машинах невеликої довжини з амплітудою коливань 2...5 мм, в тому числі з використанням для матеріалів, схильних прилипати до робочого органу. Недоліком тут є тривалий час пуску і вибігу, що обмежує його використання в деяких процесах, наприклад, дозування.

Для однонаправленої вібрації, що діє строго по одній осі і має синусоїдальний закон у часі, використовують симетрично розміщені відносно осі ексцентрики, які обертаються у різні напрями. При складанні сил, діючих вздовж цих ексцентриків, отримується сила, що діє вздовж прямої за синусоїдальним законом.

*Електромагнітний вібропривод* за принциповим влаштуванням відноситься до двомасових систем і, відповідно, представляє систему з двома ступенями вільності. Сила збурення створюється магнітним полем, що утворюється при проходженні через обмотку вібратора змінного або пульсуючого струму. Складається з магнітопроводу, що включає статор і якір, набраних з листової електротехнічної сталі, однієї або декількох обмоток і пружинної системи.

За дією віброзбудники розділяють на однокатні (один електромагніт і збуджуюча сила діє тільки в одну сторону; зворотній хід здійснюється під дією відновлюючої сили пружної системи) і двокатні (два електромагніти).

Такий привід є найбільше ефективним для високочастотних машин та апаратів, які працюють за невеликих амплітуд коливань (0,5...3 мм). За своїм принциповим влаштуванням є більш досконалий у порівнянні з іншими. Якщо у більшості типів приводів відбувається перетворення обертального руху у зворотно-поступальний, то тут таке досягається безпосередньо без будь яких проміжних механізмів. Він не має вузлів тертя і підшипників, які піддаються високим динамічним навантаженням. Використовується у випадках коротких ділянок, які потребують вібраційного збудження (дозатори, бункери живильників). Недоліком такого приводу є чутливість до коливань напруги і навантаження. Для запобігання цьому слід використовувати електромагнітний привід з автоматичним регулюванням.

*Пневматичний привід* представляє собою пневматичний поршневий збуджувач у вигляді циліндра, всередині якого переміщується поршень. Розподілення стиснутого повітря відбувається за допомогою системи отворів, що знаходяться на циліндрі вібратора і жолобків на поршні. Такий віброзбуджувач доцільно використовувати в низькочастотних коливальних системах. Зустрічається реактивного (збуджуюча сила передається машині реактивно під впливом сил інерції, які виникають за переміщення поршня) і активного типів (поршень зі штоком з'єднаний з

вібраційною машиною). За принципом дії діляться на пульсаційні і автоколивальні.

Як видно з таблиці 2 кожен вид приводу вібратора має свої певні переваги та недоліки, від яких і залежить їх застосування. Слід відзначити, що механічний тип вібратора характеризується простотою конструкції, високою надійністю, відсутністю стрибків амплітуди коливань при запуску чи зупинці і дозволяє створювати різні за напрямом вібраційні коливання.

Останнім часом все ширше застосовуються комбіновані приводи. До них належать пневмо-вакуумний, пневмо-механічний, пневмо-гідралічний, гідро-механічний, електро-гідралічний, електро-механічний та ін.

В загальному до переваг вібраційного приводу можна віднести легкість його в обслуговуванні та експлуатації, високу довговічність і надійність роботи в самих різних умовах, ремонтпридатність і взаємозамінність вузлів, можливість суміщення транспортних операцій з одночасним виконанням деяких технологічних операцій.

Не дивлячись на те, що в літературі висвітлюються різні методи і пристрої для збудження коливань з необхідними параметрами і формою, але

відсутні відомості, які стосуються використання конкретного вібраційного приводу відносно застосування в процесах екстрагування.

Привод вібраційної машини може надавати коливальні рухи її робочим органам з частотою меншою, рівною або більшою власної частоти системи. Тоді, відповідно, апарат буде працювати в дорезонансному, резонансному або надрезонансному режимі. Резонансні пристрої використовуються нечасто у зв'язку із складністю налаштування і підтримання цього режиму. Дорезонансні – працюють при малих прискореннях вібрації (до 5 g) на низьких частотах 10...12 Гц і великих амплітудах 5...8 мм.

Найбільш широке використання мають електромеханічні і електромагнітні приводні механізми [11].

Електромеханічні приводи використовуються для генерації коливань з частотою 1...25 с<sup>-1</sup> і амплітудами до 15...20 мм. Такі механізми мають кривошип і вузол, який трансформує обертальний рух кривошипа у зворотно-поступальний рух штока або штанги з дисками насадки. В якості кривошипа зазвичай використовуються вали або планшайби з ексцентрично закріпленими пальцями або вантажем.

Таблиця 2 – Характеристики різних типів приводів вібратора

Тип приводу вібратора	Переваги	Недоліки
<i>Пневматичний</i>	- Простота конструкції та обслуговування; - Висока експлуатаційна надійність; - Економічність; - Пожегобезпечність; - Здатність передавати пневмоенергію на великі відстані; - Багатофункціональність одного приладу.	- Існує ризик травматизму внаслідок вибухового розриву; - Можливість обмерзання пневмосистеми внаслідок нагрівання й охолодження повітря; - Необхідність використання компресора як джерела стисненого повітря.
<i>Гідралічний</i>	- Простота керування та автоматизації; - Безступінчасте регулювання швидкості у широкому діапазоні; - Висока експлуатаційна надійність; - Стійкість до перевантажень.	- Чутливість до перепаду температур; - Потреба забезпечення герметичності порожнин, які знаходяться під тиском; - Необхідність використання насосної гідростанції.
<i>Електро-магнітний</i>	- Забезпечення строго сталої частоти коливань.	- Відносно невелика продуктивність.
<i>Електричний</i>	- Незначна вібрація опори; - Висока експлуатаційна надійність; - Можливість задавання керованих параметрів вібрації на ходу.	- Відсутність великих стрибків амплітуди; Висока вартість електрообладнання; - Низька продуктивність; - Велика вага.
<i>Механічний</i>	- Забезпечення великої потужності; - Простота конструкції та обслуговування; - Мала чутливість до перевантажень; - Можливість застосування як при великих, так і при малих потужностях; - Експлуатаційна надійність.	- Необхідність надійної віброізоляції, через що значно збільшується вага; - Складність керування параметрами.
<i>Комбінований</i>	- Можливість поєднувати різні типи віброприводів з необхідними для певної галузі характеристиками.	- Висока вартість обладнання; - Чутливість до температур.

Широке використання для створення вібраційних коливань насадок отримали шатунні електромеханічні приводні механізми. У такому приводі шатун є зв'язуючою ланкою між кривошипом і штангою, з'єднання яких зазвичай виконують за допомогою підшипників ковзання або кочення. З метою зменшення тангенціальних складових зусиль, що виникають внаслідок тиску шатуна на верхній кінець штанги робочого органу апарата, кращим є випадок, щоб довжина шатуна була значно (в декілька разів) більше радіуса кривошипа, а направляюча втулка, в якій розміщується верхній кінець штанги, розміщувалася якомога ближче до підшипника.

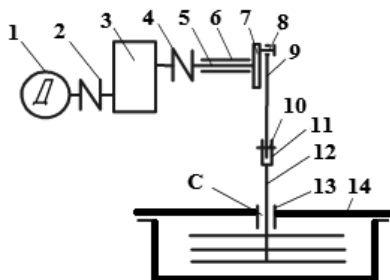


Рис. 1 – Схема електромеханічного кривошипно-шатунного привода

Для пониження частот обертання в таких приводах між електродвигуном і вихідним валом кривошипа встановлюють редуктор. Принципова схема електромеханічного кривошипно-шатунного привода наведена на рис. 1. Вал електродвигуна 1 за допомогою муфти 2 з'єднаний з вхідним валом редуктора 3, вихідний вал якого за допомогою муфти 4 з'єднаний з головним валом 5 привода, встановленим на підшипниках, розміщених у корпусі 6. На головному валу закріплена планшайба 7, що має ексцентрично встановлений палець 8. Шатун 9 одним кінцем з'єднаний з пальцем планшайби, тоді як другий кінець шатуна з'єднаний за допомогою пальця 10 з вильчастим наконечником 11 штанги 12, на якій розміщені робочі насадки 15. Безпосередньо близько від вильчастого наконечника штанга проходить через направляючу втулку 13, яка жорстко закріплена на кришці 14 апарата. Привод монтується на рамі, яку жорстко закріплюють на кришці апарата або окремо, а для виключення можливого потрапляння забруднень до апарата, використовують ущільнення штанги, наприклад, за допомогою сальника С.

Зміну амплітуди коливань насадки в апаратах з приводами потужністю 10 і більше кВт, а також в апаратах, приводи у яких мають колінчасті вали з двома корінними шийками, проводять шляхом зміни колінчастих валів, виготовлених з різними радіусами кривошипів.

Частоту коливань вібронасадки регулюють зміною числа обертів кривошипа. Останнє може досягатися шляхом зміни передаточного числа привода, замінюючи редуктори варіаторами.

Останнім часом знаходить широке використання регульований привод з використанням частотних перетворювачів, який дає можливість змінювати частоти обертання ведучої ланки без втручання в механічну частину привода.

Енергія, що витрачається приводом вібраційного апарата може бути представлена у вигляді складових: статичної потужності, що витрачається на підняття рухомих частин тарілок (насадок), штоків, деталей кривошипно-повзунного механізму, кріпильних деталей); енергії, що витрачається на подолання сил інерції, які виникають при зворотно-поступальному переміщенні рухомих частин; енергії, що витрачається на подолання сил тертя робочих пристроїв (тарілок) за взаємодії з робочим середовищем в апараті, та сил тертя в елементах складових деталей привода. Відповідно, на шток апарата діє сила, що складається з аналогічних складових. Саме знання потрібної потужності та сили, діючої на шток, є необхідними для правильного вибору енергетичного обладнання і виконання розрахунків на міцність елементів екстракційного обладнання з коливальними ефектами в робочому об'ємі апарата [11].

Витрати енергії пов'язані з силою, що діє на шток (рис. 2), співвідношенням:

$$N = P \frac{dy}{dt}, \quad (1)$$

де  $N$  – загальні (сумарні) витрати енергії, Вт;  $P$  – загальна (сумарна) сила опору, діюча на шток, Н;  $t$  – тривалість періоду коливань, с.

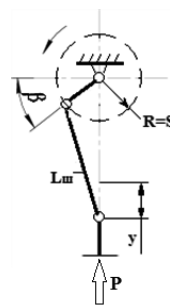


Рис. 2. – Геометричні характеристики кривошипно-шатунного привода:  $R$  – довжина кривошипа, що відповідає амплітуді коливань  $S$ ;  $L_m$  – довжина шатуна;  $\beta$  – поточний кут повороту кривошипа;  $y$  – сумарний шлях, пройдений системою за один оберт кривошипа

Загальна сила опору:

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + P_4. \quad (2)$$

Сила земного тяжіння рухомої системи – ( $P_1$ ), яка складається з рухомої системи (тарілок) ( $P_T$ ) і штока у зборі з кріпильними елементами та дистанційними втулками ( $P_{Ш}$ ) із врахуванням сили, що виштовхує, яка діє на занурену в робоче середовище рухому систему може бути визначена:

$$P_1 = \frac{P_T + P_{III}}{\rho_c} (\rho_c - \rho_{cm}), \quad (3)$$

де  $\rho_c$ ,  $\rho_{cm}$  – густина конструкційних матеріалів рухомої системи та робочого середовища у апараті.

Сила інерції – ( $P_2$ ) рухомої системи визначається із виразу:

$$P_2 = \frac{P_1}{g} \cdot \frac{d^2 y}{dt^2}. \quad (4)$$

Силу гідравлічного опору – ( $P_3$ ) рухомих тарілок можна визначити як

$$P_3 = \frac{F_T \cdot n_T}{2} \cdot \rho_{cm} \cdot \left( \frac{(1 - F_o^2)}{c_o^2 \cdot F_o^2} \right) \left( \frac{dy}{dt} \right)^2, \quad (5)$$

де  $F_T$ ,  $F_o$  – відповідно площа тарілок та площа опору робочого середовища;  $c_o$  – коефіцієнт витрат, який залежить від форми отворів у тарілках,  $n_T$  – кількість тарілок в робочому об'ємі екстрактора.

Сила тертя в з'єднаннях ланок приводу – ( $P_4$ ), яка наближено може бути представлена для кожної кінематичної пари виразом  $P_4 = \Sigma(f \cdot N_n)$ , де  $f$  – коефіцієнт тертя, який залежить від матеріалу ланок які контактують, та умов їх змащування;  $N_n$  – нормальна реакція в кінематичних парах приводу.

Враховуючи, що амплітуда коливань системи  $S$  дорівнює радіусу кривошипа  $R$ , за аналогією з вирішенням для пульсаційного апарата [2] шлях переміщення тарілок  $y$  в екстракційному апараті визначається рівнянням

$$y = S \left[ \sin \beta - \frac{L_{III}}{S} + \sqrt{\left( \frac{L_{III}}{S} \right)^2 - \cos^2 \beta} \right]. \quad (6)$$

Похідні по часу (швидкість і прискорення) можна знайти, виходячи із залежності:

$$\beta = 2\pi \cdot n \cdot t, \quad (7)$$

де  $n$  – частота обертання кривошипа,  $c^{-1}$ ;  $t$  – тривалість повного оберту, с.

Для простих синусоїдальних коливань (при  $S/L_{III} \rightarrow 0$ ) можна записати:

швидкість коливань

$$\frac{dy}{dt} = 2\pi n S \cos \beta; \quad (8)$$

прискорення коливань

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -4\pi^2 n^2 S \sin \beta. \quad (9)$$

Із врахуванням останніх залежностей рівняння (4) і (5) приймають вигляд:

$$P_2 = -P_1 \frac{4\pi^2}{g} \cdot n^2 \cdot S \cdot \sin \beta, \quad (10)$$

$$P_3 = 2\pi^2 F_T n_T \rho_{cm} \left( \frac{(1 - F_o^2)}{c_o^2 \cdot F_o^2} \right) n^2 S^2 \cos^2 \beta. \quad (11)$$

Загальний вираз для сили, що діє на шток екстракційного апарата з коливальними рухами робочого середовища, відповідно до (2) без врахування сил тертя в кінематичних парах, та інших складових приводу має вигляд:

$$P = \frac{P_T + P_{III}}{\rho_c} \cdot (\rho_c - \rho_{cm}) \left( 1 - \frac{4\pi^2}{g} n^2 S \sin \beta \right) + 2\pi^2 F_T n_T \rho_{cm} \left( \frac{(1 - F_o^2)}{c_o^2 \cdot F_o^2} \right) n^2 S^2 \cos^2 \beta. \quad (11)$$

Витрати енергії на забезпечення процесу екстрагування у віброекстракторі безперервної дії з тарілчастою рухомою системою

$$N = P \frac{dy}{dt} = P 2\pi n S \cos \beta. \quad (12)$$

В розгорнутому вигляді рівняння (12) має вигляд:

$$N = \left[ \begin{array}{l} \frac{P_T + P_{III}}{\rho_c} (1 - \rho_{cm}) \times \\ \times \left( 1 - \frac{4\pi^2}{g} n^2 S \sin \beta \right) + \\ + 2\pi^2 F_T n_T \rho_{cm} \frac{(1 - F_o^2)}{c_o^2 \cdot F_o^2} n^2 S^2 \cos^2 \beta \end{array} \right] 2\pi n S \cos \beta. \quad (13)$$

За рівняннями (11) і (13) можна вирахувати значення сумарної сили, що діє на шток і миттєвої потужності в любий момент часу. Середнє значення споживаної енергії можна визначити, проінтегрувавши вираз (12):

$$N_{cp} = \frac{1}{(t_2 - t_1)} \int_{t_1}^{t_2} N dt, \quad (14)$$

де  $(t_2 - t_1)$  – інтервал часу вимірювання (визначення) витрат енергії, с.

Поряд із електромеханічним кривошипно-шатунним приводом знаходить використання і конструктивна заміна планшайби та пальця – на ексцентрик, що взаємодіє з штангою, на якій розміщені тарілки. Останнє виключає одну ланку – шатун та одну кінематичну пару – зв'язок шатуна з штангою. Таке спрощення конструкції приводить до використання різновидності кулачкового механізму, у якому, на відміну від певного профілю кулачка, використовується профіль кола, центр якого має деяке радіальне зміщення  $e$  (ексцентриситет). Профіль кола є більш технологічним, а геометричне або силове замикання і взаємодія його із опорною поверхнею штанги забезпечує виконання коливальних рухів. Зміна величини ексцентриситету та діаметрів кола дає

можливість отримувати необхідні амплітуди коливань робочого органу. В таких віброзбудниках за одного й того ж значення ексцентриситету  $e$  можна виконати ексцентрики, що мають різні діаметри  $D$ ,  $d$  (рис. 3а, б), які будуть забезпечувати однакову величину переміщення (шлях рухомої системи штанги із закріпленими на ній тарілками).

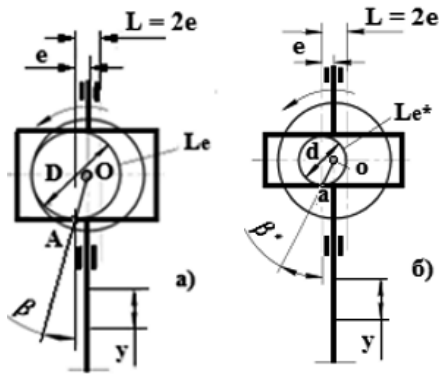


Рис. 3 – Схема кулачкового механізму

Аналіз порівняння наведеного вказує на різні швидкості  $V$  точок поверхні ексцентрика, що контактує з направляючою площиною штанги:

$V = OA(oa) \cdot \omega$  за постійної кутової швидкості обертання  $\omega = \text{const}$ ,  $OA$  змінюється у діапазоні від  $OA^{\min} = (D/2) - e$  до  $OA^{\max} = (D/2) + e$ .

При цьому, шлях контакту 2-х ланок на штанзі залишатиметься постійним –  $L = 2e$ , а шлях, який проходить поверхня ексцентрика, відповідно буде різним –  $L_e = \pi D$  і  $L_e^* = \pi d$ . За рівних умов, випадок більшого діаметра ( $D$ ) ексцентрика веде до інтенсивнішого зношування за більшої різниці швидкостей ланок, або траєкторій відносного переміщення характерних точок елементів контакту. З іншої сторони, збільшення діаметра ексцентрика веде до збільшення моменту опору, який виникає внаслідок тертя між робочою поверхнею ексцентрика та опорною поверхнею штанги. Для обох випадків останнє можна представити у вигляді:

$$M_o = P_4 \cdot OA \cos \beta$$

або 
$$M_o^* = P_4 \cdot Oa \cdot \cos \beta^*$$

і 
$$M_o^* < M_o; \quad P_4 = f \cdot N_n,$$

де  $N_n$  – нормальна реакція, яка дорівнює загальній силі ( $P$ ), що діє на шток (штангу) екстракційного апарата.

Максимальне значення моменту опору буде відповідно визначатися:

$$M_o^{\max} = P_4 \cdot ((D/2) + e), \quad M_o^{*\max} = P_4 \cdot ((d/2) + e).$$

Наведене вказує на необхідність більших витрат енергії ( $N = M_o \cdot \omega$ ) для розглядуваного випадку з більшим діаметром ексцентрика. Найкраще використання ексцентрикового приводу знаходиться при вирішенні оптимізаційної задачі (з врахуванням

відношення  $D/d$ ) витрат енергії, металоємності та умов міцності ексцентрика за максимального навантаження.

Зменшення моменту опору може досягатися і за рахунок використання відповідних мастил та конструктивних елементів на робочій поверхні ексцентрика, або на опорній поверхні штанги.

Розглянута конструкція приводу має недолік, який пов'язаний із неможливістю зміни робочого ходу (амплітуди коливань), що потребує відповідно заміни ексцентрика. Для цього приводи вібраційних апаратів інколи оснащують звичайними валами, на яких закріплюють змінні ексцентрикові втулки. За використання планшайб передбачається можливість зміни положення ексцентрикового пальця, або ексцентрика з подальшою його фіксацією.

Зміна амплітуди коливань штанги в процесі безперервної роботи пов'язана з технічними складностями. Для цієї мети можуть використовуватися приводи, оснащені кулісними механізмами. Але вони є складними і коштовними, що обмежує їх використання. Заслуговує уваги конструкція кривошипа, в якого ексцентриситет можна змінювати без заміни деталей приводу. Таке влаштування забезпечується тим, що ексцентрикову втулку виконують так, щоб її можна повертати на шатунній шийці вала (яка має лиски) і фіксувати в певних положеннях. Для розширення меж зміни ексцентриситету кривошипа шатунну втулку вала інколи також виконують з ексцентриситетом.

## Висновок

Проведений аналіз особливостей використання приводних систем екстракційного обладнання з коливальним ефектом в робочому середовищі вказує на можливість використання різноманітних існуючих конструкцій вібраційно-інерційних пристроїв приводів, що дозволяє суттєво інтенсифікувати процес за рахунок ефективного підведення енергії ззовні. Найпростішим є використання приводу механічного типу, а використання частотного перетворювача створює можливості регулювання характеристик коливальних процесів робочого середовища. Для досягнення оптимальних характеристик протікання процесу екстрагування, як за якістю так і за часом, потрібно вивчення питань, пов'язаних із встановленням та експериментальним визначенням раціональних параметрів коливань механічної системи і робочого середовища, – для конкретного виду сировини, що створить можливості підвищення продуктивності при умові збереження енергетичних витрат.

## Список літератури

1. Гончаревич, И. Ф. Вибрационная техника в пищевой промышленности / И. Ф. Гончаревич, Н. Б. Урьев, М. А. Талейсник. – М.: Пищевая промышленность. – 1977. – 278 с.



2. Кузьмичев, В. А. Основы проектирования вибродвижения оборудования: учебное пособие / В. А. Кузьмичев. – СПб.: Издательство «Лань». – 2014. – 208 с.
3. Шушпанников, А. Б. Обоснование выбора вибропривода для винтовых смесителей / А. Б. Шушпанников // *Техника и технология пищевых производств*. – 2011. – №1(20).
4. Joshi, M. Performance Monitoring System for Electromagnetic Vibrating Feeders of Coal Handling Plant / M. Joshi // *Plant Maintenance Resource Center, M-News Edition 27*, Technical paper at web site: www.plant-maintenance.com/articles/Feeder\_Performance\_Monitoring.pdf, July 2002.
5. Despotovic, Z. Mathematical model of electromagnetic vibratory actuator / Z. Despotovic // *PROCEEDINGS of the XIII International Symposium of the Power Electronics*, N. Sad 5-7. – 2003. – Vol. 3. – P. 1-5.
6. Nguyen Van Khang Parametric Torsional Vibration of Mechanical Drive Systems with non-uniform Transmission Mechanisms / Nguyen Van Khang, Nguyen Phong Dien, Hoang Manh Cuong // *TECHNISCHE MECHANIK*, Band 28, Heft 3-4, Manuskripteingang: 15. – 2008. – P. 310 - 323.
7. Rodič, M. Dynamic emulation of mechanical loads: an advanced approach / M. Rodič, K. Jezernik, and M. Trlep // *IEE Proceedings: Electric Power Applications*. – 2006. – vol. 153, no. 2. – P. 159-166. – doi:10.1049/ip-epa:20050063.
8. Патент на винахід № 109087 С2. Экстрактор безперервної дії для рослинної сировини / Зав'ялов В.Л., Костюк В.С., Мисюра Т.Г. і ін. // 10.07.2015, Бюл. №13.
9. Деканський, В. Є. Класифікація екстракційної апаратури періодичної дії з коливальним ефектом робочого середовища / В. Є. Деканський, В. Л. Зав'ялов, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова // *Вібрації в техніці та технологіях: всеукраїнський науково-технічний журнал*. Вінниця. – 2015. – № 3 (79). – С. 129-132.
10. Zavialov, V. Development of mathematical models of external mass exchange under conditions of vibroextraction from vegetable raw materials / V. Zavialov, V. Bodrov, T. Misyura, N. Popova, Y. Zaporozhets, V. Dekanskiy // *Chemistry and Chemical Technology*. – 2015. – Volume 9, Issue 3. – P. 367-374.
11. Городецкий, И. Я. Вибрационные массообменные аппараты / И. Я. Городецкий, А. А. Васин, В. М. Олевский, П. А. Лупанов / под ред. В.М. Олевского. – М.: Химия. – 1980. – 192 с.

#### Bibliography (transliterated)

1. Goncharevich, I. F., Ur'ev, N. B., Talejsnik, M. A. Vibracionnaja tehnika v pishhevoj promyshlennosti [Vibratory Equipment for food industry], Moscow: Pishhevaja promishlennost', 1977, 278 p.
2. Kuz'michev, V. A. Osnovy proektirovaniya vibracionnogo oborudovanija: uchebnoe posobie [Fundamentals of vibration equipment: a tutorial], SanktPiterburg: Izdatel'stvo «Lan'», 2014, 208 p.
3. Shushpannikov, A. B. Obosnovanie vybora vibroprivoda dlja vintovyh smesitelej [Rationale vibroprivody for screw mixers]. *Tehnika i tehnologija pishhevih proizvodstv [Technique and technology of food production]*, 2011, 1(20).
4. Joshi, M. Performance Monitoring System for Electromagnetic Vibrating Feeders of Coal Handling Plant. *Plant Maintenance Resource Center, M-News Edition 27*, Technical paper at web site: www.plant-maintenance.com/articles/Feeder\_Performance\_Monitoring.pdf, July 2002.
5. Despotovic, Z. Matematical model of electromagnetic vibratory actuator, *PROCEEDINGS of the XIII International Symposium of the Power Electronics*, 2003, 3, 1-5.
6. Nguyen Van Khang, Nguyen Phong Dien, Hoang Manh Cuong Parametric Torsional Vibration of Mechanical Drive Systems with non-uniform Transmission Mechanisms. *TECHNISCHE MECHANIK*, Band 28, Heft 3-4, Manuskripteingang, 2008, 310 - 323.
7. Rodič, M., Jezernik, K., Trlep, M. Dynamic emulation of mechanical loads: an advanced approach. *IEE Proceedings: Electric Power Applications*, 2006, 2(153), 159-166, doi:10.1049/ip-epa:20050063.
8. Patent na vinahid # 109087 S2. Ekstraktor bezpererвної дії dlja roslinnoj sirovini / Zav'jalov V.L., Kostjuk V.S., Misyura T.G. i in. // 10.07.2015, Bjul. #13.
9. Dekans'kij, V. Ye., Zav'jalov, V. L., Misyura, T. G., Popova N. V. Klasifikacija ekstrakcijnogo aparaturi periodichnoj дії z kolival'nim efektom robochogo seredovishha [Classification extraction equipment Batch vibrational effect on the working environment]. *Vibracii v tehnici ta tehnologijah: vseukraïns'kij naukoivo-tehnicnij zhurnal [The vibrations in engineering and technology, national scientific journal]*, Vinnicja, 2015, 3(79), 129-132.
10. Zavialov, V., Bodrov, V., Misyura, T., Popova, N., Zaporozhets, Y., Dekanskiy, V. Development of mathematical models of external mass exchange under conditions of vibroextraction from vegetable raw materials. *Chemistry and Chemical Technology*, 2015, 3(9), 367-374.
11. Gorodeckij I. Ja., Vasin, A. A., Olevskij, V. M., Lupanov, P. A. Vibracionnye massoobmennye apparaty [Vibrating mass transfer devices], pod red. V.M. Olevskogo, Moskov: Himija, 1980, 192 p.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Зав'ялов Володимир Леонідович** – доктор технічних наук, професор, Національний університет харчових технологій, зав. каф. процесів і апаратів харчових виробництв; м. Київ, Україна; e-mail: zavialov@nuft.edu.ua

**Zavialov Vladimir** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Department of Processes and Apparatus for Food Production, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: zavialov@nuft.edu.ua

**Костюк Володимир Степанович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри технічної механіки і пакувальної техніки; м. Київ, Україна; e-mail: vsk.tmpt@gmail.com

**Kostyuk Vladimir** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate professor, Department of Technical Mechanics and Packaging Machinery, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: vsk.tmpt@gmail.com

**Бодров Віктор Семенович** – кандидат технічних наук, професор, Національний університет харчових технологій, професор кафедри експертизи харчових продуктів; м. Київ, Україна; e-mail: Bodrov\_Viktor@i.ua

**Bodrov Viktor** – Candidate of Technical Sciences, Professor, Professor of Department of Processes and Apparatus for Food Production, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: Bodrov\_Viktor@i.ua

**Костюк Євгеній Володимирович** – асистент, Національний університет харчових технологій, асистент кафедри технічної механіки і пакувальної техніки; м. Київ, Україна; e-mail: vsk.tmpt@gmail.com

**Kostyuk Eugene** – Assistant, assistant of Department of Technical Mechanics and Packaging Machinery, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: vsk.tmpt@gmail.com

**Мисюра Тарас Григорович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри процесів і апаратів харчових виробництв; м. Київ, Україна; e-mail: taras\_as@i.ua

**Misyura Taras** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate professor, Department of processes and vehicles of food productions, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: taras\_as@i.ua

**Запорожець Юлія Владиславівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри процесів і апаратів харчових виробництв; м. Київ, Україна; e-mail: zap\_as@ukr.net

**Zaporozhets Yulia** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate professor, Department of processes and vehicles of food productions, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: zap\_as@ukr.net

**Попова Наталія Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри експертизи харчових продуктів; м. Київ, Україна; e-mail: natalkn@mail.ru

**Popova Natalia** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate professor, Department of examination of food products, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: natalkn@mail.ru

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Зав'ялов, В. Л.** Удосконалення технології виробництва гірких настоянок за допомогою математико-статистичних методів досліджень / **В. Л. Зав'ялов, В. С. Костюк, В. С. Бодров, Є. В. Костюк, Т. Г. Мисюра, Ю. В. Запорожець, Н. В. Попова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 30-38. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.05.

*Please cite this article as:*

**Zavialov, V., Kostyuk, V., Bodrov, V., Kostyuk, E., Misyura, T., Zaporozhets, Y., Popova, N.,** Features of private extraction equipment with vibrational effect workspace. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2016, **18** (1190), 30-38, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.05.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Завьялов, В. Л.** Особенности приводных систем экстракционного оборудования с колебательным эффектом рабочей среды / **В. Л. Завьялов, В. С. Костюк, В. С. Бодров, Е. В. Костюк, Т. Г. Мисюра, Ю. В. Запорожец, Н. В. Попова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 30-38. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.05.

**АННОТАЦІЯ** *Изложено анализ использования разных типов вибрационных приводов и показано возможности их применения в аппаратах и оборудовании для проведения процессов вибрационного экстрагирования сырья пищевого назначения. Рассмотрено затраты энергии на проведение процесса экстрагирования с использованием электромеханического кривошипно-шатунного и бесшатунного эксцентрикового привода.*

**Ключевые слова:** *вибрационный привод, колебательные процессы, рабочая среда, колебательный эффект, общие и составляющие затраты энергии, частота и амплитуда колебаний*

*Надійшла (received) 15.05.2016*

## ПОСТРОЕНИЕ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭНЕРГОСБЕРЕГАЮЩЕГО СТЕНДА НА БАЗЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

**А. О. КОРОТКОВ<sup>1\*</sup>, А. В. СЕМИКОВ<sup>2</sup>, Г. И. МЕЛЬНИКОВ<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Кафедра «Электрические станции», НТУ ХПИ, Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> Кафедра «Автоматизированных электромеханических систем», НТУ ХПИ, Харьков, УКРАИНА

\*email: Aleksandr88\_88@bk.ru

**АННОТАЦИЯ** В данной работе рассматривается испытательная установка нагрузки двигателей внутреннего сгорания, построенная на базе асинхронной машины с фазным ротором и автономного преобразователя напряжения, обеспечивающая передачу энергии в электросеть, получаемую от фазного ротора. Выполнен синтез системы управления асинхронной машины и автономного преобразователя напряжения, позволяющей управлять моментом нагрузки ДВС независимо от скорости вала и реактивной мощности сети. Построена компьютерная модель всей системы. Проведено компьютерное моделирование испытаний ДВС в режимах, как поддержание постоянного момента, так и скорости. Получены энергетические показатели стенда испытаний ДВС.

**Ключевые слова:** двигатель внутреннего сгорания, испытательный стенд, испытание ДВС, автономный преобразователь напряжения, асинхронная машина.

## CONSTRUCTION AND MODELLING ENERGY SAVING STAND ON THE BASIS OF THE ASYNCHRONOUS GENERATOR FOR TESTING OF INTERNAL COMBUSTION ENGINES

**A. KOROTKOV<sup>1\*</sup>, A. SEMIKOV<sup>2</sup>, G. MELNIKOV<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Department of "Electric stations" National Technical University of Kharkov Polytechnic Institute, Kharkov, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of "Automated electromechanical systems" National Technical University of Kharkov Polytechnic Institute Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** The problem of energy efficiency testing process of internal combustion engines, as well as ways of modernization of testing equipment for internal combustion engines is considered in this paper. The proposed installation of the load for the internal combustion engines, where a braking device is an asynchronous machine with wound rotor and connected to the rotor of the asynchronous machine autonomous voltage inverter has been considered. This setting provides the energy transfer to the grid obtained from the stator and phase rotor of asynchronous generator. The synthesis of the asynchronous machine control system and independent voltage converter, which allow control the internal combustion engine load, regardless of the shaft speed and reactive power network has been performed. Synthesized control system allows compensate the reactive power in the network, regardless of the stand operation mode. A computer model of the entire test stand control system is performed. A computer simulation of the internal combustion engine test station in such modes, as maintenance of constant torque and maintenance of the constant internal combustion engine rotation speed is carried. The energy data of test stand for an internal combustion engine are obtained. Disadvantages of the test stand design are found and analyzed.

**Keywords:** internal combustion engines, test stands, test of ICE, autonomous voltage converter, asynchronous generator.

### Введение

Испытания составляют заключительный этап сложного процесса создания и совершенствования двигателей внутреннего сгорания (ДВС). В ходе испытаний ДВС подвергается нагрузкам для оценки таких показателей как: заявленная мощность, экономичность, токсичность и целый ряд других показателей. Определение вышеперечисленных показателей устанавливают путём испытания ДВС на специализированных обкаточно-тормозных стендах (ОТС). [1]

В настоящее время, на моторостроительных заводах, эксплуатируется большое количество устаревших ОТС, что увеличивает затраты денежных средств

на производство готовой продукции. Для уменьшения испытательной составляющей в цене готовой продукции, имеет смысл заменить или модернизировать устаревшие ОТС.

Современный или модернизированные ОТС должен удовлетворять высоким требованиям, предъявляемым к управляемости, энергосбережению, в том числе, обеспечивать инвариантность скорости и момента относительно друг друга при достаточно больших диапазонах регулирования, соответствующих режимам испытаний ДВС, и отдавать в сеть энергию, вырабатываемую ДВС. [2]

Анализ материалов, опубликованных в научной статье «Математическая модель нагрузочной части

испытательного стенда, инвариантного к скорости вращения на основе асинхронно-вентильного каскада» [3] показал, что структура с электро-тормозом в виде асинхронного генератора с фазным ротором и подключенном в цепь ротора выпрямителем передающим энергию инвертору является наиболее энергоэффективной.

**Цель работы**

Построить систему управления и смоделировать работу ОТС на базе асинхронного генератора с фазным ротором, а так же оценить его энергетические показатели, полученные в ходе моделирования работы ОТС в пакете Matlab.

**Изложение основного материала**

Рассматриваемый в работе стенд выполнен на основе асинхронного генератора с фазным ротором (АГ), превращающей механическую энергию ДВС, в электрическую энергию, передаваемую в сеть через обмотки статора, подключённые напрямую к сети переменного тока, и с помощью автономного 3-ёх фазного мостового преобразователя напряжения (АПН), подключенного к ротору машины через промежуточный 3-ёх фазный мостовой выпрямитель напряжения (ВН). Функциональная схема показана на рис. 1.

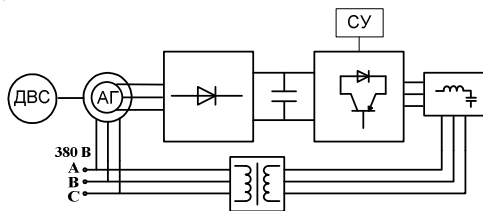


Рис. 1 – Схема испытательного стенда на базе АГ и АПН.

Вращающий момент нагрузки ДВС ( $M_{ДВС}$ ) определяется электромагнитным моментом двигателя ( $M_{Эл.М}$ ), механическими потерями ( $M_{Тр}$ ) и динамическим моментом в соответствии с уравнением механического баланса.

$$M_{ДВС} - M_{Эл.М} - M_{Тр} = J \frac{d\omega}{dt}, \tag{1}$$

где  $M_{Эл.М}$  — электромагнитный момент АГ,  
 $M_{ДВС}$  — момент, создаваемый ДВС, приведенный к валу АГ,  
 $M_{Тр}$  — момент трения,  
 $J$  — суммарный момент инерции, приведенный к валу АГ,  
 $\omega$  — угловая скорость вала АГ.

Управление моментом АГ осуществляется изменением мощности, проходящей через его ротор, которая определяется из условия равенства мощностей:

$$P_P + P_{Cm} = P_M - P_{П.Р.} - P_{П.См.} \tag{2}$$

где:  $P_P$  — мощность ротора,  
 $P_{Cm}$  — мощность статора,  
 $P_M$  — мощность механическая,  
 $P_{П.Р.}$  — мощность потерь в роторе и выпрямителе,  
 $P_{П.См.}$  — мощность потерь в статоре.

Определение  $P_P, P_{Cm}, P_{П.Р.}, P_{П.См.}$  осуществляется по токам и напряжениям с помощью блока, показанного на рис 2.

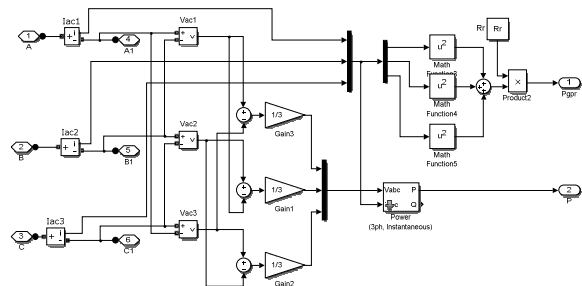


Рис. 2 – Блок определения мощности статора, ротора и мощности потерь в них

По найденной мощности и текущему значению выпрямленного напряжения ротора, а также заданной реактивной мощности рассчитывается режим работы АПН, с помощью блока, показанного на рисунке 3 и описанного в предыдущей работе [4].

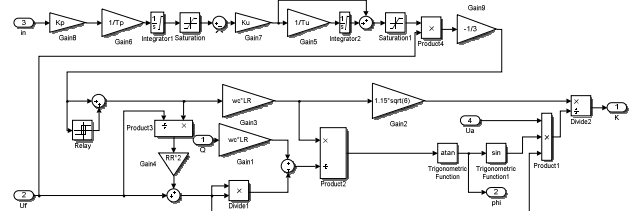


Рис. 3 – Регулятор амплитуды фазы напряжения АПН

Схема модели АПН показана на рисунке 4 и описана в предыдущей работе [3].

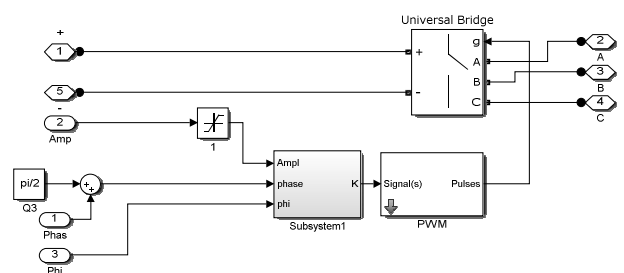


Рис. 4 – Компьютерная модель АПН

После АПН установлен фильтр для уменьшения высокочастотных составляющих тока, вызванных ШИМ. Амплитуда напряжения ротора ниже амплитуды напряжения статора, поэтому после АПН установлен повышающий трансформатор. Компьютерная модель всего стенда показана на рисунке 5, она включает в себя ДВС и электрическую сеть с активным и реактивным сопротивлением[5].

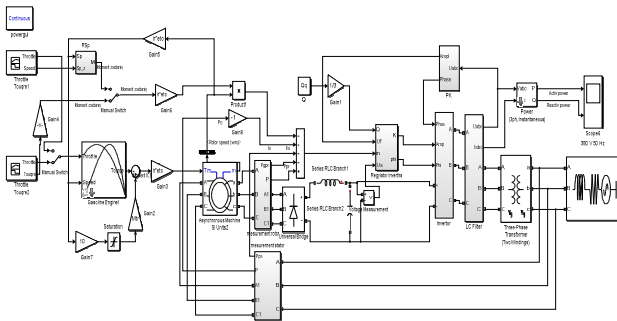


Рис. 5 – Компьютерная модель испытательного стенда.

### Обсуждение результатов

С целью проверки работоспособности синтезированной системы управления, установления диапазона регулирования и энергоэффективности стенда на разработанной компьютерной модели, было проведено два эксперимента:

- нагрузка ДВС моментом в соответствии с заданной временной зависимостью;
- отработка заданной тахограммы скорости вала;

Экспериментально моделирование производилось с ДВС номинальной мощностью 150 л.с. и асинхронным генератором 110 кВт, частота вращения вала при максимальном моменте составляет 5000 об/мин, максимальная частота 8000 об/мин.

В первом эксперименте испытываемый ДВС нагружался на 25, 50, 75, 100 % от номинального момента ДВС при полностью открытой дроссельной заслонке. В ходе первого эксперимента были получены следующие временные зависимости частоты оборотов вала ДВС, ток статора и ротора АГ, напряжения в звене постоянного тока инвертора, и показаны на рис.6. Также были получены энергетические характеристики стенда, такие как механическая мощность ДВС, мощность вырабатываемая статором и ротором АГ показана на рис. 7. Энергетические показатели АПН такие как активная и реактивная мощность, показанные на рис. 8.

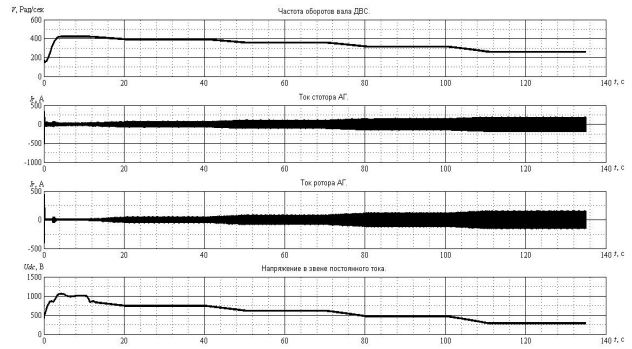


Рис. 6 – Временные зависимости частоты вала, тока статора, напряжения и тока в звене постоянного тока инвертора в первом эксперименте.

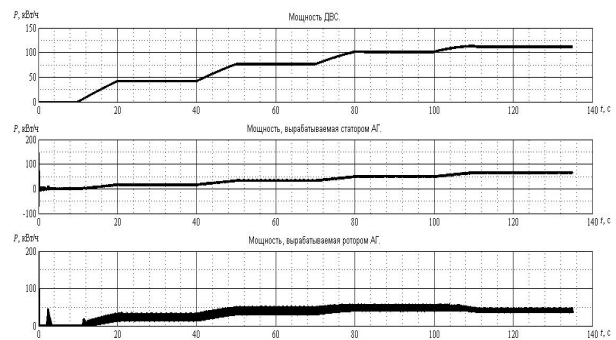


Рис. 7 – График изменения механической мощности ДВС, мощности вырабатываемой статором и ротором АГ.

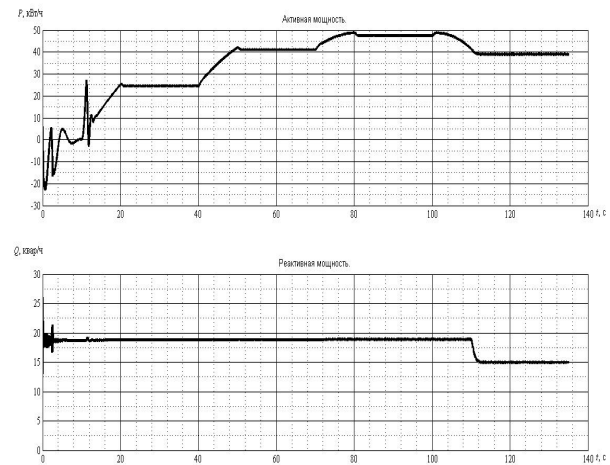


Рис. 8 – График передаваемой активной и реактивной мощности инвертором.

Из графиков видно, что система обрабатывает заданную временную зависимость момента нагрузки ДВС. В тоже время в ходе эксперимента было обнаружено что статор потребляет реактивную мощность в пределах от 20 до 30 квар., которые необходимо скомпенсировать с помощью конденсаторных бата-

рей. Полученные в ходе эксперимента энергетические показатели стенда, внесены в таблицу 1.

Таблица 1 – Значения мощностей в различных участках цепи в первом эксперименте.

Момент ДВС, %	Механическая мощность, развиваемая ДВС, кВт	Мощность, вырабатываемая статора АГ, кВт	Мощность, вырабатываемая ротора АГ, кВт	Активная мощность, передаваемая от АПН в сеть, кВт	Реактивная мощность, потребляемая статором АГ, квар	Реактивная мощность, передаваемая от АПН в сеть, квар
25	42,12	17,78	24,8	24,5	20	18,4
50	76,3	33,2	42,2	41,1	25	18,5
75	101	49,5	48,9	47,5	30	18,6
100	109,67	66,25	41	39,05	35	15,8

Во втором эксперименте испытываемый ДВС работал в диапазоне частот от 2000 до 4500 об/мин, при полностью открытой дроссельной заслонке. В его ходе были получены следующие зависимости частоты оборотов вала ДВС, ток статора и ротора АГ, напряжения в звене постоянного тока инвертора, и показаны на рис. 9. Также были получены энергетические характеристики стенда, такие как механическая мощность ДВС, мощность вырабатываемая статором и ротором АГ показана на рис 10. Энергетические показатели АПН такие как активная и реактивная мощность, показанные на рис 11.

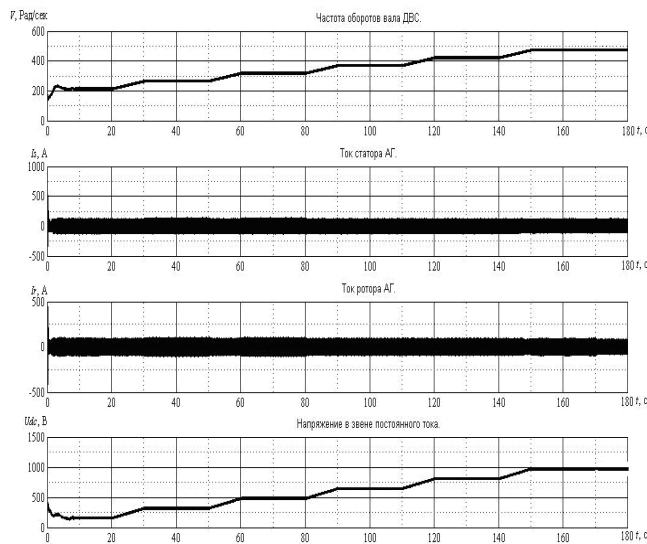


Рис. 9 – Временны зависимости частоты вала, тока статора, напряжения и тока в звене постоянного тока инвертора во втором эксперименте.

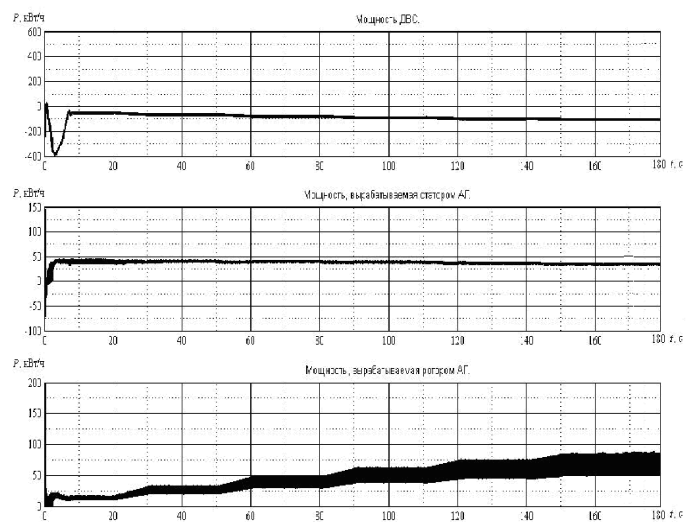


Рис. 10 – График изменения механической мощности, мощности в звене постоянного тока и разности мощностей между ДВС и инвертором.

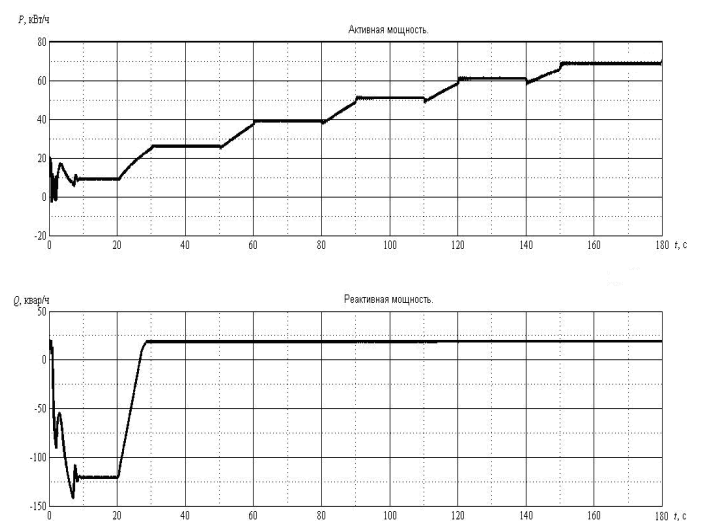


Рис. 11 – График передаваемой активной и реактивной мощности инвертором.

Из графиков видно, что данная схема обрабатывает заданную временную зависимость скорости вала ДВС в пределе регулирования от 2000 об/мин до 4500 об/мин и передаёт выработанную ДВС энергию в сеть предприятия.

При понижении частоты вала ДВС ниже 2000 об/мин АГ данного стенда переходит в двигательный режим, в тоже время при повышении частоты вала ДВС выше 4500, управление стендом становится невозможным.

Поэтому использование данного вида стенда в нагрузке ДВС по скорости [6] из-за малого предела

регулирования не имеет смысла. Так как для большинства серийных ДВС, диапазон рабочих частот вращения вала колеблется от 1500 до 5000 об/мин.

Во время моделирования работы стенда в режиме нагрузки ДВС по скорости было обнаружено, что статор потребляет реактивную мощность в пределах от 25 до 27 квар., которые необходимо компенсировать с помощью конденсаторных батарей. Полученные в ходе эксперимента энергетические показатели стенда, внесены в таблицу 2.

Таблица 2 – Значения мощностей в различных участках цепи во втором эксперименте.

Скорость вала ДВС, %	Механическая мощность, развиваемая ДВС, кВт	Мощность, вырабатываемая статора АГ, кВт	Мощность, вырабатываемая ротора АГ, кВт	Активная мощность, передаваемая от АИП в сеть, кВт	Реактивная мощность, потребляемая статором АГ, квар	Реактивная мощность, передаваемая от АИП в сеть, квар
2000	55	40	14	13,1	27	20
2500	68,8	40,5	27,5	26,1	27	20
3000	81,7	40	40,9	39,1	26,3	21,3
3500	92,8	38,7	53,2	51,9	26,2	21,5
4000	101,4	37,1	61,5	61	25,9	21
4500	106,9	35	70,2	68,7	25,5	20

### Выводы

Анализируя полученные результаты видно, что система обрабатывает с достаточным быстродействием (порядка 0.1 с) задаваемые временные зависимости момента нагрузки и скорости ДВС, обеспечивая при этом отдачу энергии в сеть.

Основными недостатками этого стенда, являются предел регулирования стенда по скорости. Данная особенность стенда связана с его электротормозом, так как минимальная частота вращения в генераторном режиме составляет 1500 или один номинал, а максимальная частота вращения составляет 4500 или 3 номинала.

В тоже время необходимо компенсировать требуемый объёма реактивной мощности, потребляемой статором АГ при работе стенда. Объём реактивной мощности которую необходимо компенсировать для статора АГ варьируется от 20 до 30 квар., в зависимости от режима работы стенда.

Поэтому в дальнейшем исследовании необходимо сравнить все виды испытательных стендов, и определить какой из них является наиболее энергоэффективным.

### Список литературы

- 1 Райков, И. Я. Испытания двигателей внутреннего сгорания. / И. Я. Райков // Москва «Высшая школа». – 1975. – С 3-11.
- 2 Тодарев, В. В., Погуляев, М. Н., Дорошенко, И. В., Энергосберегающие электромеханические стенды для испытания двигателей внутреннего сгорания и транс-

миссий сельскохозяйственной техники / В. В. Тодарев, М. Н. Погуляев, И. В. Дорошенко // Вестник Гомельского гос. техн. университета им П.О. Сухого. – 2007. – №4. – С.80-84.

- 3 Дорошенко, И. В. Математическая модель нагрузочной части испытательного стенда, инвариантного к скорости вращения на основе асинхронно-вентильного каскада. / И. В. Дорошенко, В. С. Захарченко, В. А. Савельев // Вестник Гомельского гос. техн. университета им П.О. Сухого. – 2013. – №3 – С. 63-71.
- 4 Мельников, Г. И. Исследование энергосберегающего электромеханического стенда на базе машины постоянного тока для испытания двигателей внутреннего сгорания / Г. И. Мельников, А. О. Коротков, А. В. Семиков // Вестник НТУ «ХПИ». – 2014. – № 56 (1098). – С. 106-117.
- 5 Герман-Галкин, С. Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем Matlab 6.0 / С. Г. Герман Галкин // Санкт-Петербург «Люмена» – 2006. – С. 100-150.
- 6 ГОСТ 18509-88 Дизели тракторные и комбайновые. Методы стендовых испытаний. // Москва: Изд-во стандартов. – 1988. – 6 с.

### Bibliography (transliterated)

- 1 Raikov, I. J. tests of internal combustion engines, Moscow "High School", 1975, 3-11.
- 2 Todaro, V. V., Pogulyaev, M. N., Doroshenko, I. V. Saving electromechanical stands for testing of internal combustion engines and transmissions of agricultural machinery. *Journal of the Gomel State Technical University*, PO Sukhoi, 2007, 4, 80-84.
- 3 Doroshenko, I. V., Zakharchenko, V. S., Saveliev, V. A. Mathematical model of the load of the test-leg stand, invariant to the rotation speed on the basis of a-synchronous-valve cascade. *Journal of the Gomel State Technical University*, PO Sukhoi, 2013, 3, 63-71.

- 4 **Melnikov, G. I., Korotkov, A. A., Semenov, A. V.** Research energy-saving electromechanical stand-mechanically based DC machine for testing internal combustion engines. *Bulletin NTU "KhPI"*, 2014, **56**(1098), 106-117.
- 5 **German-Galkin, S. G.** Компьютерное моделирование систем с полупроводниковыми элементами. *Sankt Petersburg "Lumen"*, 2006, 36-150.
- 6 **GOST 18509-88** Tractor and combine diesel engines. Methods of bench tests. Moscow, 1988, 6 p.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Коротков Александр Олегович** – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры «Электрические станции»; г. Харьков, Украина; e-mail: Aleksandr88\_88@bk.ru.

**Korotkov Aleksandr Olegovich** – postgraduate student, department of "Electric stations" National Technical University of Kharkov Polytechnic Institute, Kharkov, UKRAINE e-mail: Aleksandr88\_88@bk.ru.

**Семиков Алексей Владимирович** – аспирант, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», аспирант кафедры «Автоматизированных электромеханических систем»; г. Харьков, Украина; e-mail: aleksey\_vl89@mail.ru

**Semikov Aleksei Vladimirovich** – postgraduate student, department of "Automated electromechanical systems" National Technical University of Kharkov Polytechnic Institute, Kharkov, UKRAINE e-mail: aleksey\_vl89@mail.ru

**Мельников Георгий Игоревич** – кандидат технических наук, доцент, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», доцент кафедры «Электрические станции»; г. Харьков, Украина; e-mail: gmelnikov59@gmail.com

**Melnikov Georgiu Igorevich** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Department of Electric stations, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine; e-mail: gmelnikov59@gmail.com

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Коротков, А. О.** Построение и моделирование энергосберегающего стенда на базе асинхронного генератора для испытаний двигателей внутреннего сгорания / **А. О. Коротков, А. В. Семиков, Г. И. Мельников** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 40-45. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.06.

*Please cite this article as:*

**Korotkov, A. O., Semikov, A. V., Melnikov, G. I.** Construction and modelling energy saving stand on the basis of the asynchronous generator for testing of internal combustion engines. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 40-45, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.06.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Коротков, О. О.** Побудова та моделювання енергозберігаючого стенду на базі асинхронного генератора для випробувань двигунів внутрішнього згорання / **О. О. Коротков, А. В. Семіков, Г. І. Мельников** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 40-45. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.06.

**АНОТАЦІЯ** У даній роботі розглядається випробувальна установка навантаження двигунів внутрішнього згорання, побудована на базі асинхронної машини з фазним ротором і автономного перетворювача напруги, що забезпечує передачу енергії в електромережу, що отримується від фазного ротора. Виконано синтез системи управління асинхронної машини і автономного перетворювача напруги, що дозволяє управляти моментом навантаження ДВС незалежно від швидкості вала і реактивної потужності мережі. Побудована комп'ютерна модель всієї системи. Проведено комп'ютерне моделювання випробувань ДВС в режимах, як підтримання постійного моменту, так і швидкості. Отримано енергети-етичні показники стенду випробувань ДВС.

**Ключові слова:** двигун внутрішнього згорання, випробувальний стенд, автономний інвертор напруги, асинхронний генератор.

*Поступила (received) 11.05.2016*



## ДИНАМІЧНІ ПРОЦЕСИ У ВІБРОУДАРНИХ СИСТЕМАХ ЗІ ЗМІННИМИ ПАРАМЕТРАМИ

**Ю. В. КОСТЕНКО\***

*Кафедра теорії та систем автоматизованого проектування механізмів і машин, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА  
\*email: kostenko.yuriy@gmail.com*

**АНОТАЦІЯ** Викладений новий підхід до урахування впливу змінної маси технологічного вантажу на характер динамічних процесів у віброударній системі. Встановлено, що внаслідок нелінійної жорсткості пружних опор та залежно від їх конструктивного виконання, можливою є реалізація субгармонійних режимів. Сформульовані критерії для відлаштування від резонансу, що може виникнути на кратних (дольних) частотах збудження. Створена удосконалена конструкція корпусу віброударної машини.

**Ключові слова:** динамічні процеси у машинах, міцність машин, віброударна система, вібромашина, змінна маса, прикладна теорія коливань, субгармонійний режим.

## DYNAMIC PROCESSES IN VIBROIMPACT SYSTEMS WITH VARIABLE PARAMETERS

**IU. V. KOSTENKO\***

*Department of theory and computer aided design of mechanisms and machines, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE  
\*email: kostenko.yuriy@gmail.com*

**ABSTRACT** In this paper new approach to the accounting of the variable mass influence on the character of dynamical processes in vibroimpact systems was presented. The purpose of the work is to study the dynamical processes and related effects in vibroimpact systems. To solve the problem was used methods of the oscillation theory, the theory of elasticity, the theory of 3D parametric shell and solid geometry modelling, finite elements method, the acceleration method. The dependences, that describes the mass change character, based on experimental researches and dependence from dissipated energy were proposed. The accuracy and correctness of approach based on energy dependent was shown. The comparison between traditional and proposed approaches was demonstrated and its advantages and disadvantages was shown. It was found that the realization of sybharmonical modes became possible because of elastic supports nonlinearity and design features. The realization of subharmonic modes lead to growth of impact interaction force. The approach, based on corresponding values for phase variables at the beginning and the end of period was proposed to periodic solutions search. The criteria for tuning from resonance frequencies that can appear on perturbing force with multiple (partite) frequencies were formulated. The machine body designed with taking to the account previously formulated recommendations was created. The investigation of stress-strain status was performed and found that improved machine body satisfies strength requirements. The comparison of numerical and experimental data was done. The accuracy and authenticity of numerical investigations was confirmed.

**Keywords:** dynamic processes in machines, strength of machines, vibroimpact system, vibromachine, variable mass, applied theory of oscillations, subharmonic mode

### Вступ

Розвиток науки та техніки призводить до появи нових зразків машин, зокрема вібраційних, яким властива експлуатація у різних умовах та виконання складних технологічних операцій. Характерним для цих машин є постійне перебування під впливом вібрацій та динамічного навантаження. Особливого значення ці чинники набувають для важконавантажених віброударних машин, коли маса корпусу машини є значною величиною (вимірюються у тонах), а змінна маса технологічного вантажу – величиною, сумірною з нею. Таке співвідношення вже не дозволяє використовувати деякі спрощення та потребує більш детального й коректного опису динамічної моделі віброударної системи.

Останнім часом помітним є зростання застосування віброударних машин у різних галузях, зокрема: металургія, металообробка, сільське господарство, обробка будівельних матеріалів. Як приклад взаємодії з технологічним вантажем змінної маси можна навести віброударні машини, що використовуються у ливарному виробництві. Під час процесу вибивки відбувається часткове руйнування піщано-глинястої форми, у якій знаходиться відливка. Піщано-глиняна форма є неоднорідною за своєю структурою та складом, і її фізико-механічні властивості залежать від великої низки чинників, тому достатньо складно надати такий опис процесу її руйнування, за допомогою якого можна було б достатньо точно змоделювати зміну маси у часі та її вплив на динамічні процеси. Зміна параметрів нелінійної віброударної системи може призвести до

реалізації у ній різних ефектів, наприклад, субгармонійних режимів різної кратності, зміни частот навантажувальних зусиль, тощо.

Дослідженню віброударних систем приділяти значну увагу багато вчених [1-11]. У цих працях розглядаються різні аспекти дослідження віброударних машин, проте рішення для достатньо повного опису віброударної системи, яке дозволяло б враховувати сукупний вплив низки вагомих факторів (змінні маса, жорсткість, тертя тощо) не наведено. Таким чином, існуючі універсальні методи розрахунку віброударних систем потребують подальшого розвитку, тому виникає доцільність їх удосконалення, зокрема врахування змінної жорсткості пружних опор та часткового руйнування технологічного вантажу.

Отже, розробка підходів, методів і моделей, які дають змогу отримати адекватну картину динамічної поведінки віброударної системи з урахуванням змінних параметрів, є актуальною науково-практичною задачею, розв'язанню якої і присвячена дана робота.

### Мета роботи

Мета роботи полягає у створенні фізико-математичних моделей для опису та врахування впливу змінних параметрів віброударної системи на динамічні процеси у ній, дослідження динаміки важконавантажених віброударних машин та розробці проектних критеріїв для забезпечення їх надійності та міцності.

### Викладення основного матеріалу

Розв'язувальна система співвідношень може бути побудована на основі рівнянь Лагранжа 2-го роду та закону Ньютона [12-14]. У загальному вигляді:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} = Q_i, \quad i = 1, 2, \dots, n. \quad (1)$$

Зовнішні сили:

$$Q_i^{(1)} = -\frac{\partial \Pi^*}{\partial q_i} + Q_i^*. \quad (2)$$

Внутрішні сили:

$$Q_s^{(2)} = -\frac{\partial \Pi^{**}(q)}{\partial q_s} + \sum_{k \neq s} Q_{sk}^{**}(q, \dot{q}). \quad (3)$$

Сили тертя:

$$Q_m^{***} = Q_m^e + Q_m^i. \quad (4)$$

Потенційну енергію системи можна записати у вигляді  $\Pi = \Pi^* + \Pi^{**}$ , тоді

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} = Q_i^* + Q_i^{**} + Q_i^{***}, \quad (5)$$

або

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_i} - Q_i^S(q, \dot{q}) = Q_i^-(t), \quad i = 1, 2, \dots, n, \quad (6)$$

де  $Q^S = Q^L + Q^N$ ,

$Q^-(t)$  – сума зовнішніх активних сил,

$Q^S(q, \dot{q})$  – сумарна сила внутрішньої та зовнішньої взаємодії.

Для більш наочного подання діючих сил рівняння (6) запишемо у матрично-векторному вигляді

$$\mathbf{M} \cdot \ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{K} \cdot \dot{\mathbf{q}} + \mathbf{C} \cdot \mathbf{q} - Q^L(q, \dot{q}) - Q^N(q, \dot{q}) = Q^-(t), \quad (7)$$

де  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{K}$ ,  $\mathbf{C}$  – узагальнені матриці (аналогі матриць мас, демпфування та жорсткості),

$Q^N(q, \dot{q})$  – та частина вектору узагальнених сил, що залежить від  $q$  та  $\dot{q}$ , та має розриви ( $Q^S = Q^L + Q^N$ ) у фазовому просторі змінних  $q, \dot{q}$ .

За відсутності доданку  $Q^N$  рух системи може бути лінеаризовано в околиці точки деякої фазової траєкторії, чого не можна зробити за присутності  $Q^N$ . У цьому полягає принципова відмінність характеру цієї компоненти від традиційної. Для віброударних систем природнім джерелом нелінійності є сила ударної взаємодії. Враховуючи цю принципову особливість віброударних систем, доцільно акцентувати увагу на подання виразів для цих сил у фазовому просторі узагальнених координат та швидкостей  $q$  и  $\dot{q}$ .

Щоб подолати невідповідність руху віброударної системи за апріорно заданими законами  $f_{sk}(q_s - q_l, \dot{q}_s - \dot{q}_l)$  з реальним рухом віброударної системи, що моделюється, розподіли  $f_{sk}(q_s - q_l, \dot{q}_s - \dot{q}_l)$  подаються у вигляді функціонального ряду за координатами  $\zeta_{sk} = (q_s - q_l)$ ,  $\dot{\zeta}_{sk} = (\dot{q}_s - \dot{q}_l)$  з варійованими коефіцієнтами

$$f_{sk}(\zeta_{sk}, \dot{\zeta}_{sk}) = \sum_{p=1}^n \alpha_p^{(sk)} \cdot \varphi_p^{(sk)}(\zeta_{sk}, \dot{\zeta}_{sk}), \quad (8)$$

де  $\alpha_p^{(sk)}$  – шукані коефіцієнти,  $\varphi_p^{(sk)}(\zeta_{sk}, \dot{\zeta}_{sk})$  – базисні функції, ідея застосування яких належить А.В. Грабовському [1].

Співвідношення (8) дає можливість визначити, наприклад, за результатами порівняння розрахункових та експериментальних досліджень, такі  $\alpha_p^{(sk)}$ , які відповідають мінімуму невідповідності реального та розрахункового руху системи  $\alpha_p^{(sk)} = \arg \min \|q^E - q^N, \dot{q}^E - \dot{q}^N\|$ , де індекси  $E$  и  $N$  відповідають зафіксованим експериментально та визначеним за рівняннями руху (1) та (2) розподілам  $q, \dot{q}$  у часі.

Використання рівнянь Лагранжу 2-го роду дає змогу розділити вектор узагальнених сил на складові,

що можуть та не можуть бути лінеаризовані. Для опису руху системи зі змінною масою використовуються рівняння на основі закону Ньютона, а схема процесу взаємодії віброударної машини з технологічним вантажем наведена на рис. 1:

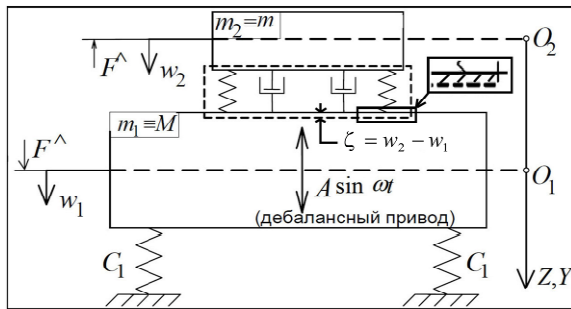


Рис. 1 – Схема процесу взаємодії віброударної машини з технологічним вантажем

$$\begin{cases} -m_1 \ddot{w}_1 + m_1 g + F^{\wedge}(\zeta, \dot{\zeta}) - C_1 w_1 - A \sin \alpha t = 0, \\ m_2 \ddot{w}_2 - m_2 g + F^{\wedge}(\zeta, \dot{\zeta}) = 0. \end{cases} \quad (9)$$

де  $w_1, w_2$  – узагальнені координати 1-го та 2-го тіл;

$F^{\wedge}(\zeta, \dot{\zeta})$  – сила ударної взаємодії, що залежить

від зближення та швидкості зближення тіл;

$C$  – жорсткість пружних опор.

Традиційно, характер зміни маси у часі задається штучною залежністю, отриманою експериментально чи виведеною емпірично [2]. Недоліком такого підходу є те, що доволі часто достатньо складно отримати інформацію про якісний та кількісний характер цієї залежності для реальних процесів, але він дозволяє проводити моделювання змінної маси у першому наближенні. У роботі пропонується ввести функцію  $m_2 = m_2(t)$ , залежну від часу за тим чи іншим законом. З експериментів, проведених на реальних вибивних машинах, відомо, що у ході вибивки технологічний вантаж може втрачати як до 50% маси, так і більше (залежно від виду виробу), що пропонується моделювати зменшенням маси тіла, яка відповідає технологічному вантажу у системі диференціальних рівнянь віброударної системи, двічі.

Характер зміни маси у наближенні описується лінійною  $m_2(t) = m_2^0(1 - t/\tau) + m_2^k$  або кусково-лінійною функцією:

$$m_2(t) = m_2^0 - \frac{m_2^0 - m_2^k}{\tau} \cdot t, \quad t \leq t^*; \quad (10)$$

$$m_2(t) = m_2^k - \frac{m_2^k - m_2^0}{\tau - t^*} \cdot (t - t^*), \quad t \geq t^*, \quad (11)$$

де  $m_2^0$  – початкова маса технологічного вантажу;

$m_2^k$  – кінцева маса технологічного вантажу;

$t^*$  – момент переходу від більш інтенсивного режиму зміни маси до менш інтенсивного;

$\tau$  – тривалість вибивки;

$t$  – поточний момент часу від початку вибивки.

Оскільки швидкість зміни маси та відділення її

фрагментів є низькою, а маса вантажу значно перевищує масу решток, що відділяються, то реактивна складова  $m_2 \dot{w}_2$  також є малою, тому рух системи (рис. 1) описується у вигляді системи рівнянь (9) з нульовими початковими умовами.

Для визначення залежності сили ударної взаємодії  $F(\zeta, \dot{\zeta})$  від зближення технологічного вантажу та корпусу машини  $\zeta = (w_1 - w_2)$ , а також швидкості зближення  $\dot{\zeta}$ , застосована модель, де функція  $F(\zeta, \dot{\zeta})$  визначається на етапі зростання місцевої деформації вантажу у вигляді ряду (12) [1].

Ілюстрація, наведена на рис. 2, демонструє розподіл сили ударної взаємодії (8) у просторі фазових змінних  $\zeta$  та  $\dot{\zeta}$ :

$$\begin{aligned} F(\zeta, \dot{\zeta}) &= F(0,0) + \frac{\partial F}{\partial \zeta} \zeta + \frac{\partial F}{\partial \dot{\zeta}} \dot{\zeta} + \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial \zeta^2} \zeta^2 + \frac{\partial^2 F}{\partial \zeta \partial \dot{\zeta}} \zeta \dot{\zeta} + \\ &+ \frac{1}{2} \frac{\partial^2 F}{\partial \dot{\zeta}^2} \dot{\zeta}^2 + \dots = \alpha_{00} + \alpha_{10} \zeta + \alpha_{01} \dot{\zeta} + \alpha_{20} \zeta^2 + \dots, \end{aligned} \quad (12)$$

де  $\alpha$  – коефіцієнти ряду, що визначаються у ході розрахунково-експериментальних досліджень на відповідних стендах.

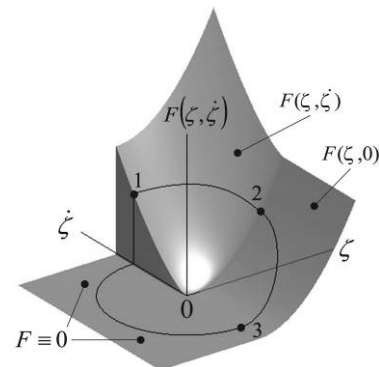


Рис. 2 – Ілюстрація розподілу сили  $F(\zeta, \dot{\zeta})$

Система диференціальних рівнянь (9) для двомасової віброударної системи з параметрами:  $m_1 = 15960$  кг,  $m_2 = 5000$  кг,  $C = 5280$  кН/м,  $H = 127680$  Нс/м,  $A = 293$  кН,  $\nu = 16$  Гц, розв'язується методом Рунге-Кутти за таких початкових умов:  $w_1 = w_2 = 0$ ,  $\dot{w}_1 = \dot{w}_2 = 0$ . Результати наведені на рис. 3, 4.

Як видно з результатів, зміна маси  $m_2(t)$  та закон, за яким вона відбувається, впливають на характер динамічних процесів у віброударній системі, але при цьому не призводять до того, що сталій характер коливань сильно збурюється перехідними процесами, що далі проілюстровано на рис. 5, 6. Це зумовлене (у дослідженому випадку) малою швидкістю зміни маси технологічного вантажу протягом одного циклу ударної взаємодії.

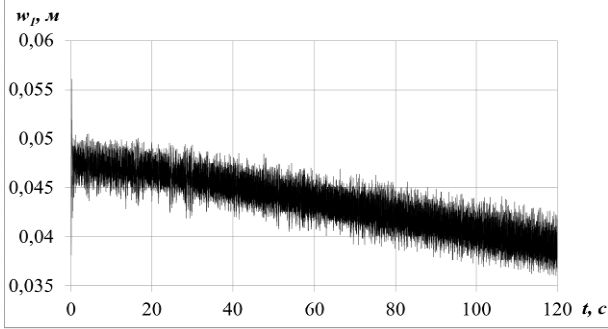


Рис. 3 – Зміна вертикальних переміщень корпусу машини за лінійної залежності  $m_2(t)$

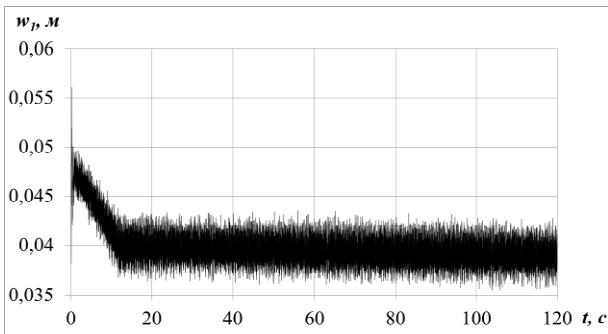


Рис. 4 – Зміна вертикальних переміщень корпусу машини за кусково-лінійної залежності  $m_2(t)$

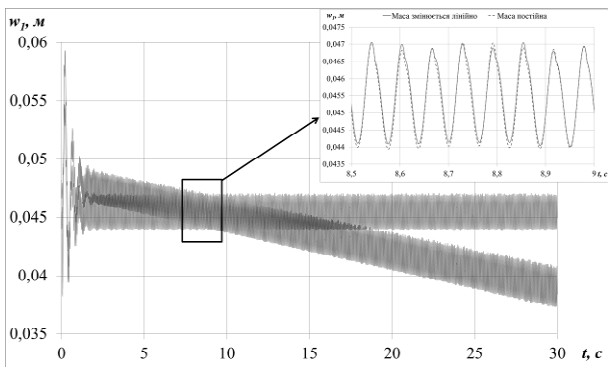


Рис. 5 – Розподіл вертикальних переміщень корпусу віброударної машини при постійній та змінній масах технологічного вантажу

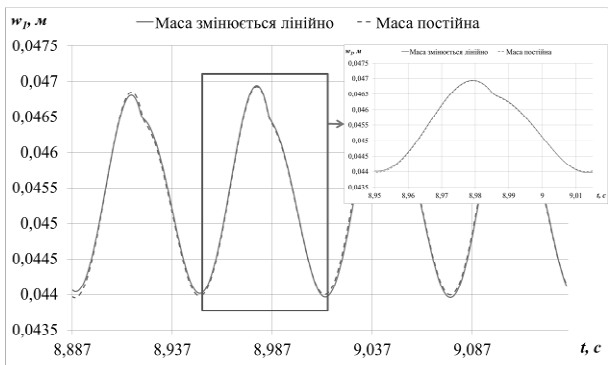


Рис. 6 – Розподіл вертикальних переміщень корпусу віброударної машини при постійній та змінній масах технологічного вантажу

Закон зміни маси не завжди є відомим, а, отже, виникає доцільність у визначенні характеру зміни

маси не апріорно, а в ході опису процесу вибивки. Наприклад, у роботі [3] пропонується ефективність вибивки, а саме руйнування піщано-глиняної форми, визначати через питому енергію удару  $e_0$ . Величина  $e_0$  вимірюється у одиницях довжини та пропорційна висоті, з якої має впасти форма на основу, що знаходиться у стані спокою, щоб отримати потрібну відносну швидкість. Її значення визначається експериментально і залежить від низки факторів.

У даній роботі пошук величини втраченої маси в ході одного удару пропонується проводити через зв'язок з енергією, що дисипується при ударі [4]. Таким чином, характер зміни маси технологічного вантажу визначається безпосередньо у ході процесу вибивки та залежить від його умов. Як модельний закон для зміни маси приймемо залежності:

$$dm/dt = -K_e \cdot N; \quad m(0) = m_0 \quad (13)$$

$$N = \frac{dE(w_1, w_2, \dot{w}_1, \dot{w}_2)}{dt} \quad (14)$$

де  $K_e$  - це коефіцієнт, що визначається експериментально (інтегрально відображає властивості грудки та умови її виготовлення),

$N$  - потужність дисипованої за удар енергії  $E$ .

Проведене порівняння з попереднім розрахунковим випадком, у якому маса змінюється за лінійним законом ( $m(E)$  - зміна маси залежно від дисипованої енергії,  $m(t)$  - зміна маси за лінійним законом) (рис. 7, 8).

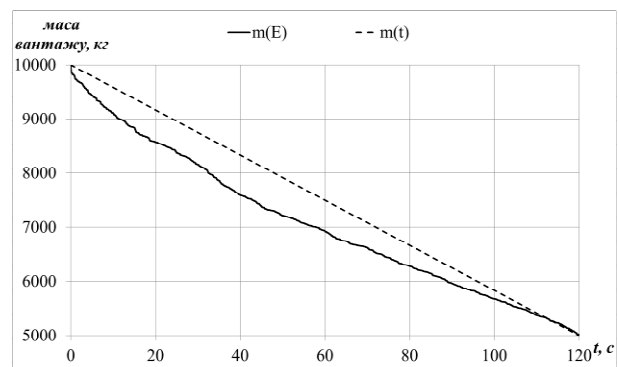


Рис. 7 – Зміна маси на інтервалі в 120с

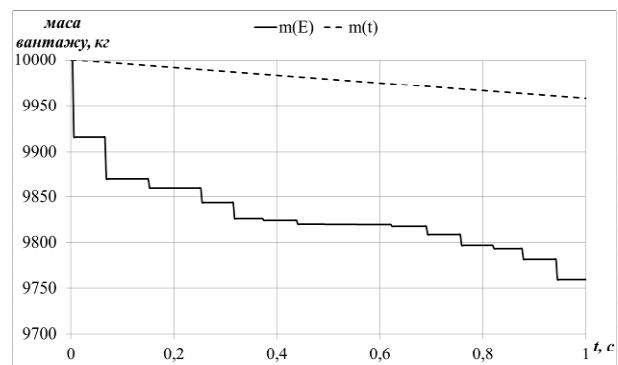


Рис. 8 – Зміна маси на інтервалі в 1с

Загальний характер процесу для обох випадків є

подібним, хоча і спостерігаються незначні відмінності (зокрема, на початку процесу вибивки, що відповідає перехідним процесам).

Одержані результати моделювання динаміки віброударних машин підтверджують, що більш коректним для врахування впливу нестационарних процесів є опис, що базується на використанні величини енергії дисипації.

Відомо, що ще одним елементом системи, який може мати значний вплив на динаміку, є жорсткість пружних опор та їх конструктивне виконання, оскільки серед конструктивних рішень існують як одинарні, так і подвійні пружини, пружна характеристика яких може мати нелінійний характер [5, 10-11].

У цьому випадку у розрахунковій схемі з'являється нова компонента додаткової жорсткості  $C_{add}$  (рис. 1). Таким чином, у рівняннях руху (9) при  $w_1 > A_{kr}$ , де  $A_{kr} = l_1 - l_2$  ( $l_1$  та  $l_2$  довжини більшої та меншої пружин), присутня додаткова жорсткість пружини. Якщо умова  $w_1 > A_{kr}$  не виконується, то  $C_{add} = 0$ . На рис. 9 представлені переміщення віброударної машини та її фазовий портрет для випадку, коли пружні опори конструктивно виконані у вигляді здвоєних пружин.

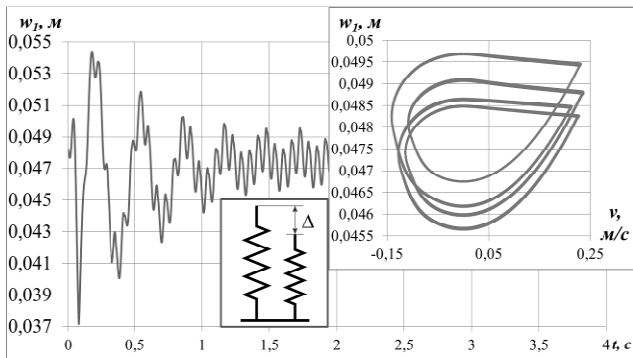


Рис. 9 – Переміщення корпусу віброударної машини та фазовий портрет для випадку, коли пружні опори конструктивно виконані у вигляді здвоєних пружин

Досліджено вплив зміни жорсткості пружин та величини різниці у довжині між основною та додатковою пружинами на характер коливань для випадку здвоєних пружин. Отримані характерні фазові портрети та розподіл зміни узагальненої координати  $w_1$  у часі, що представлені на рис. 10 (вздовж осі  $x$  - швидкість, вздовж осі  $y$  - переміщення). Встановлено, що в залежності від параметрів реалізуються різноударні субгармонійні режими кратністю 3 та 4, при цьому зміна довжини додаткової пружини має більш вагомий вплив на зміну кратності режиму коливань, ніж зміна жорсткості.

У віброударних машинах сила ударної взаємодії є домінуючим джерелом навантажень на корпус, а реалізація субгармонійних режимів призводить до її зростання. Розподіл сили ударної взаємодії у часі для субгармонійних режимів наведений на рисунку 11.

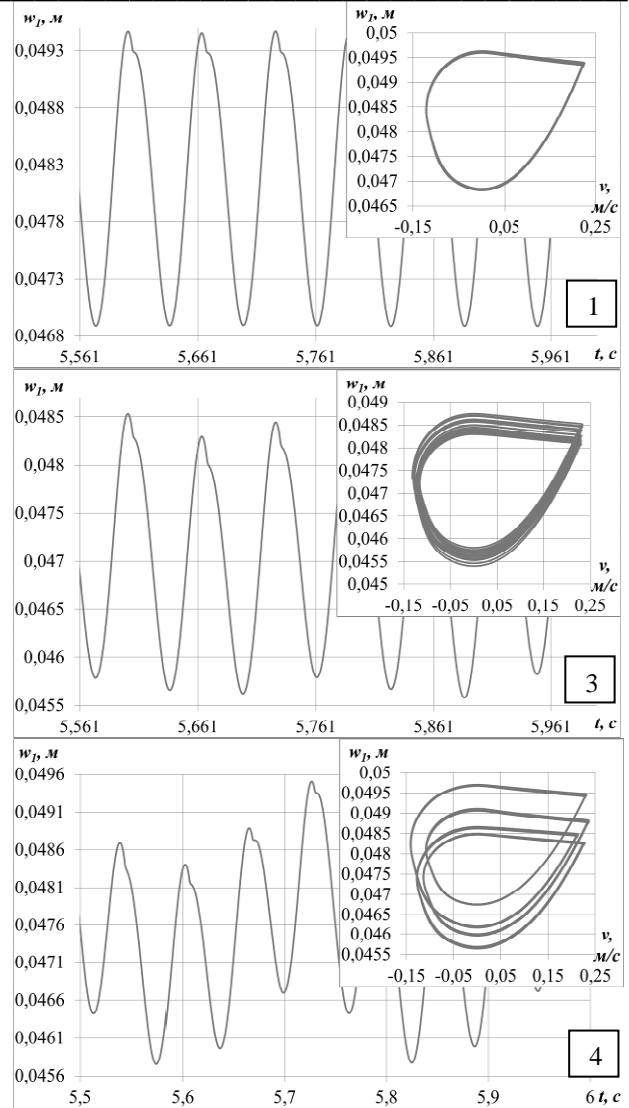


Рис. 10 – Характерні фазові портрети різних режимів кратності (1, 3, 4) та розподіл коливань у часі

Для оцінки впливу субгармонійних режимів на силу ударної взаємодії вводиться коефіцієнт нерівномірності  $\sigma(\Delta, \Delta C) = F_{\max}(\Delta, \Delta C) / F_{\max}(0, 0)$  (де  $\Delta = A_{kr}$ ,  $\Delta C = C_{add}$ ,  $F_{\max}(0, 0)$  - сила ударної взаємодії при гармонійному режимі,  $F_{\max}(\Delta, \Delta C)$  - сила ударної взаємодії при субгармонійних режимах різної кратності), що дає уявлення про рівень динамічного навантаження від ударних сил. Він має наступний вигляд у числовому вираженні:  $\sigma = F_{\max}^1 / F_{\max}^1 = 1$ ,  $\sigma = F_{\max}^3 / F_{\max}^1 \approx 1.12$ ,  $\sigma = F_{\max}^4 / F_{\max}^1 \approx 1.07$ .

Таким чином, субгармонійні коливання з режимом кратності 3 є найбільш небезпечними, оскільки у них спостерігається найбільше зростання сили ударної взаємодії відносно гармонійних коливань.

Характер зміни амплітуди коливань залежно від параметрів  $C_{add}$  та  $A_{kr}$  через безрозмірний параметр  $A_N = A_c / A_p$ , де  $A_c$  - найбільша амплітуда коливань при усталеному режимі для кожного з наборів  $C_{add}$  та  $A_{kr}$ ,  $A_p$  - амплітуда коливань для періодичного

(гармонічного) режиму, представлений на рис. 12. З нього видно, що зміна жорсткості пружних опор  $C_{add}$  має менший вплив на характер динамічного процесу порівняно зі зміною зазору  $A_{kr}$  (різниця у довжині між пружинами).

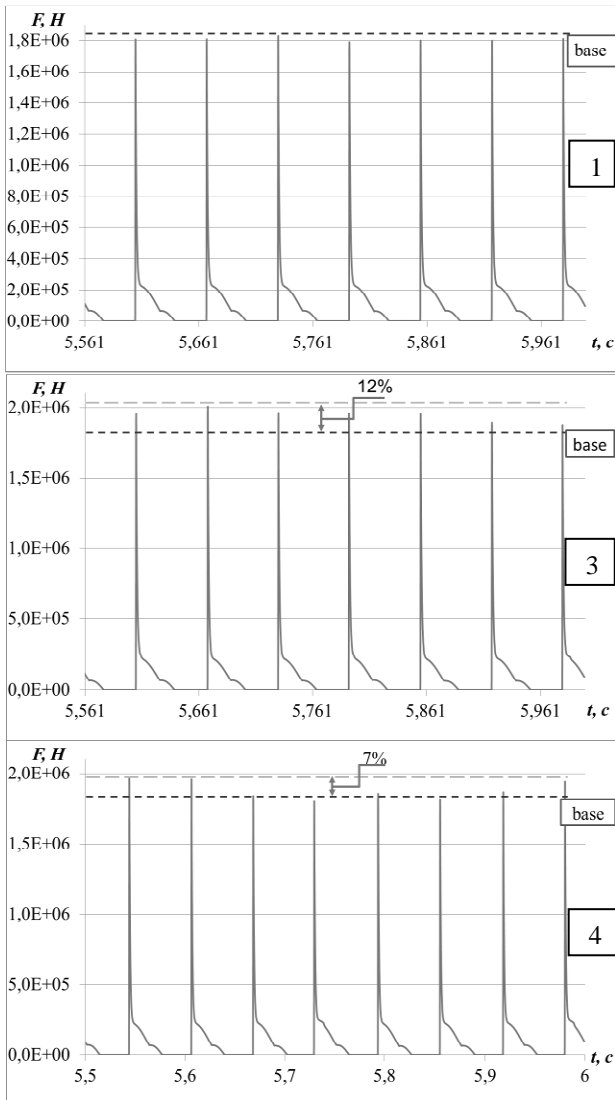


Рис. 11 – Розподіл сили ударної взаємодії у часі для різних режимів кратності (1, 3, 4)

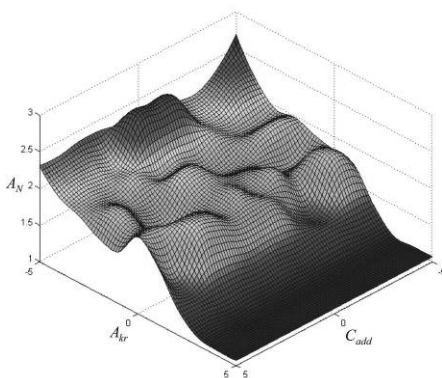


Рис. 12 - Характер зміни амплітуди коливань в залежності від параметрів  $C_{add}$  та  $A_{kr}$

характеризується наявністю перехідних та усталених процесів у робочому циклі. Для перехідних режимів властиві значні зміни параметрів системи, наприклад, на початку взаємодії, коли вантаж потрапляє на машину та починається його вибивка. У подальшому перехідний режим переходить в усталений, що прискорюється за рахунок наявності у системі в'язкого тертя, тобто стабілізуючої складової. Зважаючи на наявність субгармонійних режимів та можливість реалізації ударних резонансів вважається доцільним формування додаткових проектних критеріїв для корпусів віброударних машин.

Традиційні критерії передбачають переважно відлаштування спектру власних частот коливань від частоти зовнішнього збудження [6] та у більш рідких випадках – від частот, на яких можлива реалізація ударних резонансів [7, 8].

Пропонуються критерії відлаштування від резонансних режимів, що розроблені на основі оцінки динаміки віброударних машин, зокрема, обмеження за ударним резонансом:

$$\omega_D^{(i)} > \omega^*, \omega_D^{(i)} \neq j \cdot \omega^*, \quad (15)$$

де  $\omega_D^{(i)}$  - «деформаційні» частоти коливань корпусу вібромашини;

$\omega^*$  - частота збудження;

$i$  - номер власної частоти  $\omega_D$ ;

$j$  - коефіцієнт кратності ударного резонансу).

У частотній області ці умови графічно представлені на рис. 13.

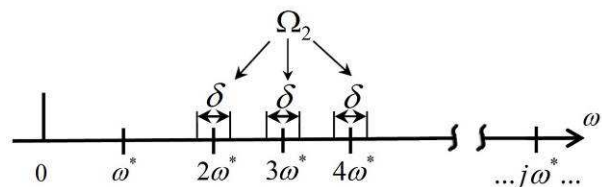


Рис. 13 - Область обмежень за критерієм відлаштування від резонансних режимів

Тут  $\Omega_2$  - область, що визначається за умовами ударного резонансу.

Тоді критерій  $\omega_D^{(i)} \in \Omega_1, \omega_D^{(i)} \notin \Omega_2, i=1,2,\dots$  для конкретної машини приймає вигляд (4) і представлений графічно на рис. 14:

$$\omega_D^{(i)} \neq j \cdot \omega^* / 4, \quad i=1,2,\dots \quad (16)$$

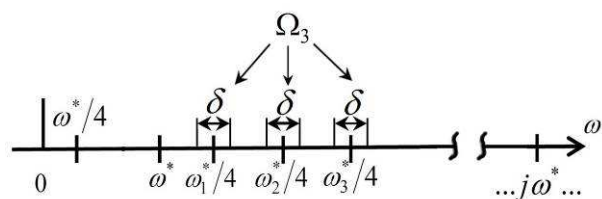


Рис. 14 – Додаткові критерії недопущення ударних резонансів при наявності субгармонійних режимів роботи віброударної машини

в область  $\Omega_3$ :  $\omega_D^{(i)} \notin \Omega_3$ , де  $\Omega_3$  - об'єднання областей, що представляють собою інтервали, згруповані навколо частот  $j \cdot \omega^*/4$ , шириною  $\pm \delta$ . При цьому  $\Omega_2 \subset \Omega_3$ , тоді  $\Omega_4 = \Omega_3 - \Omega_2$ .

Для удосконалення конструкції віброударної машини з урахуванням обмежувальних критеріїв розроблений метод для пошуку таких значень конструктивних параметрів, які забезпечують відлаштування від кратних (дольних) частот. У ньому вводить поняття «безпечної» частоти

$$\omega_N^S : j \cdot \omega_N^S = (i \cdot \omega^* + (i+1) \cdot \omega^*) / 2, \quad j = 1..n. \quad (17)$$

Оскільки відлаштування відбувається здебільшого за низкою частот, то оптимальне поєднання значень параметрів пропонується визначати через мінімум функції, що характеризує наближеність до «безпечної» частоти

$$K = \sum_{i=1}^n |i \cdot \omega^* - i \cdot \omega_N^S|, \quad K \rightarrow \min. \quad (18)$$

На рис. 15 показаний вигляд функції  $K$  (18).

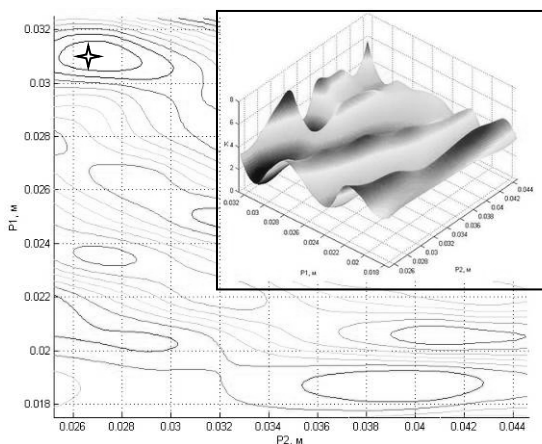


Рис. 15 - Функція  $K$  у 1-му наближенні

У ході дослідження оперували конструктивними параметрами з номіналами  $P_1 = 0,0192$  м (товщина стінки корпусу),  $P_2 = 0,036$  м (товщина щоки) (рис. 16).

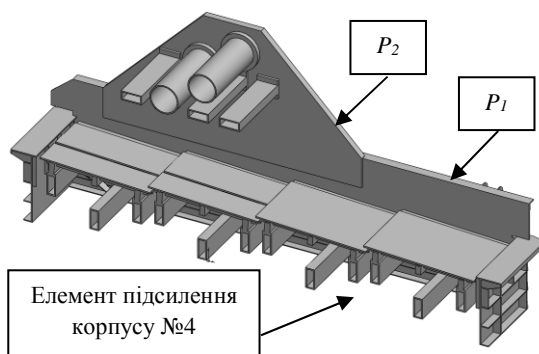


Рис. 16 – Варійовані параметри та елемент підсилення корпусу, у якому виникають найбільші напруження

Пошук мінімуму відбувається за допомогою методу координатного спуску, а функція набуває

мінімуму за таких значень параметрів -  $P_1 = 0,03124$  м та  $P_2 = 0,027653$  м, тобто вони забезпечують відлаштування корпусу віброударної машини від набору кратних (дольних) частот.

Порівняння спектрів власних частот коливань базової та удосконаленої конструкції корпусу віброударної машини наведено на рисунку 17.

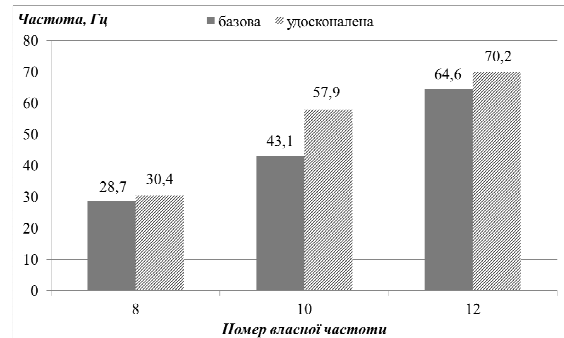


Рис. 17 – Порівняння спектрів власних частот

Зміна конструктивних параметрів та субгармонійні режими призводять до зміни напружено-деформованого стану конструкції, тому її доцільно дослідити і за цим аспектом. Дослідження проводилися за допомогою методу скінченних елементів. Розподіл напружень у корпусі віброударної машини наведений на рис. 18. Найбільші напруження виникають в елементі підсилення корпусу (елемент №4, рис. 16), а їх розподіл наведений на рис. 19.

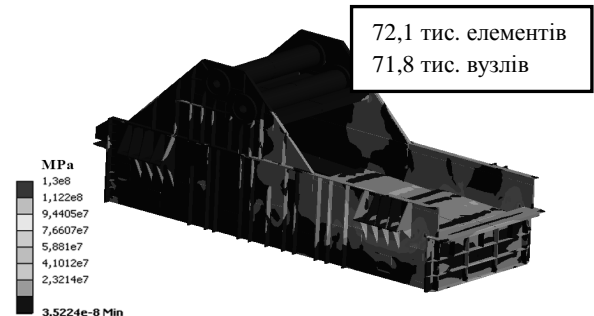


Рис. 18 – Розподіл напружень за Мізесом у корпусі віброударної машини

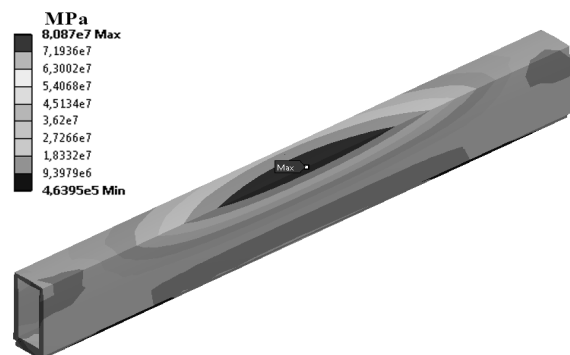


Рис. 19 – Розподіл напружень за Мізесом в елементі підсилення корпусу (елемент №4)

Найбільші напруження виникають у елементі підсилення корпусу («балка №4», рис. 16). Зростання становить близько 5%, при цьому рівень допустимих напружень не перевищується, а локалізація зони



максимальних напружень не змінюється. Порівняльні розподіли напружень за їх зміною у часі представлені на рис. 20.

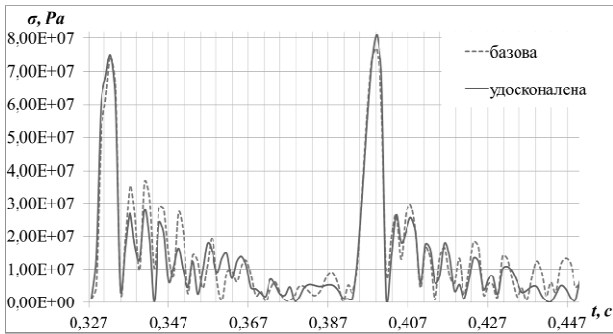


Рис. 20 – Порівняння зміни напружень у часі для базової та удосконаленої конструкцій

Як видно з порівняння, розподіл напружень не зазнав суттєвих змін, а зростання максимальних напружень зумовлено тим, що враховувався ефект від субгармонійних коливань. Таким чином, із урахуванням сформульованих критеріальних обмежень створена удосконалена модель конструкції віброударної машини, що задовольняє умовам відлаштування від резонансних режимів та умовам міцності.

Для оцінки адекватності та точності створених математичних та геометричних тривимірних моделей було проведено порівняння результатів числового експерименту з результатами натурних випробувань. Дослідження проводилось на базі ПрАТ «АзовЕлектроСталь» за допомогою методу акселерометрії. Як інформаційні показники бралися віброприскорення, віброшвидкості та вібропереміщення. Для визначення вібрацій встановлені датчики прискорень акселерометри ADXL150 (схема розташування – на рис. 21), на базі яких виготовлені давачі ПДУ-50.

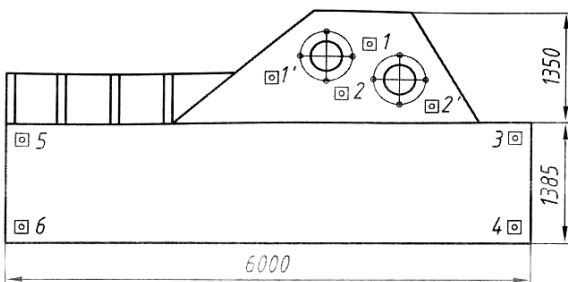


Рис. 21 – Схема розташування датчиків на корпусі вибивної машини

Порівняння результатів натурального та числового експериментів за віброприскореннями наведено на рис. 22.

Похибка для віброприскорень:  $a_e \approx 9g$ ,

$$a_N \approx 10g, \delta_a = \frac{|a_N - a_e|}{|a_N|} \cdot 100\% \approx 10\%.$$

Таким чином, за допомогою експериментальних досліджень підтверджені

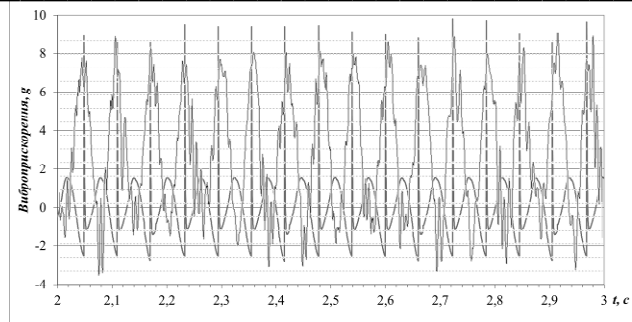


Рис. 22 – Порівняння віброприскорень, отриманих у ході числового розрахунку та натурального експерименту: тривалість одна секунда, місце 2, вісь у (пунктир – числовий розрахунок, суцільна лінія – натурний експеримент)

результати числових досліджень, що свідчить про адекватність та точність математичних моделей, що використані в роботі. Існуюча похибка становить близько 10%, а її вплив на загальний характер процесів та тенденції їх зміни оцінюється як задовільний. Також удосконалена віброударна машина продемонструвала в ході експерименту та подальшої експлуатації відповідність основним проектним та експлуатаційним вимогам.

## Висновки

Робота присвячена розв'язанню науково-практичної задачі аналізу динамічних процесів у віброударних машинах із урахуванням впливу змінної маси технологічного вантажу та нелінійної жорсткості пружних опор. Із урахуванням отриманих результатів розроблені рекомендації з проектування віброударних машин. Основні наукові та практичні результати виконаної роботи наступні:

1. Запропоновано та апробовано підхід для опису характеру зміни маси технологічного вантажу в залежності від дисипованої енергії. Встановлено, що опис зміни маси технологічного вантажу залежно від значення дисипованої енергії є більш адекватним, хоча й результати здебільшого суттєво не відрізняються від результатів, що отримуються при використанні постульованого заздалегідь закону. Показано, що той характер зміни маси, який властивий досліджуваному технологічному вантажу (грудка з відливкою крупного вагонного литва), та умови вибивки, зокрема на ділянці технологічної лінії для вибивки вагонного литва, не призводять до збудження відчутних перехідних процесів.

2. Проведені дослідження, які показали, що використання як пружних опор здвоєних пружин може призводити до реалізації субгармонійних режимів, які характеризуються підвищеною силою ударної взаємодії порівняно із гармонійними. Проведені багатоваріантні дослідження, в ході яких встановлено, що можна впливати на реалізацію субгармонійних режимів, а також на їх кратність, за допомогою підбору різниці між довжинами пружин (величина зазору до того, як спрацює друга пружина) та їх жорсткостями. При цьому встановлено, що для машини, яка досліджується, зміна різниці



довжин має більш вагомий вплив. За результатами дослідження субгармонійних режимів визначено, що у цій віброударній системі сила ударної взаємодії зростає до 12%, що має бути враховано на етапі проектування як вагомий фактор.

3. Запропоновані підходи і методики використані для аналізу конструкції машини для вибивки литва на предмет її схильності до резонансу, через наближеність власних частот до кратних (дольних) частот зовнішнього збудження. Визначений спектр власних частот коливань та частоти, на яких потенційно можливим є виникнення резонансу. Розроблений та апробований метод для відлаштування шляхом максимізації норми віддаленості від небезпечних частот. Отримані значення параметрів, які забезпечують відлаштування корпусу віброударної машини, та побудована модель удосконаленої машини.

4. На базі корпусу удосконаленої машини з рекомендованими параметрами проведене дослідження напружено-деформованого стану корпусу віброударної машини з урахуванням сили ударної взаємодії, що зростає через можливу реалізацію субгармонійних режимів. Числові дослідження продемонстрували незначне зростання напружень у корпусі та підрешітних балках, однак при цьому вони зберігаються в допустимих межах до 100 МПа. Таким чином, удосконалена конструкція корпусу задовольняє вимогам міцності.

5. Порівняльний аналіз результатів числового та натурального експериментів виявив задовільну збіжність між результатами, що підтверджує точність та адекватність проведених числових досліджень, похибка числового моделювання - близько 10%. Удосконалені машини, параметри яких визначені на основі рекомендацій за результатами досліджень, успішно пройшли дослідну експлуатацію і на теперішній час працюють у складі автоматизованих ліній практично безперервно протягом трьох місяців з наступним оглядом і поточним ремонтом, у той час як машини у попередніх варіантах виконання мали в 2÷3 рази менший міжремонтний термін.

В подальшому планується провести дослідження впливу інших чинників на характер поведінки віброударної системи.

#### Список літератури

1. **Грабовский, А. В.** Ударное взаимодействие и динамические процессы в виброударных машинах с частичным разрушением технологического груза: дис. кандидата техн. наук: 05.02.09 / **Грабовский Андрей Владимирович.** – Харьков. – 2010. – 181 с.
2. **Ольшанский, В. П.** Резонансные колебания осциллятора линейно-переменной массы // **В. П. Ольшанский, С. В. Ольшанский** // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2013. – № 58 (1031). – С. 157-162.
3. **Горский, А. И.** Расчет машин и механизмов автоматических линий литейного производства. – М. Машиностроение. – 1978. – 552 с.
4. **Костенко, Ю. В.** Переменная масса элементов в виброударных системах: модели и численные результаты / **Ю. В. Костенко** // *Вісник Національного*

*технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків: НТУ „ХПІ”. – 2015. – №43(1152). – С. 37-41.

5. **Костенко, Ю. В.** Влияние переменной жесткости связей на характер динамических процессов в виброударных системах: модели и численные результаты / **Ю. В. Костенко** // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2014. – № 7 (1050). – С. 212-216.
6. **Барчан, Є. М.** Удосконалення методів розрахунку та конструкції вибивної транспортуючої машини для формувальних ліній крупного литва: Дис. канд. техн. наук: 05.02.02 / **Барчан Євген Миколайович.** – Маріуполь. – 2008. – 178 с.
7. **Карапейчик, И. Н.** Динамика виброударных машин при импульсном нагружении / **И. Н. Карапейчик, И. В. Артемов, А. В. Грабовский, Н. А. Ткачук** // *Актуальные вопросы современной техники и технологии: Сб. докладов V-й Междунар. научн. конф.* – Липецк: Издательский центр «Гравис». – 2011. – С. 54-66.
8. **Артемов, И. В.** Динамика систем с конечным числом степеней свободы при импульсном нагружении / **И. В. Артемов** // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – №51. – С. 23-45.
9. **Rong Hai-wu** Subharmonic response of single-degree-of-freedom linear vibroimpact system to narrow-band random excitation / **Rong Hai-wu, Wang Xiang-dong, Luo Qi-zhi, Xu Wei, Fang, Tong** // *Applied mathematics and mechanics-english edition.* – 2011. – Vol. 32, Is. 9. – P. 1159-1168. – doi:10.1007/s10483-011-1489-x.
10. **Bazhenov, V. A.** Modification of the One-Parameter numerical continuation method for analysis of the dynamics of vibroimpact systems / **Bazhenov V.A., Pogorelova O.S., Postnikova T. G.** // *Strength of materials.* – 2014. – Vol. 46, Is. 6. – P. 801-809. – doi:10.1007/s11223-014-9614-y.
11. **Bazhenov, V. A.** Change of impact kind in vibroimpact system due its parameters changing / **Bazhenov V. A., Pogorelova O. S., Postnikova T. G.** // *2nd International Conference on Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis (CSNDD)* (May 19-21, 2014, Agadir, Morocco). – MATEC Web of Conferences. – 2014. – Vol. 16. – doi:10.1155/2013/485676.
12. **Ritto, T. G.** A new measure of efficiency for model reduction: Application to a vibroimpact system / **T. G. Ritto, F. S. Buezas, Rubens Sampaio** // *Journal of Sound and Vibration.* – 2011. – Vol. 330, Is. 9. – P. 1977-1984. – doi:10.1016/j.jsv.2010.11.004.
13. **Hill, T. L.** Interpreting the forced responses of a two-degree-of-freedom nonlinear oscillator using backbone curves / **T. L. Hill, A. Cammarano, S. A. Neild, D. J. Wagg** // *Journal of Sound and Vibration.* – 2015. – Vol. 349. – P. 276-288. – doi:10.1016/j.jsv.2015.03.030.
14. **Julián M. Londoño** Identification of backbone curves of nonlinear systems from resonance decay responses / **Julián M. Londoño, Simon A. Neild, Jonathan E. Cooper** // *Journal of Sound and Vibration.* – 2015. – Vol. 348. – P. 224-238. – doi:10.1016/j.jsv.2015.03.015.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Grabovskyy, A. V.** Udarnoe vzaimodejstvie i dinamicheskie processy v vibroudarnyh mashinah s chastichnym razrusheniem tehnologicheskogo gruzha [Shock interaction and dynamic processes in vibro machines with partial destruction of the load process], dis. kandidata tehn. nauk: 05.02.09, Kharkiv, 2010, 181 p.

2. **Ol'shanskij, V. P., Ol'shanskij, S. V.** Rezonansnye kolebanija osciljatora linejno-peremennoj massy [Resonant vibration of the oscillator linearly variable mass]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu „Kharkivs'kyu politekhnichnyy instytut”* [Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'], Kharkiv: NTU „KhPI”, 2013, **58**(1031), 157-162.
3. **Gorskij, A. I.** Raschet mashin i mehanizmov avtomaticheskikh linij litejnogo proizvodstva [Calculating machines and automatic lines of foundry machinery], Moscow, Mashinostroenie, 1978, 552 p.
4. **Kostenko, Iu. V.** Peremennaja massa jelementov v vibroudarnyh sistemah: modeli i chislennye rezul'taty [Variable weight items in the vibro-impact systems: models and numerical results]. *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu „Kharkivs'kyu politekhnichnyy instytut”* [Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'], Kharkiv: NTU „KhPI”, 2015, **43**(1152), 37-41.
5. **Kostenko, Iu. V.** Vlijanie peremennoj zhestkosti svyazey na karakter dinamicheskikh processov v vibroudarnyh sistemah: modeli i chislennye rezul'taty [Effect of variable stiffness links on the nature of dynamic processes in vibro-impact systems: models and numerical results], *Visnyk Natsional'noho tekhnichnoho universytetu „Kharkivs'kyu politekhnichnyy instytut”* [Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'], Kharkiv: NTU „KhPI”, 2014, **7**(1050), 212-216.
6. **Barchan, Ye. M.** Udoskonalennya metodiv rozrakhunku ta konstruktsiyi vybyvnoyi transportuyuchoyi mashyny dlya formuval'nykh liniy krupnogo lytva [Improved methods of calculation and design stamped transporting machines for molding large casting lines]: Dys. kand. tekhn. nauk: 05.02.02, Mariupol', 2008, 178 p.
7. **Karapejchik, I. N., Artemov, I. V., Grabovskij, A. V., Tkachuk, N. A.** Dinamika vibroudarnyh mashin pri impul'snom nagruzhennii [The dynamics of vibro trucks under impact loading]. *Aktual'nye voprosy sovremennoj tehniki i tehnologii: Sb. dokladov V-j Mezhdunar. nauchn. Konf* [Actual problems of modern techniques and technology: Coll. Reports V-th Intern. Scien. conf]. (Lipeck, 29 oktjabrja 2011), Lipeck: Izdatel'skij centr «Gravis», 2011, 54-66.
8. **Artemov, I. V.** Dinamika sistem s konechnym chislom stepenej svobody pri impul'snom nagruzhennii [Dynamics of systems with a finite number of degrees of freedom under impact loading]. *Bulletin of the National Technical University 'Kharkiv Polytechnic Institute'*, Kharkiv: NTU „KhPI”, 2011, **51**, 23-45.
9. **Rong Hai-wu, Wang Xiang-dong, Luo Qi-zhi, Xu Wei, Fang, Tong** Subharmonic response of single-degree-of-freedom linear vibroimpact system to narrow-band random excitation. *Applied mathematics and mechanics-english edition*, 2011, **9**(32), 1159-1168, doi:10.1007/s10483-011-1489-x.
10. **Bazhenov, V. A., Pogorelova, O. S., Postnikova, T. G.** Modification of the One-Parameter numerical continuation method for analysis of the dynamics of vibroimpact systems. *Strength of materials*, 2014, **6**(46), 801-809, doi:10.1007/s11223-014-9614-y.
11. **Bazhenov, V. A., Pogorelova, O. S., Postnikova, T. G.** Change of impact kind in vibroimpact system due its parameters changing. *2nd International Conference on Structural Nonlinear Dynamics and Diagnosis (CSNDD)* (May 19-21, 2014, Agadir, Morocco), MATEC Web of Conferences 2014, **16**, doi:10.1155/2013/485676.
12. **Ritto, T. G., Buezas, F. S., Rubens Sampaio** A new measure of efficiency for model reduction: Application to a vibroimpact system. *Journal of Sound and Vibration*, 2011, **9**(330), 1977-1984, doi:10.1016/j.jsv.2010.11.004.
13. **Hill, T. L., Cammarano, A., Neild, S. A., Wagg, D. J.** Interpreting the forced responses of a two-degree-of-freedom nonlinear oscillator using backbone curves. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, **349**, 276-288, doi:10.1016/j.jsv.2015.03.030.
14. **Julián M. Londoño, Simon A. Neild, Jonathan E. Cooper** Identification of backbone curves of nonlinear systems from resonance decay responses. *Journal of Sound and Vibration*, 2015, **348**, 224-238, doi:10.1016/j.jsv.2015.03.015.

#### Відомості про авторів ( About the Authors)

**Костенко Юрій Вікторович** – молодий науковий співробітник, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», кафедра «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів та машин» м. Харків; тел.: (057) 707-69-01; e-mail: kostenko.yuriy@gmail.com.

**Kostenko Iurii Viktorovich** – junior researcher, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", the department "The theory and computer aided design of mechanisms and machines", Kharkiv, phone: +38 (057) 707-69-01; e-mail: kostenko.yuriy@gmail.com.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:

**Костенко, Ю. В.** Динамічні процеси у віброударних системах зі змінними параметрами / **Ю. В. Костенко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 45-54. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.07.

Please cite this article as:

**Kostenko, Iu.** Dynamic processes in vibroimpact systems with variable parameters. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 45-54, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.07.

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Костенко, Ю. В.** Динамические процессы в виброударных системах с изменяющимися параметрами / **Ю. В. Костенко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 45-54. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.07.

**АННОТАЦИЯ** Изложен новый подход к учету влияния переменной массы технологического груза на характер динамических процессов в виброударной системе. Установлено, что по причине нелинейной жесткости упругих опор и зависимо от их конструктивного исполнения, возможна реализация субгармонических режимов. Сформулированы критерии для отстройки от резонанса, который может возникнуть на кратных (дольных) частотах возбуждения. Создана усовершенствованная конструкция корпуса виброударной машины.

**Ключевые слова:** динамические процессы в машинах, прочность машин, виброударная система, вибромашина, переменная масса, прикладная теория колебаний, субгармонический режим.

Надійшла (received) 19.05.2016

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ОРТОТРОПНИХ ПРУЖНИХ І В'ЯЗКОПРУЖНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛАСТОВИМІРНИХ ТЕКСТИЛЬНО АРМОВАНИХ КОМПОЗИТІВ

**О. О. ЛАРИН<sup>\*</sup>, Ю. А. ПЕТРОВА**

*Кафедра динаміки та міцності машин, Національний технічний університет «Харківський Політехнічний Інститут», Харків, УКРАЇНА*

*\*email: AlexeyA.Larin@gmail.com*

**АНОТАЦІЯ** Стаття присвячена дослідженню пружних і в'язкопружних властивостей еластовимірних композиційних матеріалів шляхом проведення експериментальних випробувань. Дані композити мають односпрямоване армування текстильним кордом. Експерименти проводилися в різних напрямках (повздожне і поперечне щодо корду). Зразки циклічно навантажувались з різними амплітудами деформацій. Це дозволило оцінити гістерезисна втрати, а також початкові модулі пружності та модулі втрат матеріалу в стабілізованому стані. Модуль втрат оцінюється в залежності від амплітуди деформації в різних напрямках.

**Ключові слова:** еластовимірні композити, пружні і в'язкопружні властивості, експериментальне дослідження

## EXPERIMENTAL OBSERVATIONS OF ORTHOTROPIC ELASTIC AND VISCOELASTIC CHARACTERISTICS OF THE ELASTOMERIC TEXTILE REINFORCED COMPOSITES

**O. O. LARIN<sup>\*</sup>, Ju. A. PETROVA**

*Dynamics and strength of machines department, National Technical University "Kharkiv Polytechnical Institute", Kharkiv, UKRAINE*

**ABSTRACT** The paper deals with investigation elastic and viscoelastic properties of elastomeric composites by experimental tests. The composites has a textile unidirectional reinforcement. A displacement control load has been posed i.e. fixed values of strains has been set for specimen. Thus, an occurring effort has been measured. Quasi-static loading was applied to specimen. The results are automatically recorded, for each test in real time that gives a possibility to obtain detailed deformation curves of the material. Tests have been carried out in three principal directions: tensile test along reinforcement textile cord, tensile test across the reinforcement, and the test on compression of a plate in the direction perpendicular to the plane of the composite reinforcement.

The experiments have been carried out under a cyclic loading with different amplitudes. The experiments have been conducted with strain sweep 2% and 5%. Engineering evaluation for the average initial modulus for this material has been also defined in each principal direction of the composite.

The available experimental data allows to determine the area of the hysteresis loop by numerical integration for cycles. These results allows to estimate the viscous component of the deformation of rubber-cord composite. Appropriate experimental observations have been carried out with different amplitudes of loading in different directions. Thus, a loss modulus is evaluated depending on strain amplitude in different loading directions.

**Keywords:** elastomeric composites, elastic and viscoelastic properties, experimental observations.

### Вступ

Еластовимірні композити широко використовуються у сучасній інженерній практиці. Велика кількість армованих еластовимірів складається з гумової матриці посиленої текстильними волокнами. Наявність арматури призводить до ортотропії механічних властивостей. Крім того, існує внутрішня локалізація напружено-деформованого стану у відповідних елементах, що ускладнює оцінку їх надійності [1-5].

Проте, теоретичне моделювання надійності, функціональності і довговічності інженерних конструкцій з армованими шарами з композиційних матеріалів неможливе з розглядом їх внутрішньої структури в явному вигляді. Для вирішення подібних

задач використовуються спрощені моделі. При цьому, зазвичай, композитні шари вважаються однорідними з усередненими властивостями, так що особливостями внутрішньої структури нехтують. Тому, визначення усереднених механічних характеристик відповідних матеріалів є актуальною науковою і практичною задачею.

Для армованих еластовимірних композиційних матеріалів пружні і в'язкопружні властивості, а також міцність слід розглядати як ортотропні. Визначення констант ортотропних матеріалів армування композиційних матеріалів можна проводити теоретично за допомогою феноменологічних моделей (наприклад, правило суміші Хелпін-Тсай) [6, 7] або ж вони можуть бути знайдені за допомогою комп'ютерного моделювання, проведеного з

презентативним об'ємом моделі композитів, який в явному вигляді враховує його внутрішню структуру [8]. Іншим способом визначення відповідних характеристик композиційного матеріалу є експериментальні випробування. Нажаль, досить важко визначити всі константи ортотропного матеріалу за допомогою експериментів. Проте, основні характеристики (три основних напрямки) точно можна визначити.

Основною метою роботи є проведення експериментального дослідження для визначення пружних характеристик і параметрів міцності композиційного матеріалу, який складається з гумової матриці і має текстильний односпрямований корд. Випробування були проведені в трьох основних напрямках: випробування на розтягнення уздовж текстильного корду, розтягнення впоперек арматури, а також випробування на стискання пластини в напрямку, перпендикулярному до площини армування.

#### Методологія експериментальних досліджень

Визначення кривих деформування проводилися з використанням спеціалізованого вимірювального комплексу Zwick / Roell Z100. Геометрія зразків відповідає стандартам для механічних випробувань гумоподібних матеріалів і гумо-кордних композитів ISO 527-2 1A.

Зразки мали такі геометричні параметри: фактична товщина:  $10 \pm 0,1$  мм; ширина: 10 мм; довжина робочої частини: 80 мм; Загальна довжина: 150 мм. Товщина зразків мала варіацію 1% через технологічні допуски, які існують у виробництві композитних листів. Інші параметри мають точні значення, тому що всі зразки були отримані шляхом їх вирубування один і тим самим штампом зі стандартним розміром. На рис. 1 показаний схематичне креслення геометрії зразка.

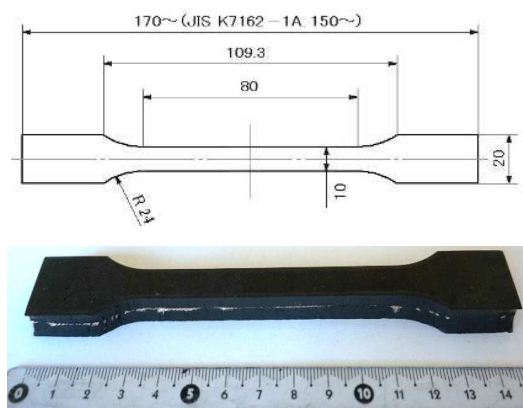


Рис. 1 – Геометрія зразків для випробувань

Зразки були жорстко закріплені за допомогою механічних затискачів, як показано на рис. 2. В якості навантаження задавалося переміщення тобто

фіксовані значення деформацій були встановлені для зразків. За допомогою стандартних датчиків вимірювалися зусилля, які виникали в нижніх затискачах (максимальне зусилля, яке може виміряти дана машина складає  $10 \text{ kN} \pm 0,01 \text{ N}$ ). Навантаження було квазістатичне зі швидкістю деформації 100 %/хв. Результати автоматично записувались для кожного тесту в режимі реального часу кожні 0,1 секунди. В ході випробувань зразки були навантаженні циклічно з фіксованими рівнями деформації, що дозволяє визначати пружні та в'язкопружні властивості таких матеріалів в стабілізованому стані. Кожен експеримент проводили щонайменше 3 рази, щоб перевірити повторюваність результатів. Результати випробувань були отримані в трьох основних напрямках.



Рис. 2 – Фіксація зразків для випробувань в установці

#### Визначення пружних властивостей матеріалу

Для оцінки пружних властивостей стабілізованих матеріалів зразки піддавались циклічному деформуванню з фіксованою амплітудою деформацій. Було проведено 50 циклів. Експерименти було проведено із розмахом деформацій 5 % та 10 %. Інженерна оцінка для початкового усередненого модуля для цього матеріалу 140 МПа (розраховано на деформації на рівні 5%).

Характерні криві деформації, які були отримані в цих тестах, представлені на рис. 3. Результати показують майже лінійну поведінку композиту. Слід зазначити, що мав місце незначний ефект Маліна. У той же час слід підкреслити, що в даному випадку цей ефект не досліджується і всі властивості визначаються для матеріалів в стабілізованому стані.

Так само, як і в попередньому випадку, досліджувались пружні характеристики композиційного матеріалу в напрямку, ортогональному відносно арматури. Експерименти проводилися також із розмахом деформацій 5 % та 10 %. Інженерна оцінка для усередненого початкового модуля для цього матеріалу 11,5 МПа а (розраховано на деформації на рівні 5%). Характерні криві деформації, які були отримані в цих тестах, представлені на рис. 4.

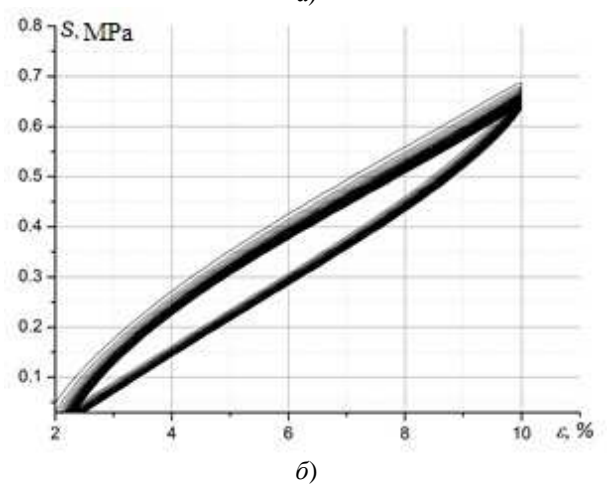
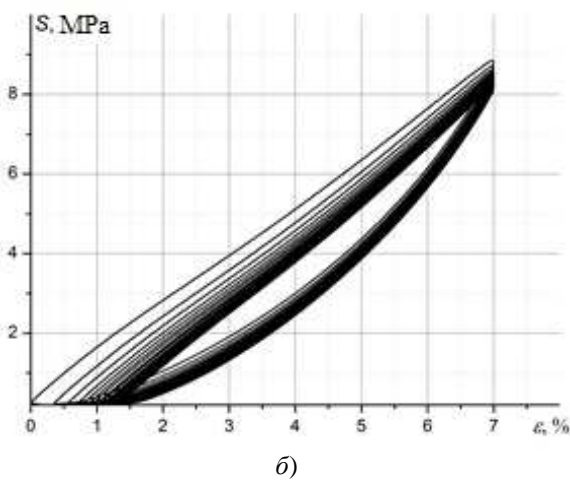
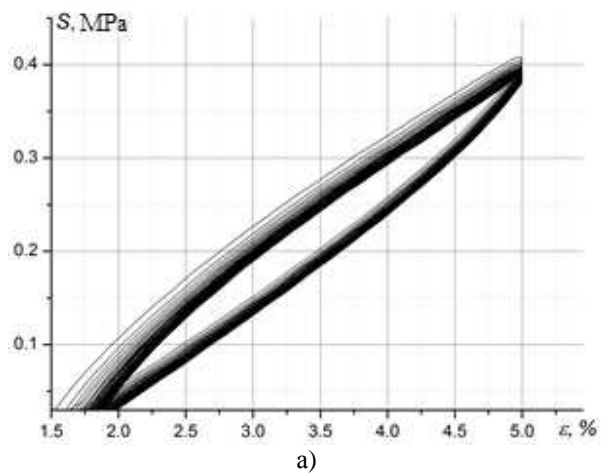
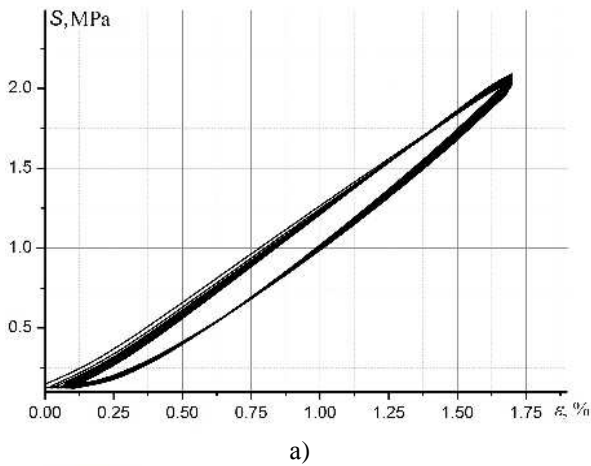


Рис. 3 – Крива деформування зразків еластовимірних композитів (стабілізований стан) у напрямку армування на різних рівнях амплітуд деформації

Рис. 4 – Крива деформування зразків еластовимірних композитів (стабілізований стан) у напрямку перпендикулярному до армування на різних рівнях амплітуд деформації

В роботі окремо було розглянуто ряд експериментів, що дозволяють визначити пружні властивості композиційного матеріалу в напрямку, перпендикулярному до армування. Використовуючи квадратну плоску композитну пластину 50 x 50 мм з товщиною 10 мм було проведено відповідні вимірювання. Зразок затискався між двома металевими пластинами, причому його поверхня була попередньо змазана спеціальною графітовою пастою, яка забезпечує вільне ковзання по поверхні. І, таким чином, він не дає ніяких обмежень на деформації зразка в площині, перпендикулярній до навантаження.

Пружні властивості зразків при стисканні в напрямку, перпендикулярному до площини армування, були визначені з серії випробувань при циклічному деформуванні з фіксованим рівнем деформацій (50 циклів). Експерименти проводилися для амплітуд деформацій 3%, 5%, 10% і 15%. Інженерна оцінка усередненого початкового модуля пружності матеріалу в напрямку, перпендикулярному до площини армування 15 МПа (в розрахунку на деформаціях 5%). Характерні криві деформації, які були отримані в ході цих випробувань, представлені на рис. 5.

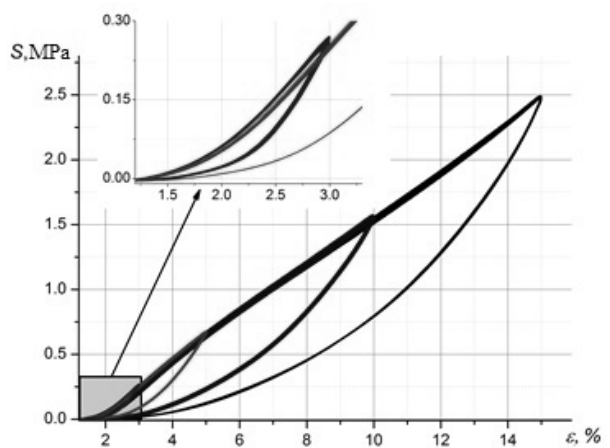


Рис. 5 – Крива деформування зразків еластовимірних композитів (стабілізований стан) при стисканні у площині перпендикулярній до армування на різних рівнях амплітуд деформації



**Визначення в'язкопружних властивостей композиту**

Результати, що були отримані в ході експериментів з циклічним навантаженням дозволяють оцінити в'язку складову деформації гумо-кордного композиту. Найвні експериментальні дані дозволяють визначити площу петлі гістерезису за допомогою чисельного інтегрування для циклів з різними амплітудами навантаження в різних напрямках (рис.6).

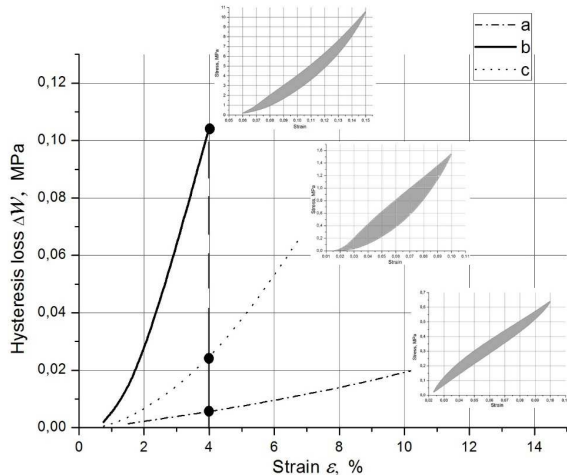


Рис. 6 – Криві гістерезисних втрат у 3-х основних напрямках (а – розтягнення впоперек волокон, б – розтягнення повздовж волокон, с- стикання у площині перпендикулярній до напрямку волокон)

Модуль втрат визначається з площі петель гістерезису для квазігармонічного навантаження (рис. 7):

$$\tilde{E} = \frac{\Delta W}{\pi \cdot \epsilon_1^2}, \quad (2)$$

де  $\Delta W$  – площа петель гістерезису, яка була визначена з експериментальних кривих деформування при циклічному навантаження зразків,  $\epsilon_1$  – амплітуда деформацій.

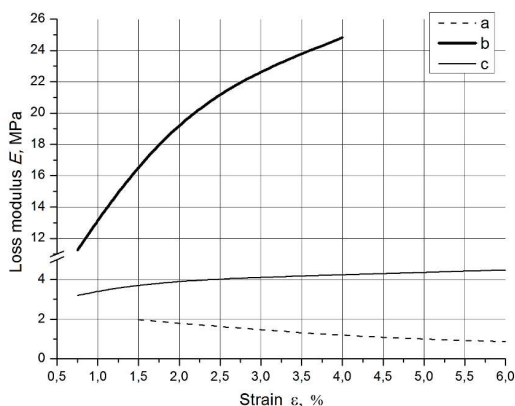


Рис. 7 – Криві залежності модулю втрат від амплітуди деформацій в 3х основних напрямках

**Висновки**

У статті розглядаються дослідження пов'язані з визначенням пружних і в'язкопружних гумо-кордного композиційного матеріалу в трьох основних напрямках: випробування на розтягнення уздовж текстильного корду, випробування на розтягнення поперек текстильного корду і випробування на стиск в площині, перпендикулярній до армуванню.

Результати показали, що наявність внутрішньої арматури призводить до високої концентрації внутрішніх напружень і деформацій в місцях, де є корд.

На основі результатів досліджень була отримана усереднена оцінка початкових модуля пружності та модуля втрат в трьох основних напрямках для композитних еластотримірів.

**Список літератури**

- 1 **Noda, N. A.** Effect of dimensions of crimped portion upon sealing performance of hydraulic brake hose by applying three-dimensional fem analysis / **N. A. Noda, B. Kim, K. Ota** // *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*. – 2013. – V. 7, No. 2. – P. 281-292. – doi:10.1299/kikaia.77.1828.
- 2 **Luo, Y.** Numerical investigation of nonlinear properties of a rubber absorber in rail fastening systems / **Y. Luo, Y. Liu, H. P. Yin** // *International Journal of Mechanical Sciences*. – 2013. – V. 69. – P. 107-113. – doi:10.1016/j.ijmecsci.2013.01.034.
- 3 **Polukoshko, S.** Vibration damping using laminated elastomeric structures / **S. Polukoshko, V. Gonca, J. Svabs** // *Solid State Phenomena*. – 2015. – V. 220-221. – P. 81-90. –doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.220-221.81.
- 4 **Suh, J. B.** Shear of rubber tube springs / **J. B. Suh, A. N. Gent, S. G. Kelly** // *Int. Journal of Non-Linear Mechanics*. – 2007. – V. 42, No. 9. – P. 1116-1126. – doi:10.1016/j.ijnonlinmec.2007.07.002.
- 5 **Brinkmeier, M.** Finite element analysis of rolling tires a state of the art review / **M. Brinkmeier, U. Nackenhorst, M. Ziefle** //In: *Proceedings of International CTI Conference «Automotive Tire Technology»*. Stuttgart. – 2007. – P. 1-10.
- 6 **Clark, S. K.** The pneumatic tire / Ed. by **Clark S. K.** // *National Highway Traffic Safety Administration*. USA Dep. Of Transportation. – 2006. – 707 p.
- 7 **Pelc, J.** Material modelling in cord-rubber structures / **J. Pelc** // *Kautschuk Gummi Kunststoffe. Jahrgang*. – 2000. – No. 10. – P. 561-565.
- 8 **Larin, O.** Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres / **O. Larin, Yu. Petrova, V. Mateichyk** // *Rzeszow: Politechnika Pieszowska Im. Ignacego Lukaszewicza*. – 2013. – P. 123-128.

**Bibliography (transliterated)**

- 1 **Noda, N. A., Kim, B., Ota, K.** Effect of dimensions of crimped portion upon sealing performance of hydraulic brake hose by applying three-dimensional fem analysis. *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*. 2013, 2(7), 281-292, doi:10.1299/kikaia.77.1828
- 2 **Luo, Y., Liu, Y., Yin, H. P.** Numerical investigation of nonlinear properties of a rubber absorber in rail fastening

- systems. *International Journal of Mechanical Sciences*. 2013, **69**, 107-113, doi:10.1016/j.ijmecsci.2013.01.034.
- 3 **Polukoshko, S., Gonca, V., Svabs, J.** Vibration damping using laminated elastomeric structures. *Solid State Phenomena*, 2015, **220-221**, 81-90, doi:10.4028/www.scientific.net/SSP.220-221.81.
- 4 **Suh, J. B., Gent, A. N., Kelly, S. G.** Shear of rubber tube springs. *Int. Journal of Non-Linear Mechanics*, 2007, 9(42), 1116-1126.
- 5 **Brinkmeier, M., Nackenhorst, U., Ziefle, M.** Finite element analysis of rolling tires a state of the art review. In: *Proceedings of International CTI Conference «Automotive Tire Technology»*, Stuttgart, 2007, 1-10.
- 6 **Clark, S. K.** The pneumatic tire. *National Highway Traffic Safety Administration*. USA Dep. Of Transportation, 2006, 707 p.
- 7 **Pelc, J.** Material modelling in cord-rubber structures. *Kautschuk Gummi Kunststoffe. Jahrgang*, 2000, **10**, 561-565.
- 8 **Larin, O., Petrova, Yu., Mateichyk, V.** Two-scale approach to modelling of pneumatic tyres. *Rzeszow: Politechnika Pzszowska Im. Ignacego Lukaszewicza*, 2013, 123-128.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Ларін Олексій Олександрович** – доц., к.т.н. доцент. кафедри динаміки та міцності машин, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна.

**Oleksiy Larin** – Docent, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

**Петрова Юлія Андріївна**, аспірант кафедри динаміки та міцності машин, Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут», Харків, Україна

**Julia Petrova** – PhD student, Department of Dynamics and Strength of Machines National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, Ukraine.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Ларін, О. О.** Експериментальні дослідження ортотропних пружних і в'язкопружних характеристик еластостійких текстильно армованих композитів / **О. О. Ларін, Ю. А. Петрова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 55-59. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.08.

*Please cite this article as:*

**Larin, O., Petrova, Ju.** Experimental observations of orthotropic elastic and viscoelastic characteristics of the elastomeric textile reinforced composites. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 55-59, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.08.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Ларин, А. А.** Экспериментальные исследования ортотропных упругих и вязкоупругих характеристик эластомерных текстильно армированных композитов / **А. А. Ларин, Ю.А. Петрова** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 55-59. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.08.

**АННОТАЦИЯ** Стаття посвящена дослідженню упругих і в'язкопружних властивостей еластомерних композиційних матеріалів шляхом проведення експериментальних тестів. Дані композити мають однонаправлене армування текстильним кордом. Експерименти проводились в різних напрямках (продольне і поперечне по корду). Зразки циклічно навантажувалися з різними амплітудами деформацій. Це дозволило оцінити гістерезисні втрати, а також початкові модулі пружності і модулі втрат матеріалу в стабілізованому стані. Модуль втрат оцінюється в залежності від амплітуди деформації в різних напрямках.

**Ключевые слова:** еластомерные композиты, упругие и вязкоупругие свойства, экспериментальное исследование

Надійшла (received) 17.05.2016

УДК 621.311

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.09

## НОРМУВАННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ АГРОПРОМИСЛОВОГО КОМПЛЕКСУ КРИТЕРІАЛЬНИМ МЕТОДОМ З ЗАСТОСУВАННЯМ НЕЙРОНЕЧІТКОГО МОДЕЛЮВАННЯ

П. Д. ЛЕЖНЮК<sup>1</sup>, О. О. РУБАНЕНКО<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА

<sup>2</sup> Кафедра електротехнічних систем, технологій та автоматизації в АПК, Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, УКРАЇНА

\*email: lena\_rubanenko@bk.ru

**АНОТАЦІЯ.** В статті розглянута можливість вдосконалення існуючих та розробки нових методів оптимізації режимів, коли критерієм оптимальності є втрати електроенергії під час її транспортування з врахуванням планового значення технічних втрат потужності в умовах неповноти вихідних даних. Запропоновано метод визначення нормативного значення втрат електроенергії в електричних мережах агропромислового комплексу, який полягає в уточненні коефіцієнтів при членах нормативної характеристики. В статті запропоновано три алгоритми вирішення задач високої міри складності, до яких і відноситься задача визначення планового значення технічних втрат потужності.

**Ключові слова:** планове значення технічних втрат потужності, нормативне значення електроенергії, нейронечітке моделювання, критеріальне програмування, критерій подібності, функція належності, впливний фактор, оптимальне керування, втрати електроенергії, міра складності.

## VALUATION OF POWER LOSSES IN ELECTRICAL NETWORKS OF AGRO-INDUSTRIAL COMPLEX BY CRITERION METHOD WITH USE NEURO-FUZZY MODELLING

P. D. LEZHNYUK<sup>1</sup>, O. O. RUBANENKO<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup> Department of electric stations and systems, Vinnytsia national technical University, Vinnytsia, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of electrical engineering systems, technologies and automation in agriculture, Vinnytsia national agrarian University, Vinnytsia, UKRAINE

\*email: lena\_rubanenko@bk.ru

**ABSTRACT** The article considers the possibility of improving existing and developing new methods of the modes optimization, when the optimality criterion is the power losses during its transportation taking into account the planned values of power losses in conditions of incomplete initial data. Proposed method of determination normative value of power losses in electrical networks of agro-industrial complex, which is clarification coefficients from members of normative characteristic. The paper proposed three algorithms of decision of tasks of high complexity, which concerns the problem of determining the planned value of the technical power losses. The article proposes a synthesized method in which to extend the scope of criterial method uses the advantages of neural modeling. Accordingly developed: algorithm for solving problems of large complexity criterion programming by presenting the similarity criteria in the form of membership functions; the algorithm of decision of task of great complexity criterion method by using fuzzy similarity criteria; algorithm for solving problems of large complexity criterion method by using fuzzy sets of similarity criteria, which are based on the application of the Mamdani algorithm. The first algorithm is used when the known membership function of the current value of the underlying similarity criterion of the set of its allowed values that satisfy the constraint, the known values of the coefficients at the terms of the objective function and the values of the degrees of the arguments of the objective function. The advantages of the first algorithm include the ability to quickly determine the values of parameters of membership functions and ease of determining the basic similarity criteria. Due to this algorithm can easily be realized in the form of a program. The disadvantages of this algorithm include the complexity of the choice of the type of the membership function of the similarity criterion. The second algorithm requires the calculation of the fuzzy basis of the similarity criterion.

**Keywords:** the planned value of technical power losses, the regulatory value of electricity, neuro modeling, programming criterion, the similarity criterion, membership function, factor of the influence, optimal control, power losses, the degree of difficulty.

### Вступ

Задача зменшення втрат електроенергії при її транспортуванні в електричних мережах агропромислового комплексу є актуальною. Одним із способів зменшення втрат електроенергії, який добре зарекомендував себе в розподільних мережах, є їх нормування. Для досягнення нормативного значення технічних втрат електроенергії потрібно відслідкову-

вати поточне значення втрат активної потужності. Потрібно здійснювати оптимальне керування нормальними режимами електричних мереж агропромислового комплексу таким чином, щоб поточні втрати потужності не перевищили планового їх значення. Тому при оптимальному керуванні нормальними режимами доцільно в якості критерію оптимальності використовувати втрати активної потужності і намагатись їх значення звести до планового. Це гарантує, що в



кінці звітнього періоду значення втрат електроенергії не перевищить норматив. Тому актуальною є задача вдосконалення існуючих та розробки нових методів оптимізації режимів, коли критерієм оптимальності є втрати електроенергії під час її транспортування з врахуванням планового значення технічних втрат потужності в умовах неповноти вихідних даних.

### Мета роботи

Таким чином, метою даної роботи є зменшення втрат потужності за рахунок вдосконалення керування параметрами нормальних режимів в електричних мережах агропромислового комплексу з врахуванням планового значення технічних втрат потужності.

### Визначення технічних втрат електроенергії критеріальним методом з застосуванням нейронечіткого моделювання.

При оптимальному керуванні нормальними режимами в електричних мережах агропромислового комплексу потрібно контролювати відхилення поточних втрат потужності від планового їх значення:

$$\Delta(\Delta P) = \Delta P - \Delta P_{\text{план}}, \quad (1)$$

де  $\Delta P$  - поточні втрати потужності;  $\Delta P_{\text{план}}$  - планові втрати потужності. Тоді, загальносистемний комплексний критерій оптимальності [1-3]:

$$F = f(\Delta P, \Delta P_{\text{план}}, P(\delta), P(\omega), \sum_{i=1}^q \Pi_{Ti}), \quad (2)$$

де  $\Delta P$  - поточні втрати активної потужності в електричних мережах агропромислового комплексу;  $P(\delta U)$  - потужність, еквівалентна збитку споживачів, обумовленому низькою якістю напруги;  $P(\omega)$  - потужність, еквівалентна збитку внаслідок недовідпуску електроенергії, викликаному відмовами трансформаторів, зокрема відмовами пристроїв РПН;  $\Pi_{Ti}$  - штрафна функція, яка вводиться для обліку ресурсу трансформаторів, зокрема перемикачів пристроїв РПН;  $q$  - кількість регульованих трансформаторів.

Задачу керування нормальними режимами електричних мереж агропромислового комплексу можна представити в такому вигляді [2]:

мінімізувати:

$$y(x) = \sum_{i=1}^{m_1} a_i \cdot \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ji}} \quad (3)$$

за умов

$$q_k(x) = \sum_{i=m_k+1}^{m_{k+1}} a_i \prod_{j=1}^n x_j^{\alpha_{ji}} \leq G_k, \quad (4)$$

$$k = \overline{1, p}; \quad x_j > 0, \quad j = \overline{1, n},$$

де  $y(x)$  - деякий узагальнений критерій оптимальності (загальносистемні втрати потужності, планові втрати

потужності);  $a_i, \alpha_{ji}$  - постійні коефіцієнти;  $x_j$  - змінні параметри;  $n$  - кількість змінних параметрів;  $m$  - сумарна кількість членів обмежень і цільової функції;  $m_1$  - кількість членів цільової функції;  $k$  - номер обмеження;  $m_k$  - кількість членів  $k$ -го обмеження;  $p$  - кількість обмежень.

Відповідна (1) двоїста задача може бути сформульована таким чином [3-10]:  
максимізувати

$$d(\pi_o) = \prod_{i=1}^m \left( \frac{a_i}{\pi_{io}} \right)^{\pi_{io}} \prod_{k=1}^p \left( \frac{\lambda_k}{G_k} \right)^{\lambda_k} \quad (5)$$

за умов, які представлені у вигляді ортонормованої системи рівнянь

$$\begin{vmatrix} \alpha_{11} & \alpha_{12} & \dots & \alpha_{1m_1} & \alpha_{1m_1+1} & \alpha_{1m_1+2} & \dots & \alpha_{1m} & \pi_1 & 0 \\ \alpha_{21} & \alpha_{22} & \dots & \alpha_{2m_1} & \alpha_{2m_1+1} & \alpha_{2m_1+2} & \dots & \alpha_{2m} & \pi_2 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \alpha_{3m_1+1} & \alpha_{3m_1+2} & \dots & \alpha_{3m} & \pi_3 & 0 \\ \alpha_{n1} & \alpha_{n2} & \dots & \alpha_{nm_1} & \alpha_{nm_1+1} & \alpha_{nm_1+2} & \dots & \alpha_{nm} & \dots & \dots \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 & \pi_m & 1 \end{vmatrix} = 0, \quad (6)$$

де  $m_1 + 1; m_1 + 2$  і т. ін. - індекси членів системи рівнянь (4), які відповідають членам обмежень (4).

Так як матриця  $\alpha$ , як правило, прямокутна, то система рівняння (6) формує область розв'язків двоїстої задачі критеріального програмування (КП), в якій знаходиться і оптимальний розв'язок. Розмірність області розв'язків в КП прийнято визначати мірою складності  $t = m - n - 1$ . Область розв'язків може бути сформована шляхом виділення базисних (незалежних) критеріїв подібності і перетворення матриці  $\alpha$  методом Гаусса-Жордана. В результаті такого перетворення отримуються вектори нормалізації і нев'язки, які зв'язують залежні критерії подібності з базисними. В умовах невизначеності пропонується записати базисні критерії подібності через функції належності. Тоді вектор критеріїв подібності з використанням функцій належності для базисних критеріїв подібності запишеться [3]:

$$\pi_{io} = \beta_{oi} + \sum_{b=1}^t \beta_{ib} \cdot \mu_b, \quad i = \overline{1, m}, \quad (7)$$

де  $\mu_b$  - функції належності для базисних критеріїв подібності;

$\beta_{io}$  - елемент вектору нормалізації;

$\beta_{ij}$  - елемент вектору нев'язки.

### Розробка алгоритмів розв'язання задач великої міри складності

Пропонується синтезований метод, в якому для розширення області застосування критеріального методу використовуються переваги нейронечіткого моделювання [6-10].

Відповідно до цього розробляються: алгоритм розв'язання задач великої міри складності КП шляхом подання критеріїв подібності у вигляді функцій

належності (рис.1); алгоритм розв'язання задач великої міри складності критеріальним методом шляхом використання нечітких критеріїв подібності (рис. 2); алгоритм розв'язання задач великої міри складності критеріальним методом шляхом використання нечітких множин критеріїв подібності, який базується на застосуванні алгоритму Мамдані (рис. 3).

Перший алгоритм (рис. 1) використовується, коли відома функція належності поточного значення базисного критерію подібності до множини його оптимальних значень, яка задовольняє обмеження, відомі значення коефіцієнтів при членах цільової функції і значення степенів аргументів цільової функції.

До переваг першого алгоритму можна віднести можливість швидкого визначення значень параметрів функції належності і простоту визначення базисних критеріїв подібності. Завдяки цьому алгоритм може легко реалізуватись у вигляді програми.

До недоліків цього алгоритму можна віднести складність вибору типу функції належності критерію подібності.

Другий алгоритм, блок-схема якого наведена на рис. 2, передбачає розрахунок нечіткого базисного критерію подібності.

Функції належності, від значень яких залежить нечіткий базисний критерій подібності, визначаються з використанням програмного комплексу MATLAB, а саме ANFIS-редактора і реалізованого в ньому алгоритму нечіткого висновку Сугено, який дозволяє побудувати функції належності по вибірці ретроспективних даних і в разі потреби скоригувати їх параметри.

Третій алгоритм використовується тоді, коли є нечітка множина значень базисних критеріїв подібності.

До переваг цього алгоритму відноситься можливість врахування досвіду експертів. До недоліків відноситься потреба уточнювати отриманий розв'язок методами дихотомії, золотого перерізу та ін.

Третій алгоритм використовується тоді, коли є нечітка множина значень базисних критеріїв подібності. До переваг цього алгоритму відноситься можливість врахування досвіду експертів.

До недоліків відноситься потреба уточнювати отриманий розв'язок методами дихотомії, золотого перерізу та ін. Використовуючи один з алгоритмів визначаємо планові значення технічних втрат потужності:

$$\Delta P_{план} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n A_{ij} \cdot P_i P_j + \sum_{i=1}^n A_i \cdot P_i \quad (8)$$

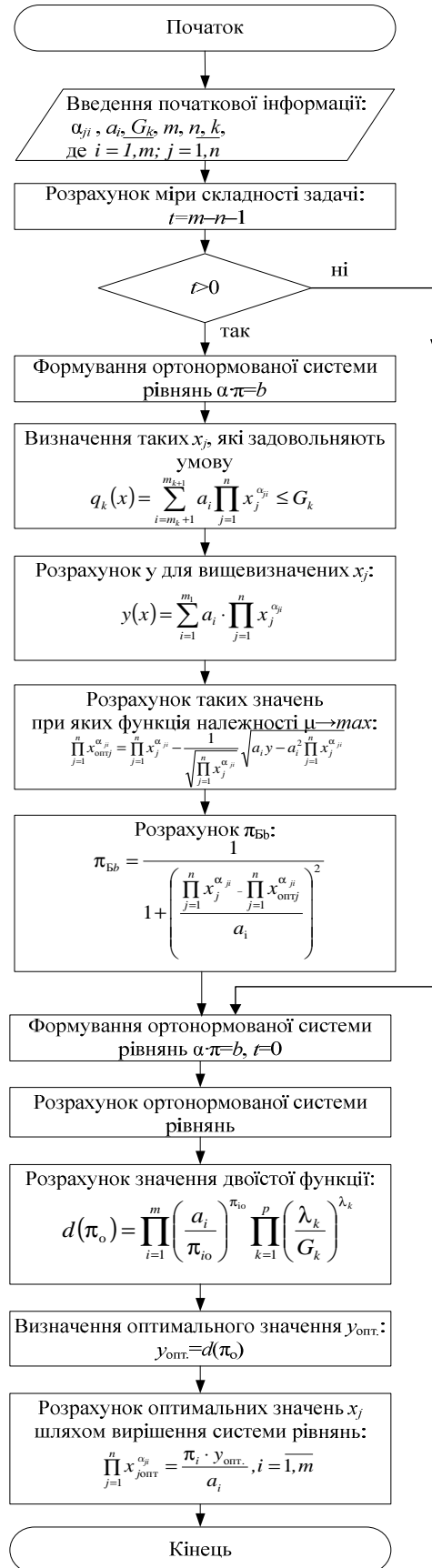


Рис. 1 – Блок-схема алгоритму розв'язання задач великої міри складності КП шляхом подання критеріїв подібності у вигляді функцій належності

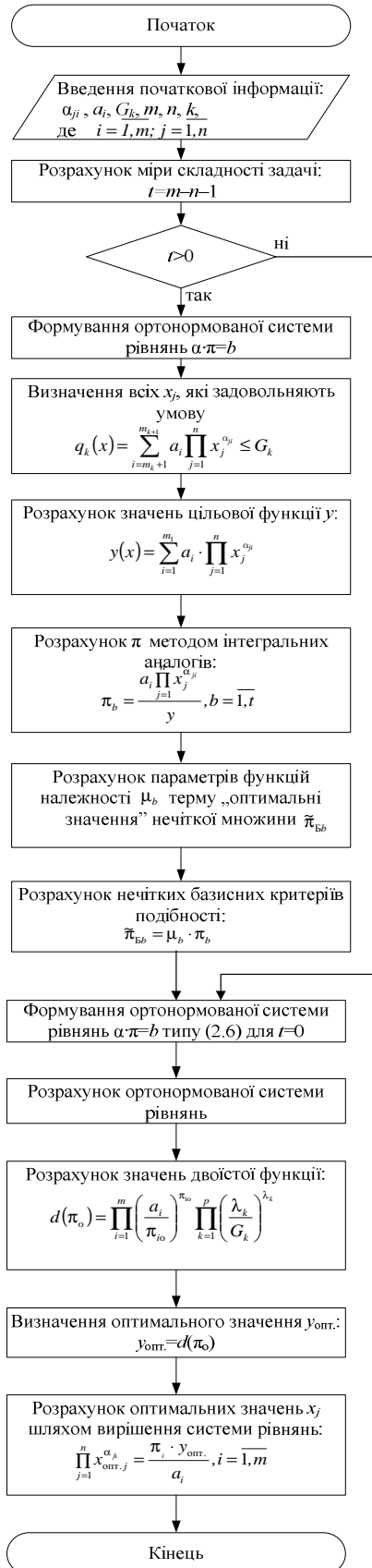


Рис. 2 – Блок-схема алгоритму розв'язання задач великої міри складності КП шляхом використання нечітких критеріїв подібності

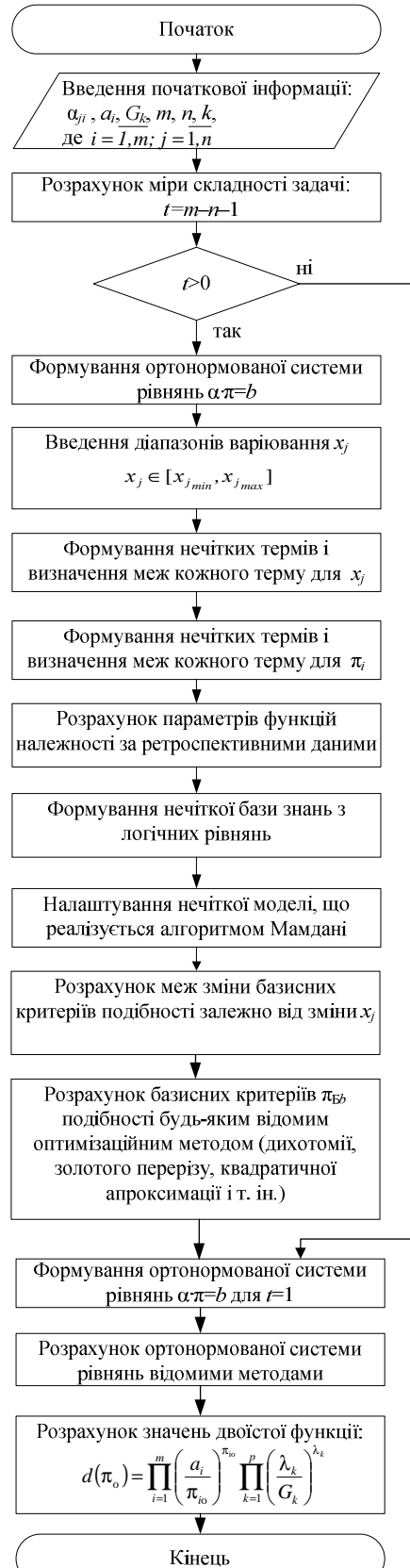


Рис. 3 – Блок-схема алгоритму розв'язання задач великої міри складності критеріальним методом шляхом використання нечітких множин критеріїв подібності

Запишемо ортонормовану систему рівнянь.  
Для 4-ох впливних факторів запишеться:  
мінімізувати

$$\begin{aligned} \Delta P_{\text{норм}} = & A_{11}P_1^2 + A_{22}P_2^2 + A_{33}P_3^2 + A_{44}P_4^2 + \\ & + A_{12}P_1P_2 + A_{13}P_1P_3 + A_{14}P_1P_4 + \\ & + A_{23}P_2P_3 + A_{24}P_2P_4 + A_{34}P_3P_4 + \\ & + B_1P_1 + B_2P_2 + B_3P_3 + B_4P_4 \end{aligned} \quad (9)$$

за умов  $\frac{P_1}{P_1P_2} + \frac{P_2}{P_1P_2} + \frac{P_3}{P_1P_2} + \frac{P_4}{P_1P_2} \leq P_c$ ;

$P_1, P_2, P_3, P_4 > 0$ , де  $P_c = \frac{P_1}{\Delta P^2}$ .  $P_1, P_2, P_3, P_4$  – впливні

фактори (потужність навантаження на шинях, потужність потужного підприємства та ін.).

$$\begin{cases} 2\pi_1 & +\pi_5 & +\pi_6 & +\pi_7 & & +\pi_{11} & -\pi_{16} & & -\pi_{17} & -\pi_{18} & & =0 \\ & 2\pi_2 & & +\pi_5 & & +\pi_8 & +\pi_9 & & +\pi_{12} & -\pi_{15} & +\pi_{16} & -\pi_{17} & -\pi_{18} & -\pi_{19} & =0 \\ & & 2\pi_3 & & +\pi_6 & & +\pi_8 & & +\pi_{10} & & +\pi_{13} & & +\pi_{17} & & =0 \\ & & & 2\pi_4 & & +\pi_7 & +\pi_9 & +\pi_{10} & +\pi_{14} & & +\pi_{18} & & & & =0 \\ \pi_4 & +\pi_5 & +\pi_6 & +\pi_7 & +\pi_8 & +\pi_9 & +\pi_{10} & +\pi_{11} & +\pi_{12} & +\pi_{13} & +\pi_{14} & +\pi_{15} & +\pi_{16} & +\pi_{17} & +\pi_{18} & +\pi_{19} & =1 \end{cases}$$

Розрахуємо нормативне значення технічних втрат електроенергії за розрахунковий період методом середніх навантажень. Метод середніх навантажень полягає в розрахунку втрат електроенергії за формулою:

$$\Delta W \neq k_l k_k \Delta P_{cp} T_j k_{\phi}^2, \quad (10)$$

де  $k_l=1,02$  – коефіцієнт, який враховує вплив втрат в арматурі повітряних ліній [3],  $\Delta P_{cp}$  – втрати потужності в мережі при середніх за розрахунковий інтервал навантаженнях вузлів;  $k_{\phi}^2$  – коефіцієнт форми графіка сумарного навантаження мережі за розрахунковий інтервал;  $k_k=0,99$  – коефіцієнт, який враховує відмінність конфігурації графіків активного і реактивного навантаження різних віток мережі [3];  $T_j$  – тривалість  $j$ -го розрахункового інтервалу, годин. Коефіцієнт форми графіка сумарного навантаження мережі за розрахунковий період розраховується за виразом:

$$k_{\phi}^2 = \sum_{i=1}^m P_i^2 \Delta t_i / (P_{cp}^2 T)$$

де  $P_i$  – значення навантаження на  $i$ -му ступені графіка навантаження тривалістю  $\Delta t_i$ , годин;  $m$  – число ступенів графіка за розрахунковий період;  $P_{cp}$  – середнє навантаження мережі.

### Висновки

Запропоновано вирішення актуальної науково-прикладної задачі підвищення ефективності оптимального керування параметрами нормальних режимів електричними мережами агропромислового комплексу критеріальним методом з застосуванням нейронечіткого моделювання в умовах неповноти вихідних даних, що полягає у вдосконаленні математичних моделей та методів визначення ПЗТВП

для врахування їх значень при формуванні керуючих впливів.

### Список літератури

- 1 **Лежнюк, П.** Оптимальне керування нормальними режимами електроенергетичних систем критеріальним методом з урахуванням планового значення технічних втрат потужності / **П. Лежнюк, О. Рубаненко** // *Вісник Вінницького політехнічного інституту*. – 2011. – №1. – С. 86-90.
- 2 **Петрушенко, О. Ю.** Розв'язання двоїстої задачі оптимального керування нормальними режимами ЕС з застосуванням нейро-нечіткого моделювання / **Петрушенко О. Ю., Петрушенко Ю. В., Рубаненко О. О.** // *Праці інституту електродинаміки*. – 2012. – №2. – С. 36-37.
- 3 Методика расчета нормативных (технологических) потерь электроэнергии в электрических сетях: утв. министерством промышленности и энергетики Российской Федерации (Минпромэнерго России) 03.02.2005 № 21. – М.: 2005. – 159 с. – (Нормативный документ Минпромэнерго России).
- 4 **Chiang, M.** Geometric programming for communication systems Electrical Engineering Department / *Foundations and Trends in Communications and Information Theory*. – Princeton University, Princeton New Jersey. – 2005. – Vol. 2. – №1/2. – P. 1-153. ISBN: 1-933019-09-3; ISSN: Paper version 1567-2190; Electronic version 1567-2328
- 5 **Boyd, S.** A tutorial on geometric programming / **Stephen Boyd, Seung-Jean Kim, Lieven Vandenberghe, Arash Hassibi** / Education section. – 2006.– Stanford. – 64 p. – doi:10.1007/s11081-007-9001-7.
- 6 **Bertsekas, D. P.** Dynamic programming and optimal control, volume 1. Athena Scientific Belmont, MA, 3 edition. – 2005. ISBNs: 1-886529-26-4 (Vol. I, 3rd Edition), 1-886529-44-2 (Vol. II, 4th Edition), 1-886529-08-6
- 7 **Powell, W. B.** Approximate Dynamic Programming: Solving the curses of dimensionality / **W. B. Powell** // *John Wiley & Sons*. – vol. 703. – 2007. ISBN: 978-0-470-60445-8
- 8 **McLeish, D. L.** Bounded relative error importance sampling and rare event simulation / **D. L. McLeish**. // *ASTIN Bulletin*. – 2010. – No 40(1).
- 9 **Grigoras, G.** An improved fuzzy method for energy losses evaluation in distribution networks / **G. Grigoras, G. Cartina, E. C. Bobric** // *MELECON 2010: 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. – 2010. – P. 131-135. – doi:10.1109/MELCON.2010.5476324.
- 10 **Cartina, G.** Improved fuzzy load models by clustering techniques in optimal planning of distribution networks / **G. Cartina, G. Grigoras, E. C. Bobric, D. Comanescu** // *PowerTech*. – June 28 - July 29 2009. – 2009. – *IEEE*. – Bucharest. – P. 1 – 6. – doi: 10.1109/PTC.2009.5282025.

### Bibliography (transliterated)

- 1 **Lezhniuk, P., Rubanenko, O.** Optymalne keruvannya normalnyimi rezhymamy elektroenerhetychnykh system kryterialnym metodom z urakhuvanniam planovoho znachennia tekhnichnykh vtrat potuzhnosti [Optimal control of normal modes of electric power systems based criterion method planned value of technical power losses]. *Visnyk*

- Vinnitskoho politekhnichnoho instytutu [Bulletin Vinnitsa Polytechnic Institute], 2011, **1**, 86-90.
- 2 **Petrushenko, O. Iu. Petrushenko Iu. V., Rubanenko, O. O.** Rozv'iazannia dvoitsoi zadachi optymalnogo keruvannia normalnymy rezhymamy ES z zastosuvanniam neuro-nechitkoho modeliuвання [Addressing the dual problem of optimal control ES normal modes using fuzzy modeling]. Pratsi instytutu elektrodynamiky [Proceedings of the Institute of Electrodynamics], 2012, **2**, 36-37.
  - 3 Metodyka rascheta normatyvnykh (tekhnohycheskykh) poter elektroenerhyi v elektrycheskykh setiakh: utv. mynysterstvom promishlennosti y enerhetyky Rossyiskoi Federatsyy (Mynpromenerho Rossyy) 03.02.2005 [The methodology for calculating regulatory (technological) power losses in electric networks: approved. Ministry of Industry and Energy (Ministry of Energy of Russia)]. – Moscow, 2005, **21**, 159 p.
  - 4 **Chiang M.** Geometric programming for communication systems Electrical Engineering Department / *Foundations and Trends in Communications and Information Theory*. – Princeton University, Princeton New Jersey, 2005, **1/2(2)**, 1-153. ISBN: 1-933019-09-3; ISSN: Paper version 1567-2190; Electronic version 1567-2328.
  - 5 **Boyd, S., Kim, S-J., Vandenberghe L., Hassibi, A.** A tutorial on geometric programming. *Education section*, Stanford, 2006, 64 p., doi 10.1007/s11081-007-9001-7.
  - 6 **Bertsekas, D. P.** Dynamic programming and optimal control, volume 1. *Athena Scientific Belmont*, MA, 3 edition, 2005. ISBNs: 1-886529-26-4 (Vol. I, 3rd Edition), 1-886529-44-2 (Vol. II, 4th Edition), 1-886529-08-6
  - 7 **Powell, W. B.** Approximate Dynamic Programming: Solving the curses of dimensionality, *John Wiley & Sons*, 2007, **703**. ISBN:978-0-470-60445-8.
  - 8 **McLeish, D. L.** Bounded relative error importance sampling and rare event simulation. *ASTIN Bulletin*. 2010, **40(1)**.
  - 9 **Grigoras, G., Cartina, G., Bobric, E. C.** An improved fuzzy method for energy losses evaluation in distribution networks. *MELECON 2010: 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference*. 2010, 131-135, doi:10.1109/MELCON.2010.5476324.
  - 10 **Cartina, G., Grigoras, G., Bobric, E. C., Comanescu, D.** Improved fuzzy load models by clustering techniques in optimal planning of distribution networks. *PowerTech*, June 28 - July 29 2009, *IEEE*, Bucharest, 2009, 1 - 6, doi:10.1109/PTC.2009.5282025.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Лежнюк Петро Дем'янович** – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних станцій і систем, м. Вінниця, Україна; e-mail: lpd@inbox.ru.

**Petro Lezhnyuk** – Doctor of Technical Sciences (Ph. D.) Ph. D., Professor, Vinnytsia national technical University, head of chair of electric stations and systems. Vinnytsia, Ukraine; e-mail: lpd@inbox.ru.

**Рубаненко Олена Олександрівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри електротехнічних систем, технологій та автоматизації в агропромисловому комплексі, Вінницький національний аграрний університет, Вінниця, Україна; e-mail: lena\_rubanenko@bk.ru.

**Olena Rubanenko** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent of Department of electrical engineering systems, technologies and automation in agriculture, Vinnytsia, Ukraine; e-mail: lena\_rubanenko@bk.ru.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Лежнюк, П. Д.** Нормування втрат електроенергії в мережах агропромислового комплексу критеріальним методом з застосуванням нейрон-нечіткого моделювання / **П. Д. Лежнюк, О. О. Рубаненко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 60-65. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.09.

*Please cite this article as:*

**Lezhnyuk, P., Rubanenko, O.** Valuation of power losses in electrical networks of agro-industrial complex by criterion method with use neuro-fuzzy modelling. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 60-65, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.09.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Лежнюк, П. Д.** Нормирование потерь электроэнергии в сетях агропромышленного комплекса критеріальным методом с использованием нейро-нечеткого моделирования / **П. Д. Лежнюк, Е. А. Рубаненко** // *Вестник НТУ «ХПІ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 60-65. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.09.

**АННОТАЦІЯ** В статті розглянуто можливість удосконалення існуючих і розробки нових методів оптимізації режимів, коли критерієм оптимальності являються втрати електроенергії в час її транспортування (передачі) з урахуванням планового значення втрат потужності в умовах неповноти вихідних даних. Предложено метод визначення нормативного значення втрат електроенергії в електричних мережах агропромислового комплексу, який полягає в уточненні коефіцієнтів при членах нормативної характеристики. В статті запропоновано три алгоритми рішення задач високої міри складності, до яких належить задача визначення планового значення технічних втрат потужності.

**Ключові слова:** планове значення технічних втрат потужності, нормативне значення електроенергії, нейро-нечітке моделювання, критеріальне програмування, критерій подоби, функція приналежності, впливаючий фактор, оптимальне управління, втрати електроенергії, ступінь складності.

*Надійшла (received) 08.05.2016*

УДК 621.789

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.10

## ВЛИЯНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОЙ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И РЕЖИМОВ ЛАЗЕРНОЙ ЗАКАЛКИ НА СТРУКТУРОФОРМИРОВАНИЕ СТАЛИ

ИДАН АЛАА ФАДИЛ И<sup>1</sup>, О. В. АКИМОВ<sup>1</sup>, Е. А. КОСТИК<sup>1\*</sup>, А. А. ГОНЧАРУК<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> Кафедра лазерной техники и физико-технических технологий, Национальный технический университет «Киевский политехнический институт», Киев, УКРАИНА

\*email: eklitus@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** Целью данной работы является изучение влияния различных видов предварительной термической обработки и режимов лазерной закалки на структурообразование упрочненной зоны стали 40. Показано, что наилучшим способом предварительной термической обработки стали перед лазерной закалкой, является улучшение. Такой способ упрочнения поверхностного слоя способствует формированию достаточной зоны с высокими показателями твердости (7 ГПа) с плавным переходом к сердцевине, что в дальнейшем положительно сказывается при эксплуатации детали. На формирование упрочненной лазером зоны влияют такие факторы как скорость обработки лазерным лучом и мощность лазера. С увеличением мощности, глубина упрочненного слоя увеличивается, а увеличение скорости обработки носит противоположный характер.

**Ключевые слова:** лазерная закалка, улучшение, глубина упрочненного слоя, твердость, структура стали

## THE INFLUENCE OF PRE-HEAT TREATMENT AND LASER HARDENING ON THE STEEL STRUCTURE FORMATION

IDAN ALAA FADHIL I<sup>1</sup>, O. AKIMOV<sup>1</sup>, K. KOSTYK<sup>1\*</sup>, O. GONCHARUK<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Laser technique and physic-technology science department, National technical university of Ukraine «Kiev polytechnic institute», Kiev, UKRAINE

**ABSTRACT** Efficiency of application of laser hardening is a significant increase in strength and wear-resistance parts, which is provided by forming on the surface of the part with a hardened layer structure, which differs from the metal structure obtained by classical methods of volumetric hardening. The aim of this work is to study the effect of different types of thermal pre-treatment and regimes of laser hardening on structure formation hardened zone of the steel. The test material is high quality structural carbon steel 40. For experimental studies was used for continuous Nd: YAG Laser, "DY044" produced by "ROFIN-SINAR". The microstructure was investigated by optical microscopy on the microscope MIM-8 by the standard method at different magnifications. The microhardness of the samples was determined on the device PMT-3 according to standard methods. Ultrafast laser heating of the annealed steel with a pronounced structural components in the initial state does not allow to obtain a homogeneous final structure. The main feature of laser machining pre-hardened steel is a mandatory manifestation of structural heredity during heating. This fact is explained by the oriented formation of austenite. Also a decisive influence on the oriented nucleation of austenite, leading to structural heredity, has not only the original steel structure, but also a high heating rate during laser processing. On the formation of laser hardened zone is influenced by such factors as the processing speed of the laser beam and laser power. With the power increase, the depth of the hardened layer is increased, and the increase in processing speed is of the opposite character. The best way to pre-heat treatment of steel before the laser annealing is improved. This method of hardening the surface layer contributes to the formation of adequate areas with high values of hardness (7 GPa) with a smooth transition to a core that further positive effect during operation of the part.

**Keywords:** laser hardening, improvement, depth of hardened layer, hardness, structure of steel

### Введение

В настоящее время лазерная обработка находит все более широкое применение, которая может быть применена для сварки, горячей резки и термической обработки металлов. Главная специфика лазерной обработки заключается в высоких скоростях нагрева и охлаждения. При соприкосновении лазерного луча с не зеркальной поверхностью металла происходит значительное выделение тепловой энергии за довольно короткий период времени, что приводит к

значениям скорости локального нагрева порядка миллиона градусов в секунду. С другой стороны, локальность взаимодействия луча и металла означает, что после прохождения луча практически мгновенно нагретый участок оказывается в окружении холодного металла, который благодаря процессам теплоотвода обеспечивает столь же быстрое охлаждение. Скорость охлаждения составляет сотни тысяч градусов в секунду, что во много раз превосходит обычные скорости закалки, такие как в воде или в других закалочных средах. Именно

благодаря таким скоростям нагрева и охлаждения происходит образование особых, характерных именно для этой обработки структур.

К преимуществам лазерной поверхностной обработки относится прецизионная локальность и бесконтактность, отсутствие короблений, значительная производительность процесса благодаря высоким скоростям, возможность обработки в труднодоступных местах, автоматизация процесса.

Используя лазерный пучок как высококонцентрированный источник тепла, можно выполнять широкий спектр локальной термической обработки (закалка, отжиг и др.).

Существуют следующие стадии взаимодействия излучения с материалом при лазерной обработке [1]:

- подвод лазерного излучения к материалу,
- поглощение светового потока и передача его энергии металлу,
- нагрев материала без видимого разрушения,
- оплавление металла,
- испарение,
- остывание после окончания лазерного воздействия.

Протекание этих стадий, главным образом, зависит от свойств обрабатываемых материалов и от интенсивности и длительности воздействия лазерного излучения.

Скорость нагрева при лазерном облучении достаточно высока ( $\sim 10^5$ – $10^6$  град/с). Ниже данного диапазона нагрев материала происходит без его плавления либо испарения. Повышение значений указанного диапазона способствует разрушению материала вследствие плавления или испарения [2].

Изменения мощности и длительности воздействия лазерного излучения приводят к получению широкого спектра структурных состояний на обработанных участках поверхности материала.

#### Анализ литературных данных

Лазерная закалка делится на два основных вида: лазерная закалка с оплавлением поверхности металла и без оплавления. Последний вид обработки способствует локальному упрочнению поверхности без изменения микрогеометрии поверхности, что ликвидирует последующую механическую обработку [3].

Основные преимущества лазерной закалки – возможность локального прецизионного упрочнения любых труднодоступных мест деталей сложных конфигураций, отсутствие термического оборудования и охлаждающих сред, высокая производительность процесса [4].

Эффективность применения лазерной закалки заключается в значительном увеличении прочности и износостойкости деталей, что обеспечивается за счет формирования на поверхности детали слоя с закаленной структурой, которая отличается от

структуры металла, полученной классическими методами объемной закалки. В зоне нагрева при лазерной закалке без оплавления поверхности металла происходят структурные и фазовые изменения, заключающиеся в образовании аустенита с растворением карбидной фазы при нагреве и превращении аустенита в мартенсит при охлаждении с формированием высокодисперсной структуры [5].

Лазерная закалка с оплавлением способствует расплавлению поверхностных слоев, при этом примеси в металле в виде включений успевают раствориться. Высокие скорости охлаждения (до  $10^6$  град/с) способствуют формированию мартенсита с большим содержанием углерода, чем при традиционной закалке [6].

Современные лазерные комплексы позволяют проводить мониторинг зоны обработки, для контроля температуры, графическое представление всех данных процесса во время процесса, а так же профилирования пучка на поверхности обработки в зависимости от необходимых размеров (рис. 1) [7].

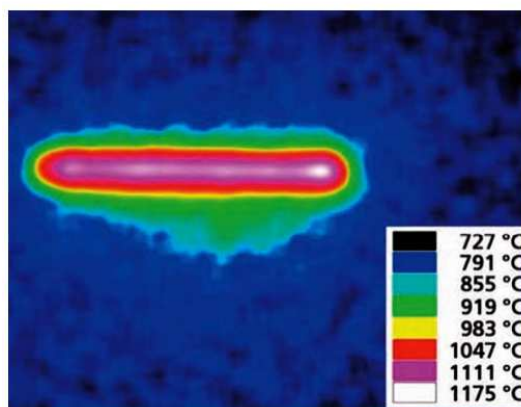


Рис. 1 – Распределение температуры в зоне лазерной обработки (упрочнения) стали

Актуальным является вопрос изучения влияния предварительной термической обработки и технологических параметров лазерного излучения на формирование структур в упрочненной области стали.

#### Цель работы

Целью данной работы является изучение влияния различных видов предварительной термической обработки и режимов лазерной закалки на структурообразование упрочненной зоны стали 40. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- изучить лазерную обработку предварительного отожженной стали;
- изучить лазерную обработку предварительного закаленной стали;
- изучить лазерную обработку предварительного улучшенной стали;



- изучить влияние различных режимов лазерной закалки на структуроформирование упрочненной зоны стали.

мощность P = 5÷4000 Вт, тип передачи – оптическое волокно (Ø 600 мкм, длина 20 м), шаг управления мощностью 5 Вт.

**Материал и методика исследования**

Материалом для исследования является конструкционная углеродистая качественная сталь 40. Химический состав стали и температуры критических точек приведены в табл. 1, 2 соответственно.

Таблица 1 – Химический состав стали 40

C	Cr	Si	Mn	Ni	Cu	S	P
0,37–0,45	до 0,25	0,17–0,37	0,50–0,80	до			
				0,25	0,25	0,04	0,035

Таблица 2 – Температура критических точек стали 40, °C

$A_{c1}$	$A_{c3}(A_{cm})$	$A_{r3}(A_{rc})$	$A_{r1}$	$M_n$
730	790	780	690	340

Предварительная термическая обработка стали 40 заключалась в проведении отжига (нормализации), закалки и отпуска (табл. 3). Температура закалки стали согласно критическим точкам (табл. 2) составляла 850 °C. После закалки образцы из стали подвергали высокому отпуску. Температура отпуска стали 40 составляла 550 °C. Длительность выдержки при высоком отпуске составляла 1,5 часа, за это время полностью проходят фазовые превращения распада мартенсита закалки сорбит отпуска. В углеродистой конструкционной стали 40 после улучшения формируется структура из феррито-цементитной механической смеси, в которой зернистый цементит имеет дисперсную округлую форму благодаря коагуляции и сфероидизации при температуре 550 °C [8].

Таблица 3 –Режимы термических обработок и значения твердости исследуемой стали

Температура закалки, °C/среда охлаждения	Твердость, HRC	Температура отпуска, °C/среда охлаждения	Твердость, HRC
850/вода	58–56	550/воздух	32–30

Для проведения экспериментальных исследований был использован непрерывный Nd: YAG-Лазер "DY044" производства фирмы "ROFIN-SINAR" [9], общий вид которого представлен на рис. 2.

Основные параметры лазерной установки: активная среда лазера – Nd:YAG,  $\lambda = 1,06$  мкм,



Рис. 2 – Общий вид Nd:YAG – лазера "DY044" производства фирмы "ROFIN-SINAR"

Лазерное излучение передавалось по изготовленном из кварцевого стекла оптическому волокну диаметром 600 мкм и длиной 20 метров. Из оптоволокну лазерное излучение попадало в коллиматор, где превращалось с помощью системы оптических элементов, приобретало необходимые геометрические размеры и потом попадало на фокусирующую кварцевую линзу d=50 мм с фокусным расстоянием F=200 мм. Диаметр лазерного пятна составлял 3 мм, варьировались параметры скорости обработки и мощности.

Микроструктуру исследовали методом оптической микроскопии на микроскопе МИМ-8 по стандартной методике при различных увеличениях [10].

Микротвердость образцов определяли на приборе ПМТ-3 по стандартной методике (ГОСТ 9450–76).

**Обсуждение результатов**

*Лазерная обработка отожженной стали.*

Исходная структура доэвтектоидной стали 40 состоит из структурно свободного феррита и перлита – эвтектоидной смеси цементита и феррита (рис. 3). Первое, что происходит при лазерном нагреве отожженной стали, - это появление участков высокоуглеродистого аустенита около цементитных частиц в зоне термовлияния в перлитных участках. При охлаждении на месте высокоуглеродистого аустенита формируется большое количество мартенситных участков. Такого вида мартенсит называют «бесструктурным», который обычно состоит из линзовидных кристаллов шириной 0,2–1,0 мкм.



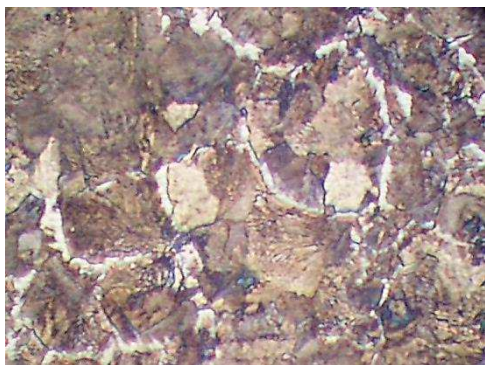


Рис. 3 – Структура стали 40 в отожженном состоянии,  $\times 200$

Неоднородность структуры наблюдается в зоне термовлияния и сохраняется вплоть до температуры плавления, и заключается в неоднородном распределении микротвердости в стали после лазерной заковки.

Очевидно, что лазерный сверхбыстрый нагрев отожженной стали с резко выраженными структурными составляющими в исходном состоянии вообще не позволяет получить однородную конечную структуру. Для этого требуется подготовительная термическая обработка, выравнивающая исходную структуру.

Поэтому в отожженном состоянии применение лазерной заковки является не целесообразным.

#### *Лазерная заковка предварительно закаленной стали.*

Предварительная заковка стали на мартенсит приводит к более однородному распределению углерода в структуре по сравнению с отожженным состоянием. Последующий отпуск обычно также не приводит к макроскопически заметному перераспределению углерода в структуре. Поэтому после лазерной заковки предварительно закаленной (или улучшенной) стали не наблюдается резкого различия в микротвердости в зоне, нагретой до одной и той же температуры.

По морфологическим признакам: форме мартенситных кристаллов, их взаимному расположению, группировке в пакеты, отсутствию двойников и характерным прослойкам остаточного аустенита – можно сделать вывод о том, что при лазерной заковке стали 40 с исходной мартенситной структурой (рис. 4) образуется реечный мартенсит, который наблюдается в углеродистых сталях, содержащих 0,2–0,6 % С. Следовательно, в аустените, из которого получен этот мартенсит, содержание углерода было близко к среднему для стали (0,4 %). При этом крупное зерно в начале зоны новой заковки, без сомнения, просто воспроизводит зерно исходной структуры, отличаясь от него только зубчатостью границ, что связано с проявлением эффекта структурной наследственности при быстром нагреве

стали с мартенситной структурой. При увеличении температуры, восстановленное зерно заменяется новым более мелким, образующимся в результате самопроизвольной релаксации в аустенитном состоянии.

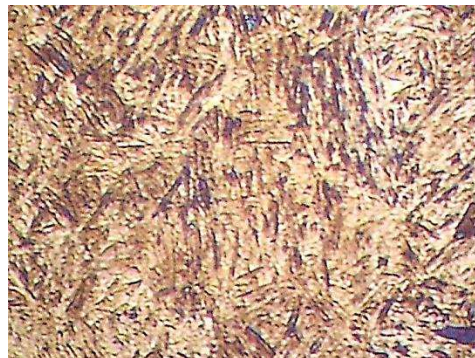


Рис. 4 – Структура стали 40 после объемной заковки,  $\times 200$

Таким образом, основной особенностью лазерной обработки предварительно закаленной стали заключается в обязательном проявлении структурной наследственности при нагреве. Этот факт объясняется ориентированным образованием аустенита. Также определяющее влияние на ориентированный характер зарождения аустенита, приводящий к структурной наследственности, оказывает не только исходная структура стали, но и высокая скорость нагрева при лазерной обработке.

#### *Лазерная заковка предварительно улучшенной стали.*

Структурный механизм образования аустенита в высокоотпущенной стали 40 заключается в следующем – сначала происходит кристаллографически упорядоченное  $\alpha$ - $\gamma$  превращение, которое должно было бы вести к восстановлению зерна аустенита исходной заковки, но одновременно с этим начинает происходить рекристаллизация аустенита. При лазерном нагреве образование аустенита происходит внутри кристаллов отпущенного мартенсита (рис. 5). Первые участки аустенита ориентированы (в пределах одного исходного зерна) одинаково, и это должно было бы вести к восстановлению исходных аустенитных зерен. С повышением температуры они растут, но затем, еще до их смыкания, в стали появляются по-новому ориентированные зерна, являющиеся продуктом рекристаллизации, которые и составляют конечную мелкозернистую структуру.

Таким образом, измельчение зерна при лазерном нагреве улучшенной стали 40 не является непосредственным результатом перестройки  $\alpha$ - $\gamma$ , но происходит в процессе налагающейся на эту перестройку рекристаллизации аустенита.





Рис. 5 – Структура стали 40 после улучшения,  $\times 200$

На формирование упрочненной лазером зоны влияют такие факторы как скорость обработки лазерным лучом и мощность лазера. С увеличением мощности, глубина упрочненного слоя увеличивается (рис. 6 и 7 соответственно).

Увеличение скорости обработки при лазерной закалке стали 40 приводит к уменьшению глубины зоны термического влияния (рис. 8 и 9 соответственно)

Низкая мощность (300 Вт), при скорости обработки 0,2 м/мин, способствует формированию отдельных упрочненных областей без образования сплошного упрочненного слоя, что показано на рис. 10. Понижение скорости в два раза приводит к формированию большей зоны термического влияния с образованием сплошного упрочненного слоя небольшой глубины (рис. 6).

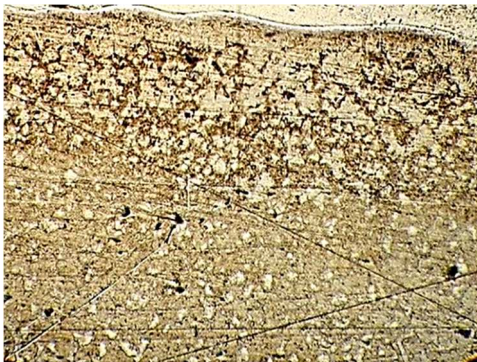


Рис. 6 – Структура упрочненной лазером зоны,  $\times 200$ . Режим лазерной обработки:  $V_{об} = 0,1$  м/мин;  $P = 300$  Вт

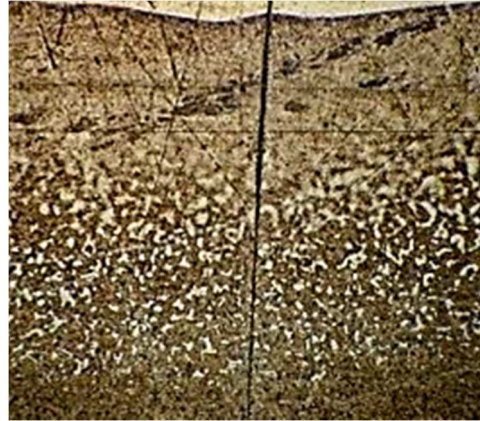


Рис. 7 – Структура упрочненной лазером зоны,  $\times 200$ . Режим лазерной обработки:  $V_{об} = 0,1$  м/мин;  $P = 800$  Вт



Рис. 8 – Структура упрочненной лазером зоны,  $\times 200$ . Режим лазерной обработки:  $V_{об} = 0,3$  м/мин;  $P = 500$  Вт



Рис. 9 – Структура упрочненной лазером зоны,  $\times 200$ . Режим лазерной обработки:  $V_{об} = 0,5$  м/мин;  $P = 500$  Вт





Рис. 10 – Структура упрочненной лазером зоны,  $\times 200$ . Режим лазерной обработки:  $V_{об} = 0,2$  м/мин;  $P = 300$  Вт

Структура соответствующая показателям мощности 1000 Вт имеет следующий вид (рис. 11).

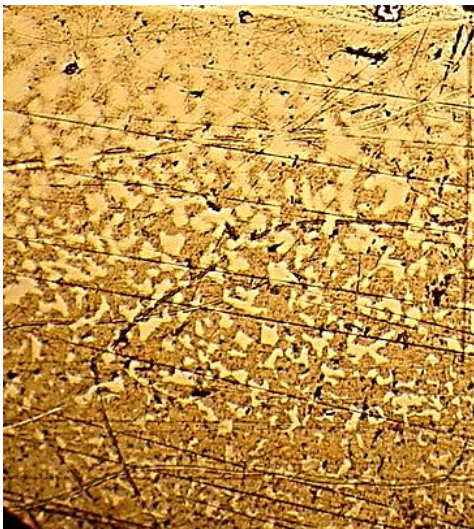


Рис. 11 – Структура упрочненной лазером зоны,  $\times 200$ . Режим лазерной обработки:  $V_{об} = 1,0$  м/мин;  $P = 1000$  Вт

Как и предполагали, основная матрица представляет собой сорбит отпуска, а в зоне лазерного влияния наблюдается мелкодисперсная структура мартенсита (светлые участки на структурах рис. 6–11).

На рис. 12 представлены кривые изменения микротвердости, полученных при измерении поперечных сечений зон термического влияния для стали 40, предварительно закаленной обычным способом и предварительно улучшенной (табл. 3). Значения твердости в результате новой закалки (т. е. образование аустенита в условиях лазерного нагрева и превращения его в мартенсит при охлаждении за счет теплоотвода) значительны, порядка 7 ГПа. Для стали после предварительной закалки характерна область резкого понижения твердости до 3 ГПа, что

связано с отпуском исходной мартенситной структуры, затем происходит плавное возвращение к твердости сердцевины, значениям твердости после объемной закалки.

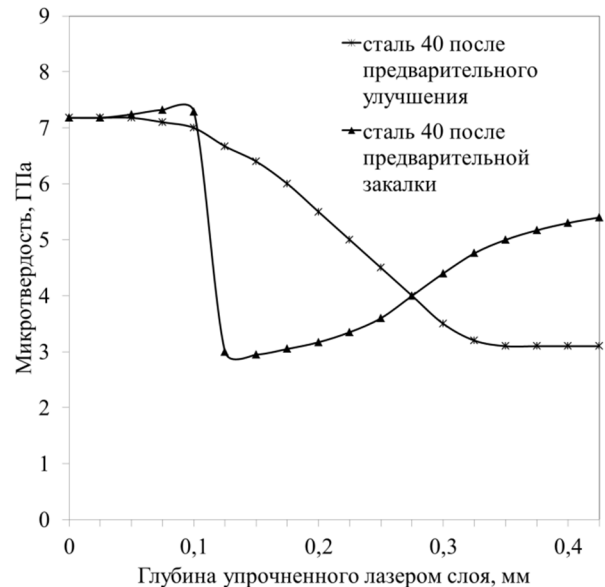


Рис. 12 – Распределение значений микротвердости в поперечном сечении от поверхности вглубь образца при скорости перемещения лазерного луча 0,5 м/мин

Предварительное улучшение способствует плавному снижению твердости от поверхностно упрочненной зоны лазерной обработки к сердцевине (рис. 12).

Таким образом, наилучшим способом предварительной термической обработки стали перед лазерной закалкой, является улучшение. Такой способ упрочнения поверхностного слоя способствует формированию достаточной зоны с высокими показателями твердости (7 ГПа) с плавным переходом к сердцевине, что в дальнейшем положительно сказывается при эксплуатации детали.

## Выводы

1. В отожженном состоянии применение лазерной закалки является не целесообразным из-за формирования неоднородной структуры.

2. Основной особенностью лазерной обработки предварительно закаленной стали заключается в обязательном проявлении структурной наследственности при нагреве.

3. На формирование упрочненной лазером зоны влияют такие факторы как скорость обработки лазерным лучом и мощность лазера. С увеличением мощности, глубина упрочненного слоя увеличивается, а увеличение скорости обработки носит противоположный характер.

4. Наилучшим способом предварительной термической обработки стали перед лазерной закалкой, является улучшение. Такой способ упрочнения поверхностного слоя способствует формированию достаточной зоны с высокими показателями твердости (7 ГПа) с плавным переходом к сердцевине, что в дальнейшем положительно сказывается при эксплуатации детали.

#### Список литературы

1. **Hahn, D. W.** Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields / **D. W. Hahn, N. Omenetto** // *Applied spectroscopy*. – 2012. – V. 66. – №. 4. – P. 347-419, doi:10.1366/11-06574
2. **Shimizu, M.** Mechanism of heat-modification inside a glass after irradiation with high-repetition rate femtosecond laser pulses / **M. Shimizu, M. Sakakura, M. Ohnishi, Y. Shimotsuma, T. Nakaya, K. Miura, K. Hirao** // *Journal of Applied Physics*. – 2010. – V. 108. – №. 7. – P. 073533, doi:10.1063/1.3483238
3. **Lobankova, O. V.** Influence of laser radiation on structure and properties of steel / **Lobankova, O. V., Zykov, I. Y., Melnikov, A. G., Turanov, S. B.** // *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering: Proceedings of the international Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering, Incheon, South Korea, May 29-31*. – 2015. – CRC Press. – 2016. – 75 p.
4. **Kenar, H.** Femtosecond laser treatment of 316L improves its surface nanoroughness and carbon content and promotes osseointegration: An in vitro evaluation / **Kenar, H., Akman, E., Kacar, E., Demir, A., Park, H., Abdul-Khalig, H., Karaoz, E.** // *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. – 2013. – V. 108. – P. 305-312. – doi:10.1016/j.colsurfb.2013.02.039.
5. **Okamuro, K.** Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation / **Okamuro, K., Hashida, M., Miyasaka, Y., Ikuta, Y., Tokita, S., Sakabe, S.** // *Physical Review B*. – 2010. – V. 82. – №. 16. – P. 165417. – doi:10.1103/PhysRevB.82.165417.
6. **Mahmoudi, B.** Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd: YAG laser / **Mahmoudi, B., Torkamany, M. J., Aghdam, A. S. R., & Sabbaghzade, J.** // *Materials & Design*. – 2010. – V. 31. – №. 5. – P. 2553-2560. doi:10.1016/j.matdes.2009.11.034
7. **Yang, J.** Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy / **Yang, J., Sun, S., Brandt, M., Yan, W.** // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2010. – V. 210. – №. 15. – P. 2215-2222. – doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.08.007.
8. **Idan, A. F. I.** The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels / **Idan, A. F. I., Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., Kostyk, K.** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – №. 5 (80). – P. 69-73. – doi:10.15587/1729-4061.2016.65455.
9. **Assunção, E.** Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry / **Assunção E., Quintino L., Miranda R.** // *The International Journal of Advanced*

- Manufacturing Technology*. – 2010. – V. 49. – №. 1-4. – P. 123-131. – doi:10.1007/s00170-009-2385-0.
10. **Mohanad, M. K.** Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding / **Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., & Kostyk, K.** // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – V. 2. – №. 5(80). – P. 45-49. – doi:10.15587/1729-4061.2016.65454

#### Bibliography (transliterated)

1. **Hahn, D. W., Omenetto, N.** Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS), part II: review of instrumental and methodological approaches to material analysis and applications to different fields. *Applied spectroscopy*, 2012, **66**(4), 347-419, doi:10.1366/11-06574.
2. **Shimizu, M., Sakakura, M., Ohnishi, M., Shimotsuma, Y., Nakaya, T., Miura, K., & Hirao, K.** Mechanism of heat-modification inside a glass after irradiation with high-repetition rate femtosecond laser pulses. *Journal of Applied Physics*, 2010, **108**(7), 073533, doi:10.1063/1.3483238.
3. **Lobankova, O. V., Zykov, I. Y., Melnikov, A. G., & Turanov, S. B.** Influence of laser radiation on structure and properties of steel. In *Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering: Proceedings of the international Conference on Advanced Materials, Structures and Mechanical Engineering, Incheon, South Korea, May 29-31*, 2016, 75 p.
4. **Kenar, H., Akman, E., Kacar, E., Demir, A., Park, H., Abdul-Khalig, H., Karaoz, E.** Femtosecond laser treatment of 316L improves its surface nanoroughness and carbon content and promotes osseointegration: An in vitro evaluation. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*, 2013, **108**, 305-312, doi:10.1016/j.colsurfb.2013.02.039.
5. **Okamuro, K., Hashida, M., Miyasaka, Y., Ikuta, Y., Tokita, S., Sakabe, S.** Laser fluence dependence of periodic grating structures formed on metal surfaces under femtosecond laser pulse irradiation. *Physical Review B*, 2010, **82**(16), 165417, doi:10.1103/PhysRevB.82.165417.
6. **Mahmoudi, B., Torkamany, M. J., Aghdam, A. S. R., & Sabbaghzade, J.** Laser surface hardening of AISI 420 stainless steel treated by pulsed Nd: YAG laser. *Materials & Design*, 2010, **31**(5), 2553-2560. doi:10.1016/j.matdes.2009.11.034.
7. **Yang, J., Sun, S., Brandt, M., Yan, W.** Experimental investigation and 3D finite element prediction of the heat affected zone during laser assisted machining of Ti6Al4V alloy. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, **210**(15), 2215-2222, doi:10.1016/j.jmatprotec.2010.08.007.
8. **Idan, A. F. I., Akimov, O., Golovko, L., Goncharuk, O., Kostyk, K.** The study of the influence of laser hardening conditions on the change in properties of steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**(5 (80)), 69-73, doi:10.15587/1729-4061.2016.65455.
9. **Assunção, E., Quintino, L., Miranda, R.** Comparative study of laser welding in tailor blanks for the automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2010, **49**(1-4), 123-131, doi:10.1007/s00170-009-2385-0.
10. **Mohanad, M. K., Kostyk, V., Domin, D., Kostyk, K.** Modeling of the case depth and surface hardness of steel during ion nitriding. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 2016, **2**(5 (80)), 45-49, doi:10.15587/1729-4061.2016.65454.

**Сведения об авторах (About authors)**

**Идан Алаа Фадил И** – аспирант, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», г. Харьков, Украина; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

**Idan Alaa Fadhil I** – PhD student, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

**Акимов Олег Викторович** – доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина, e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

**Oleg Akimov** – Doctor of technical Sciences, Professor, head of the Department, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: litvo11@kpi.kharkov.ua.

**Костик Екатерина Александровна** – кандидат технических наук, доцент, кафедра литейного производства, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт»; г. Харьков, Украина, e-mail: eklitus@yandex.ru.

**Kateryna Kostyk** – Candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of Foundry production, National technical University «Kharkiv Polytechnic Institute», Kharkiv, Ukraine; e-mail: eklitus@yandex.ru.

**Гончарук Алексей Александрович** – кандидат технических наук, доцент, кафедра лазерной техники и физико-технических технологий, Национальный технический университет «Киевский политехнический институт»; г. Киев, Украина, e-mail: goncharuk.alex@gmail.com.

**Goncharuk Olexiy** – Candidate of technical Sciences, associate Professor, Department of Laser technique and physic-technology science department, National technical university of Ukraine «Kiev polytechnic institute», Kiev, Ukraine; e-mail: goncharuk.alex@gmail.com.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Идан, А. Ф. И.** Влияние предварительной термической обработки и режимов лазерной закалки на структурообразование стали / **А. Ф. И. Идан, О. В. Акимов, Е. А. Костик, А. А. Гончарук** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 66-73. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.10.

*Please cite this article as:*

**Idan Alaa Fadhil I, Akimov, O., Kostyk, K., Goncharuk, O.** The influence of pre-heat treatment and laser hardening on the steel structure formation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 66-73, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.10.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Идан, А. Ф. И.** Вплив попередньої термічної обробки та режимів лазерного гартування на структуроутворення сталі / **А. Ф. І. Идан, О. В. Акімов, К. О. Костик, О. О. Гончарук** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 66-73. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.10.

**АННОТАЦИЯ** Метою даної роботи є вивчення впливу різних видів попередньої термічної обробки і режимів лазерного гартування на структуроутворення зміцненої зони сталі 40. Показано, що найкращим способом попередньої термічної обробки сталі перед лазерним гартуванням, є поліпшення. Такий спосіб зміцнення поверхневого шару сприяє формуванню достатньої зони з високими показниками твердості (7 ГПа) з плавним переходом до серцевини, що в подальшому позитивно позначається при експлуатації деталі. На формування зміцненої лазером зони впливають такі фактори, як швидкість обробки лазерним променем і потужність лазера. При збільшенні потужності, глибина зміцненого шару збільшується, а збільшення швидкості обробки носить протилежний характер.

**Ключові слова:** лазерне гартування, поліпшення, глибина зміцненого шару, твердість, структура сталі

*Поступила (received) 08.05.2016*

## РЕОЛОГІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ВУГЛЕЦЕВИХ КОМПОЗИЦІЙ В ДІАПАЗОНІ ТЕМПЕРАТУРИ 120-170 °С

А. Я. КАРВАЦЬКИЙ<sup>1\*</sup>, Т. В. ЛАЗАРЄВ<sup>2</sup>, Д. Г. ШВАЧКО<sup>1</sup>, О. С. ТИЩЕНКО<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, НТУУ «КПІ», Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup> НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», НТУУ «КПІ», Київ, УКРАЇНА

\*email: admin@rst.kpi.ua

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто різні способи визначення ефективної динамічної в'язкості вуглецевих композитних матеріалів на основі пеку як зв'язувального та термообробленої вуглецевої сировини в якості наповнювача. Запропоновано методику та розроблено дослідну установку, що дає змогу проводити вимірювання в'язкості в широкому діапазоні температури. Визначено температурні залежності динамічної в'язкості різних за складом вуглецевих композицій.

**Ключові слова:** в'язкість, реологічні властивості, в'язко-пластичний матеріал, рідина Bingham, вуглецева композиція, електродна маса.

## RHEOLOGICAL PROPERTIES OF CARBON COMPOSITION WITHIN TEMPERATURE RANG 120-170 °C

A. KARVATSKII<sup>1\*</sup>, T. LAZARIEV<sup>2</sup>, D. SHVACHKO<sup>1</sup>, O. TYSHCHENKO<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Department of chemical, polymer and silicate engineering, NTUU "KPI", Kiev, Ukraine

<sup>2</sup> Research center "Resource-saving technologies", NTUU "KPI", Kiev, Ukraine

**ABSTRACT** Carbon production is widely used in chemical and metallurgic industries. Particularly, electrode mass is used in forming of permanent self baking electrode (Soderberg's electrode) in electrical and thermal furnaces of ferrous and non-ferrous metallurgy. Elements of electric furnaces constructions, for instance, electrolysis units, are made of carbon blocks. Manufacturing of such class of products includes multistage technological process and during each stage monolithic product is formed out of powder filler and liquid binder. The given materials have unique physical properties: high thermal conductivity, thermal stress resistance, chemical inertia. That is the reason why it is so widely used in industry. Different methods of measurement of rheological properties of carbon composites were discussed, particularly, it concerns non-Newton liquids, such as Bingham liquid. The method and developed investigation equipment enables us to measure viscosity within wide temperature range. The method is based on locating the spherical body in viscous environment under definite isothermal temperature. It's possible to measure effective dynamic viscosity up to 107 Pa·s within temperature range up to 800 °C. Estimated error of experimental research does not exceed 10–15%. Having made the research, thermal dependence on effective factor of dynamic viscosity within temperature range 120–170 °C was found out. It concerns carbon composite materials where coke is used as a binder and thermally processed carbon material are used as a filler.

**Keywords:** viscosity, rheological properties, visco-plastic material, Bingham liquid, carbon composition, electrode mass

### Вступ

Вуглецева продукція широко застосовується в хімічній та металургійній галузях промисловості. Зокрема, електродна маса використовується для формування неперервного самовипалювального електроду (електрод Содерберга) в електротермічних печах чорної та кольорової металургії. Елементи конструкцій електричних печей, наприклад, алюмінієвих електролізерів, виготовляються з вуглецевих блоків. Виробництво даного класу продукції передбачає багатоступінчастий технологічний процес, на різних етапах якого із сипкого наповнювача та рідкого зв'язувального формується монолітний виріб. Дані матеріали мають унікальні фізичні властивості: високу електропровідність, здатність витримувати значні термічні навантаження, хімічну інертність, що обумовило їх широке використання в промисловості.

Для отримання монолітного вуглецевого блоку

термооброблений та подрібнений наповнювач (антрацит, кокс) змішують з нафтовим чи кам'яновугільним пеком. Цей процес відбувається в спеціальних змішувачах за температури вищої ніж температура розм'якшення пеку (160–170 °С). Одержана вуглецева маса являє собою композитний матеріал, який проявляє в'язко-пластичні властивості, завдяки чому на етапі формування є можливим надання йому необхідної форми та геометричних розмірів. Подальше високотемпературне оброблення призводить до коксування зв'язувального та утворення монолітної структури виробу [1].

### Ціль роботи

Склад та будова вуглецевого композиту обумовлює його в'язко-пластичні властивості, що залежать від температури. Тому загально науковою проблемою є визначення зв'язку між властивостями компонентів та ефективними властивостями їх суміші

під час нагрівання та формування. Невирішеною частиною наукової проблеми є експериментальне визначення ефективної динамічної в'язкості вуглецевої маси в широкому діапазоні температур, що відповідають технологічним умовам виробництва вуглевмісної продукції.

Метою даної статті є створення експериментальної установки та визначення ефективної динамічної в'язкості різних за складом вуглецевих мас у широкому діапазоні температур

### Виклад основного матеріалу

Під час формування вуглецевої маси, матеріал проявляє неньютонівські властивості, що можуть бути описані моделлю в'язко-пластичної рідини Bingham [2, 3]. Для в'язко-пластичної рідини характерною особливістю є те, що вона до досягнення деякого критичного внутрішнього напруження веде себе як тверде тіло і тільки за умови перевищення значення внутрішнього напруження деякої критичної величини починає рухатися як звичайна рідина. Причиною такого явища є те, що в'язко-пластична рідина має просторову жорстку внутрішню структуру, що чинить опір будь-яким внутрішнім напруженням меншим за критичну величину  $\tau_{\text{shear}}$ . Для двовимірного випадку зсувного руху модель в'язкості Bingham має вигляд:

$$\begin{cases} \boldsymbol{\tau} = \tau_{\text{shear}} + \mu_{\text{eff}} \dot{\boldsymbol{\gamma}}, & |\boldsymbol{\tau}| > \tau_{\text{shear}}; \\ \dot{\boldsymbol{\gamma}} = 0, & |\boldsymbol{\tau}| \leq \tau_{\text{shear}}, \end{cases} \quad (1)$$

де  $\boldsymbol{\tau}$  – вектор напруження зсуву, Па;  $\tau_{\text{shear}}$  – критичне напруження зсуву (статичне напруження зсуву), Па;  $\mu_{\text{eff}}$  – ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості, Па·с;  $\dot{\boldsymbol{\gamma}}$  – швидкість деформації, с<sup>-1</sup>.

Робочий діапазон температури, що використовується на етапах змішування та формування вуглевмісної маси, становить 120–170 °С. Відомо, що даний матеріал має високе значення коефіцієнта ефективної динамічної в'язкості, який знижується з підвищенням температури [2]. Тому особливий інтерес представляють дослідження саме в цьому діапазоні.

Серед основних способів визначення динамічної в'язкості композитних матеріалів слід відмітити методи з використанням циліндричного ротаційного віскозиметра та клас методів із зануренням у матеріал певного геометричного об'єкту.

В роботах [4–6] досліджено температурні залежності зсувних напружень від швидкості деформації для коксопекової суміші в діапазоні 160–220 °С. Автори досліджують суміш, що складається з 55 % пеку та 45 % коксу, різної фракції та використовують коаксіальний циліндричний віскозиметр. В результаті встановлено, що для даного складу вуглецевої маси та діапазону температури

критичне напруження зсуву і ефективний коефіцієнт динамічної в'язкості складають відповідно:  $\tau_{\text{shear}} = 2-4$  Па;  $\mu_{\text{eff}} = 2-18$  Па·с. Отримані дані свідчать, що високий вміст зв'язувального за температури вищої за 160 °С, призводять до значного зниження динамічної в'язкості матеріалу.

В роботі [7, 8] представлено методику визначення реологічних властивостей вуглецевих композицій, що ґрунтується на екструзії матеріалу на лабораторному пресі. Дослідження проведені за температури 120 °С для сумішей, які містять 50, 45, 40, 38 % зв'язувального. Отримані результати показують, що досліджуваний матеріал має  $\tau_{\text{shear}} = (2,1-7,5) \cdot 10^5$  Па;  $\mu_{\text{eff}} = (2,1-20) \cdot 10^5$  Па·с, при цьому найвищі значення в'язкості та напруження зсуву характерні для низького вмісту наповнювача.

В [9] для дослідження критичного напруження зсуву застосовується метод занурення конуса. Розглянуто електродну масу з вмістом зв'язувального від 39,6 % до 30 % при ізостатичній температурі 110 °С. Показано, що становить  $\tau_{\text{shear}} = (4,5-32) \cdot 10^5$  Па.

Автори [10] досліджували ефективну динамічну в'язкість за допомогою ротаційного лопатевого віскозиметра для електродної маси (19 % зв'язувального) в діапазоні температури 100–260 °С. Визначено, що  $\mu_{\text{eff}} = (0,22-2,14) \cdot 10^4$  Па·с.

Представлені літературні дані в певній мірі корелюються між собою, проте не є вичерпними, тому інтерес представляє розроблення методики та проведення експериментальних досліджень для вуглецевих композитів, які використовуються для виготовлення подових блоків та електродів Содерберга.

Враховуючи значну динамічну в'язкість вуглецевої маси в робочому діапазоні температури змішування та формування виробів, застосування методу занурення геометричного об'єкту є раціональним способом для визначення фізичних властивостей даних матеріалів.

Відомо, що під час руху тіла у в'язкому середовищі виникають сили опору. За невеликої швидкості, коли за тілом не формуються турбулентні вихори, сила опору зумовлена лише в'язкістю середовища. У цьому випадку прилегли до тіла шари рідини рухаються разом з об'єктом, що призводить до утворення сил, які гальмують відносний рух тіла та середовища. Для тіл сферичної форми сила опору визначається за законом Стокса:

$$\mathbf{F} = 3\mu_{\text{eff}} D \mathbf{u}, \quad (2)$$

де  $D$  – діаметр сфери, м;  $\mathbf{u}$  – вектор швидкості руху середовища, м/с.

На сферу, що рухається, діють три сили: сила тяжіння, сила Архімеда та сила опору. Перші дві є незмінними, а сила опору прямо пропорційна швидкості, тому на початковому етапі занурення сфери в середовище, вона менша за силу тяжіння, що

призводить до рівноприскореного руху кулі. Проте, через певний час настає момент рівноваги всіх трьох сил, тоді сфера рухається зі сталою швидкістю, яка визначається співвідношенням:

$$V = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_f)}{\mu_{\text{eff}}} g D^2, \quad (3)$$

де  $\rho_s$  – густина сфери, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho_f$  – густина середовища, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  – прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

Для випадку усталеного занурення сфери у в'язке середовище  $u_z = V_z = h / \tau$ , де  $h$  – відстань (м), що проходить сфера за час  $\tau$  (с),  $u_z$  – вертикальна компонента вектора швидкості середовища, м/с;  $V_z$  – вертикальна компонента вектора швидкості сфери, м/с. Тоді

$$\mu_{\text{eff}} = \frac{1}{18} \frac{(\rho_s - \rho_f)}{h} g_z D^2 \tau, \quad (4)$$

де  $g_z$  – вертикальна компонента вектора прискорення вільного падіння, м/с<sup>2</sup>.

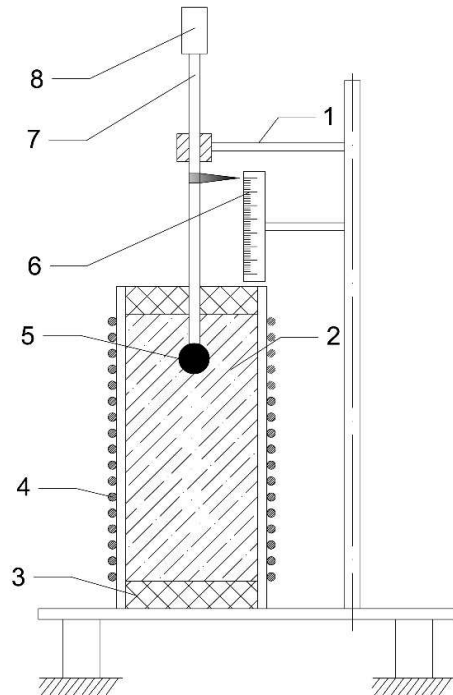
Отже коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості розраховується за виразом (4), якщо для відомих значень густини середовища та матеріалу сфери за результатами експериментальних вимірів визначити час  $\tau$ , за який сфера діаметром  $D$  проходить відстань  $h$  за умови сталої швидкості кулі.

З використанням описаної методики визначення динамічної в'язкості вуглецевої маси розроблено експериментальну установку (рис. 1), що дає змогу вимірювати коефіцієнт динамічної в'язкості до 10<sup>7</sup> Па·с в діапазоні температури до 800 °С. Оцінена похибка експериментальних досліджень не перевищує 10–15 %.

Установка являє собою теплоізолюваний циліндр діаметром 120 мм та довжиною 500 мм, з регульованим електричним периферійним нагрівником, що заповнюється досліджуваною масою. У циліндр опускається гладка сталеві куля діаметром 12 мм з'єднана з навантажувальною штангою для розміщення додаткової ваги. Реєструючи час та переміщення індикатора занурення кулі, визначається момент встановлення сталої швидкості та її значення. Коефіцієнт динамічної в'язкості розраховується за формулою (4).

Для проведення досліджень на розробленій експериментальній установці обрано три види вуглецевого композиційного матеріалу: вуглецева маса № 1 – 22±2 % зв'язувального; вуглецева маса № 2 – 27,6±2 % зв'язувального; електродна маса – 25±3 % зв'язувального. Склад досліджуваних зразків наведено в табл. 1.

Експериментальні дослідження проведені для діапазону температури від 110 °С до 190 °С. Результати вимірів коефіцієнта динамічної в'язкості та апроксимуючі функції представлені на рис. 2-4.



1 – штатив; 2 – досліджуваний матеріал; 3 – теплоізоляція; 4 – периферійний нагрівник; 5 – сталеві куля; 6 – індикатор переміщення; 7 – навантажувальна штанга; 8 – додаткова вага

Рис. 1 – Експериментальна установка для вимірювання коефіцієнта динамічної в'язкості вуглецевих композитних матеріалів

Таблиця 1 – Склад досліджуваних зразків вуглецевої маси

Зразок маси	Вміст зв'язувального, %	Наповнювач	
		Складові наповнювача	Вміст, %
Вуглецева маса № 1	22±2	Термооброблений антрацит, фракція (0–6) мм	70
		Графітована вуглецева сировина, фракція (0–6) мм	30
Вуглецева маса № 2	27,6±2	Графітована вуглецева сировина, фракція (0–10) мм	70
		Графітована вуглецева сировина, фракція (0–0,05) мм	30
Електродна маса	25±3	Термооброблений антрацит, фракція (0–16) мм	70
		Термооброблена вуглецеві сировина, фракція (0–0,5) мм	30



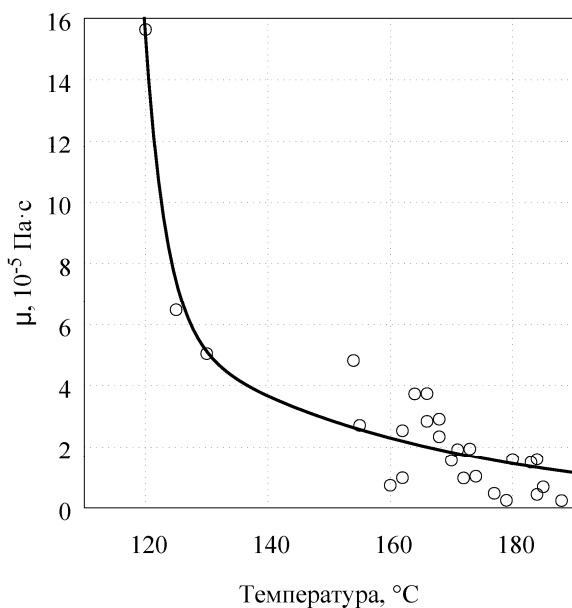


Рис. 2 – Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості для вуглецевої маси № 1,  $R^2 = 0,79$

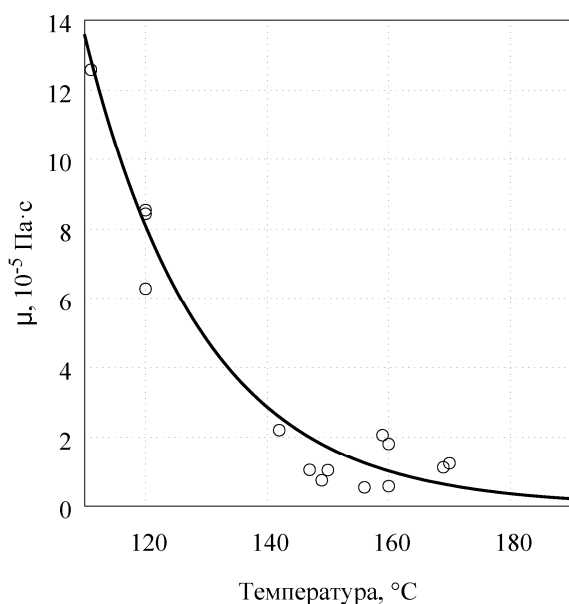


Рис. 3 – Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості для вуглецевої маси № 2,  $R^2 = 0,9$

Визначено, що в діапазоні температури від 120 °С до 170 °С коефіцієнт ефективної динамічної в'язкості для різних вуглецевих мас складає:  $(15,37-1,826) \cdot 10^5$  Па·с для вуглецевої маси № 1;  $(8,085-0,609) \cdot 10^5$  Па·с для вуглецевої маси № 2;  $(1,18-0,0518) \cdot 10^5$  Па·с для електродної маси. Отримані залежності мають експоненціальний характер, що знижується зі зростанням температури.

Найбільш суттєвий вплив на в'язкість має вміст зв'язувального в масі. Так, завдяки підвищенню

масової частки пеку в суміші на 5 %, в'язкість знижується майже вдвічі. Окрім того, суттєвим є вплив наявності в рецептурі крупної фракції більшої за 10 мм, що відзначається для електродної маси.

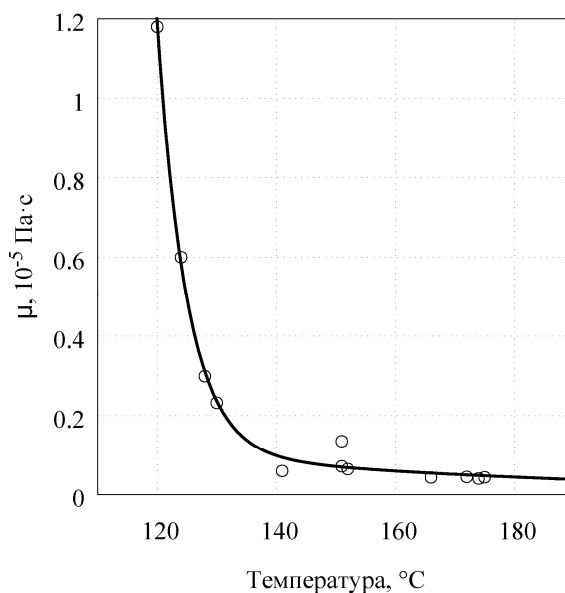


Рис. 4 – Температурна залежність коефіцієнта динамічної в'язкості для електродної маси,  $R^2 = 0,99$

## Висновки

В роботі розглянуто різні методики вимірювання реологічних властивостей вуглецевої композиції, що відноситься до неньютонівських рідин, зокрема до рідини Bingham. Запропоновано методику та розроблено дослідну установку, що дає змогу проводити вимірювання в'язкості в широкому діапазоні температури. Спосіб ґрунтується на зануренні сферичного тіла у в'язке середовище, що знаходиться за певної ізотермічної температури. Проведено дослідження та визначено температурні залежності ефективного коефіцієнта динамічної в'язкості вуглецевих композитних матеріалів на основі пеку як зв'язувального та термообробленої вуглецевої сировини в якості наповнювача.

## Список літератури

- 1 Sang-Min Lee Bulk graphite: materials and manufacturing process / Sang-Min Lee, Dong-Su Kang and Jea-Seung Roh // Carbon Letters. – 2015. – Vol. 16, № 3. – P. 135-146. – doi:10.5714/CL.2015.16.3.135.
- 2 Hlatshwayo, S. R. Rheological behavior and thermal properties of pitch/poly vinyl chloride blends / S. R. Hlatshwayo, Focke, W. W. Walter, S. Ramjee, B. Rand, N. Manyala // Carbon. – 2013. – Vol. 51. – P. 64-71. – doi:10.1016/j.carbon.2012.08.012.
- 3 Лазарев, Т. В. Математическая модель процесса экструзии вязко-пластичной углеродной массы / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые

- решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 31-37. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.
- 4 **Kravtsova, E. D.**, Plastic properties of pitch-coke compositions / **E. D. Kravtsova, E. M. Gil'debrandt, V. K. Frizorger** // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2009. – № 50 (2). – P. 114-117. – doi:10.3103/S1067821209020072
  - 5 **Vershinina, E. P.** Plastic properties of homogenized coke-pitch compositions / **E. P. Vershinina, E. M. Gil'debrandt, V. K. Frizorger** // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2011. – Vol. 52, Issue 3. – P. 205-208. doi:10.3103/S1067821211030230.
  - 6 **Gildebrandt, E. M.** The Viscosity of Pitches and Coke Pitch Compositions / **E. M. Gildebrandt, V. K. Frizorger, E. P. Vershinina, E. D. Kravtsova** // *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*. – 2008. – Vol. 49, Issue 6. – P. 456-458. – doi:10.3103/S1067821208060047.
  - 7 **Bhatia, G.** Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer / **G. Bhatia** // *Carbon*. – 1973. – Vol. 11, Issue 5. – P. 437-440. – doi:10.1016/0008-6223(73)90301-1.
  - 8 **Bhatia, G.** Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer-IV / **G. Bhatia** // *Carbon*. – 1976. – Vol. 14, Issue 6. – P. 319-321. – doi:10.1016/0008-6223(76)90003-8.
  - 9 **Фялков, А. С.** Процессы и аппараты производства порошковых углеродистых материалов / **А. С. Фялков**. – М.: Аспект Пресс. – 2008. – 687 с. ISBN 978-5-7567-0490-7.
  - 10 **Шуваев, Э. А.** О коэффициенте внутреннего трения электродных масс в процессе обжига / **Э. А. Шуваев, Г. В. Дмитриев** // *Сборник трудов челябинского электрометаллургического комбината*. – 1971. – № 3. – С. 195-199.

**Bibliography (transliterated)**

- 1 **Sang-Min Lee, Dong-Su Kang and Jea-Seung Roh** Bulk graphite: materials and manufacturing process. *Carbon Letters*, 2015, **16**(3), 135-146, doi:10.5714/CL.2015.16.3.135.
- 2 **Hlatshwayo, S. R., Focke, W. W., Ramjee, S., Rand B., Manyala, N.** Rheological behavior and thermal properties of pitch/poly vinyl chloride blends. *Carbon*, 2013, **51**, 64-71, doi:10.1016/j.carbon.2012.08.012.
- 3 **Lazariev, T., Karvatskii, A., Leleka, S., Pedchenkon, A.** The mathematical model of extrusion of viscoplastic carbon composition. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*, 2016, **12**, 31-37. doi:10.20998/2413-4295.2016.12.05.
- 4 **Kravtsova, E. D., Gil'debrandt, E. M., Frizorger, V. K.** Plastic properties of pitch-coke compositions. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2009 **50**(2), 114-117. http://doi.org/10.3103/S1067821209020072.
- 5 **Vershinina, E. P., Gil'debrandt, E. M., Frizorger, V. K.** Plastic properties of homogenized coke-pitch compositions. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2011, **52**(3), 205-208. doi:10.3103/S1067821211030230.
- 6 **Gildebrandt, E. M., Frizorger V. K., Vershinina E. P., Kravtsova E. D.** The Viscosity of Pitches and Coke Pitch Compositions. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2008, **49**(6), 456-458, doi:10.3103/S1067821208060047.
- 7 **Bhatia, G.** Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer. *Carbon*, 1973, **11**(5), 437-440. doi:10.1016/0008-6223(73)90301-1.
- 8 **Bhatia, G.** Rheological properties of carbon mixes using a capillary rheometer-IV. *Carbon*, 1976, **14**(6), 319-321, doi:10.1016/0008-6223(76)90003-8.
- 9 **Fialkov, A. S.** Processy i apparaty proizvodstva poroshkovykh uglegrafitovykh materialov. M: Aspekt Press, 2008, 687 p., ISBN 978-5-7567-0490-7.
- 10 **Shuvaev, Je. A., Dmitriev, G. V.** O koefefficente vnutrennego trenija jelektroodnykh mass v processe obzhiga. *Sbornik trudov cheljabinskogo jelektrometallurgicheskogo kombinata*, 1971, **3**, 195-199.

**Відомості про авторів (About authors)**

**Карвацький Антон Янович** – доктор технічних наук, професор, старший науковий співробітник, професор, кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

**Anton Karvatskii** – Doctor of Science (D. Sc.), Professor, Senior Researcher, Professor, Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: anton@rst.kpi.ua.

**Лазарєв Тарас Валерійович** – кандидат технічних наук, науковий співробітник, НДЦ «Ресурсозберігаючі технології», Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: t\_lazarev@rst.kpi.ua.

**Taras Lazariev** – Candidate of Sciences (Ph. D.), Researcher, Research center "Resource-saving technologies", National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: t\_lazarev@rst.kpi.ua.

**Швачко Денис Григорович** – завідувач лабораторії, кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: max\_shmag@ukr.net.

**Denis Shvachko** – head of the laboratory, Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: max\_shmag@ukr.net.

**Тищенко Олена Сергіївна** – магістр, кафедра хімічного, полімерного і силікатного машинобудування, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: missislen0k@yandex.ua.

**Olena Tyshchenko** – magister, Department of chemical, polymer and silicate engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kiev, Ukraine; e-mail: missislen0k@yandex.ua.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Карвацький, А. Я.** Реологічні властивості вуглецевих композицій в діапазоні температури 120-170 °С / **А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарев, Д. Г. Швачко, О. С. Тищенко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 74-79. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.11.

*Please cite this article as:*

**Karvatskii, A., Lazarev, T., Shvachko, D., Tyshchenko, O.** Rheological properties of carbon composition within temperature rang 120-170 °C. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18 (1190)**, 74-79, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.11.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Карвацкий А. Я.** Реологические свойства углеродных композиций в диапазоне температуры 120-170 °С / **А. Я. Карвацкий, Т. В. Лазарев, Д. Г. Швачко, Е. С. Тищенко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 74-79. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.11.

**АННОТАЦИЯ** Рассмотрено различные способы определения эффективной динамической вязкости углеродных композитных материалов на основе пека как связующего и термообработанного углеродного сырья в качестве наполнителя. Предложена методика и разработана исследовательская установка, которая позволяет проводить измерение вязкости в широком диапазоне температуры. Определены температурные зависимости разных по составу углеродных композиций.

**Ключевые слова:** вязкость, реологические свойства, вязко-пластический материал, жидкость Bingham, углеродная композиция, электродная масса.

*Поступила (received) 21.04.2016*

УДК 621.66-762

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.12

**ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ІМПУЛЬСНОГО ТОРЦЕВОГО УЩІЛЬНЕННЯ****Е. Г. КУЗНЕЦОВ\***

Кафедра «Комп'ютерні науки», Сумський державний університет, Суми, УКРАЇНА  
\*email: kuznets.ed@mail.ru

**АНОТАЦІЯ** Розроблена математична модель імпульсного торцевого ущільнення, яка враховує можливість подачі стиснуваного затворного середовища безпосередньо в робочий зазор через живильні канали. Модель може бути використана для визначення основних динамічних характеристик ущільнення та визначення реакції рухомого торцевого кільця на вхідні гармонійні зміни зовнішніх впливів. В моделі застосований чисельний метод граничних елементів, за допомогою якого визначено розподіл тиску в торцевому зазорі ущільнення.

**Ключові слова:** імпульсне ущільнення, динамічні характеристики, метод граничних елементів, рівняння Рейнольдса

**DYNAMIC MODEL OF PULSE MECHANICAL SEAL****E. KUZNETSOV\***

Department of Computer Science, Sumy State University, Sumy, UKRAINE  
\*email: kuznets.ed@mail.ru

**ABSTRACT** Double mechanical shafts seals with gas lubrication constructions are widely used in modern machine engineering for sealing the centrifugal machines, pumping aggressive, cryogenic substances and the melts. These constructions mainly use creating and maintaining a stable value for gas-dynamic method and the special microgrooves to draw the barrier gas into sealing gap are shaped to draw the barrier gas into the sealing gap. This article deals with the mathematical model of the pulse gas-barrier mechanical seal dynamics that synchronically use both gas-static and gas-dynamic methods of maintaining the contactless mode of operation, and is out of the disadvantages inherent for seals with microgrooves. The aim of this work is to develop a mathematical model of pulse seal functioning dynamics. The object of the research is the workflow of the seal. It is necessary to complement the existing method of pulse seals parameters calculation, and propose a methodology of operation gap pressure distribution calculation for achieve the objectives of the study. This model applies the numerical boundary element method, which allows to determine the pressure distribution in the operation gap due to the Reynolds equation. The model can be used to define the response of the movable face ring for the harmonic changes of external influences as well as for the frequencies risky range identification and for selecting such parameters of the seal where the movable ring oscillation amplitude would not be exceed by the allowable limits.

**Keywords:** pulse seal, dynamic characteristics, boundary element method, Reynolds equation

**Вступ**

В теперішній час в обладнанні хімічних виробництв широко використовуються подвійні торцеві ущільнення на рідинному змащенні, проте останнім часом провідні зарубіжні компанії розробили та застосовують цілий ряд конструкцій подвійних ущільнень на газовому змащенні для насосів і апаратів хімічних виробництв, які за своїми експлуатаційними характеристиками значно перевершують «рідинні» ущільнення [1–6]. Переважна більшість цих ущільнень використовують газодинамічний принцип дії, тобто на торцевих ущільнювальних поясах їх кільця виконані спеціальні мікроканавки, які при обертанні створюють газодинамічну силу, що забезпечує безконтактне функціонування цих ущільнень з мікронним робочим зазором [5, 6]. Вітчизняною альтернативою описаним патентованим конструкціям може стати імпульсне торцеве ущільнення, яке доповнене підводом затворного газу через живильні

канали в область робочого торцевого зазору. Така газозатворна конструкція з однією парою ущільнювальних кільць здатна виконувати функції подвійного газового ущільнення.

**Постановка проблеми**

На даний момент у спеціальній літературі [7] описана методика розрахунку характеристик незатворних імпульсних ущільнень на рідинному змащенні. Проведений комплекс експериментальних досліджень газозатворних імпульсних ущільнень [8, 9] дає матеріал для узагальнення існуючої методики та створення математичної моделі динаміки імпульсних ущільнень.

**Мета роботи**

Метою даної роботи є розробка математичної моделі динаміки функціонування імпульсного ущільнення. Об'єктом дослідження є робочий процес

ущільнення. Для досягнення мети потрібно вирішити наступні завдання:

- доповнити існуючу методику розрахунку характеристик імпульсного ущільнення на випадок газового змащення та підведення газу в робочий зазор;
- запропонувати методику обчислення розподілу тиску в робочому зазорі для режиму газового змащення.

### Модель функціонування імпульсного ущільнення

Під час роботи ущільнення під дією сукупності сил, прикладених до торцевої і тильної поверхонь рухомого в осьовому напрямку ущільнювального кільця, останнє зміщується і займає таке положення, при якому сума сил, що діють на його торцеву поверхню  $F_s$ , врівноважується сумою сил, що діють на тильну поверхню  $F_c$ . Рівняння руху ущільнювального кільця має вигляд:

$$m\ddot{x} + c\dot{x} + k(\Delta + x) = F. \quad (1)$$

Тут  $x$ ,  $\dot{x}$  і  $\ddot{x}$  — відповідно зміщення, швидкість зміщення і прискорення рухомого в осьовому напрямку ущільнювального кільця;  $m$  — маса кільця;  $c$  — коефіцієнт опору руху, який дорівнює динамічній в'язкості газу;  $k$  — жорсткість пружин;  $\Delta$  — попереднє підтискання пружин;  $F = F_s - F_c$  — результуюча діючих на кільце сил  $F_s$  і  $F_c$ , величини яких визначаються епіорами тисків, що діють на відповідні поверхні рухомого кільця (рис. 1).

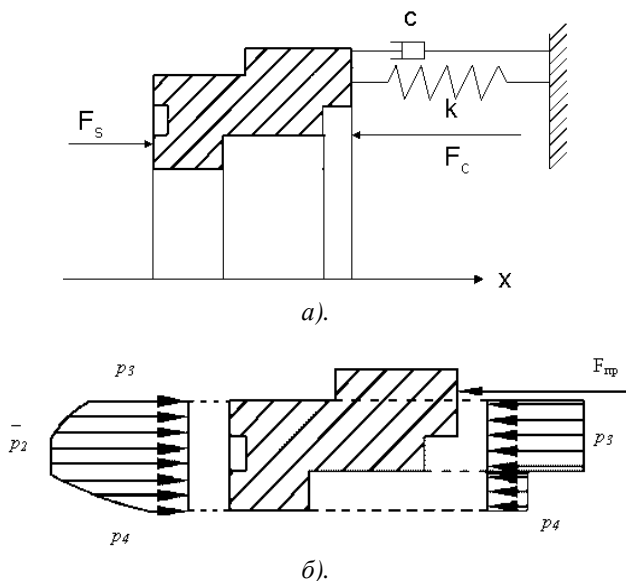


Рис. 1 – Розрахункова схема ущільнення (а) і епіора навантаження на рухоме кільце (б).

### Динамічна модель імпульсного ущільнення

Для вирішення (1) додатково розглядається рівняння робочого процесу ущільнення — баланс масових витрат газу через торцевий зазор ущільнення з центральним кутом  $\alpha_k$ , рівним кутовому розміру камери (рис. 2).

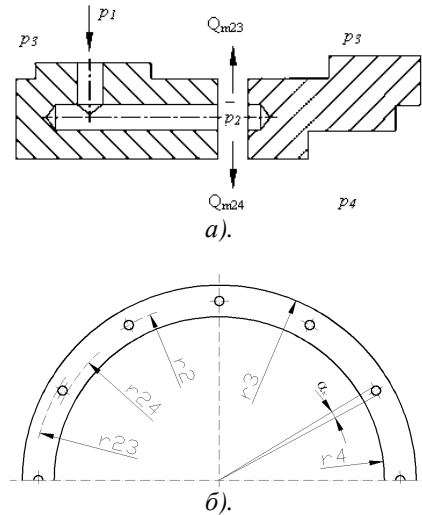


Рис. 2 – Схема течії газу а) та геометричні характеристики торцевого зазору б) в газозатворному імпульсному ущільненні

При роботі ущільнення затворний газ потрапляє в камеру тільки при сполученні її з живильним каналом, тому баланс витрат газу з камери в ущільнювальну порожнину машини і в атмосферу буде визначатися виразом:

$$Q_{m12} t_2 = Q_{m23} (T - t_2) + Q_{m24} (T - t_2) + Q_{\Delta V} + Q_{\Delta p}, \quad (2)$$

де  $Q_{m23}$  — масова витрата затворного газу з камери в ущільнювальну порожнину через зовнішній торцевий дросель з центральним кутом  $\alpha_k$ , обмежений радіусами  $r_3$  і  $r_{23}$  за час  $T - t_2$ ;  $Q_{m24}$  — масова витрата затворного газу з камери в навколишнє середовище через внутрішній торцевий дросель з кутом  $\alpha_k$ , радіусами  $r_{24}$  і  $r_4$  за час  $T - t_2$ ;  $Q_{\Delta V}$  — витрати на витіснення газу з зазору;  $Q_{\Delta p}$  — витрати на стиск газу в камерах при зміні тиску, що викликається коливаннями зазору;  $Q_{m12}$  — витрати на стиск газу в замкнутій камері під час упорскування газу з живильного каналу в камеру (живлення) за час  $t_2$ ;  $T$  — час між двома послідовними суміщеннями камери з живильним каналом;  $t_2$  — час, протягом якого камера з'єднана з живильним каналом.

Рівняння балансу витрат записується через геометричні характеристики торцевого зазору [7]:

$$g_{m12} (p_1 - \bar{p}_2) = g_{m23} (\bar{p}_2^2 - p_3^2) + g_{m24} (\bar{p}_2^2 - p_4^2) + g_{mV} \dot{x} + g_{mp} \dot{\bar{p}}_2, \quad (3)$$

де  $g_{m23}(r_3, r_{23}, x, \alpha_k, \mu)$  і  $g_{m24}(r_4, r_{24}, x, \alpha_k, \mu)$  – провідності відповідно зовнішнього і внутрішнього торцевих дроселів (ділянок зазору, обмежених радіусами  $r_3$  і  $r_{23}$ , та радіусами  $r_{24}$  і  $r_4$ );  $g_{m12}(V_k, T)$ ,  $g_{m12}(V_k, T)$  и  $g_{mp}(V_k, T)$  – «провідності» камери і витіснення газу з зазору;  $p_1, \bar{p}_2, p_3, p_4$  – тиски затворного середовища, в камерах і проміжках між камерами, ущільнювальної порожнини машини і за ущільненням відповідно.

Рівняння динаміки системи можна отримати, поєднавши рівняння (1) і (3) в безрозмірну залежність. З цією метою в розрахунок вводяться базові величини торцевого зазору  $x = x_b$ , тиску затворного середовища  $p_1 = p_b$  і кутовий швидкості  $\omega = \omega_b$  на номінальному режимі роботи ущільнення. Тоді, виражаючи провідності через базові величини, можна записати:

$$g_{m12b} \Omega(\psi_1 - \psi_2) = g_{m23b} u^3 (\psi_2^2 - \psi_3^2) + g_{m24b} u^3 (\psi_2^2 - \psi_4^2) + g_{m\Delta Vb} \cdot \dot{u} + g_{m\Delta pb} \cdot \dot{\psi}_2 \quad (4)$$

де  $\psi_1 = p_1/p_b$ ,  $\psi_2 = \bar{p}_2/p_b$ ,  $\psi_3 = p_3/p_b$ ,  $\psi_4 = p_4/p_b$  – безрозмірні тиски.

Для знаходження  $\bar{p}_2$  використано чисельне рішення відомого з гідродинамічної теорії змачення рівняння Рейнольдса, яке пов'язує функцію тиску змащувального середовища  $p(y, z)$  з товщиною його шару  $x$ , його в'язкістю  $\mu$ , щільністю  $\rho$  та швидкістю руху однієї з поверхонь, які обмежують мастильний шар  $U$  [10]:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( \rho x^3 \frac{\partial p}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho x^3 \frac{\partial p}{\partial z} \right) = 6\mu \frac{\partial(p x U)}{\partial y} + 12\mu \frac{\partial(p x)}{\partial t} \quad (5)$$

Рішення (5) виконано сучасним чисельним методом граничних елементів [11, 12]. Позначивши  $\rho = p^\kappa$  ( $\kappa$  – показник політропи) і поклавши в першому наближенні, що режим течії газу в зазорі з часом не змінюється ( $\partial P/\partial t = 0$ ), можна переписати (5) у вигляді:

$$\frac{\partial}{\partial y} \left( x^3 \frac{\partial p^{\frac{1+\kappa}{\kappa}}}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( x^3 \frac{\partial p^{\frac{1+\kappa}{\kappa}}}{\partial z} \right) = 6 \left( \frac{1}{\kappa} + 1 \right) \frac{\partial}{\partial y} \left( U p^{\frac{1}{\kappa}} x \right) \quad (6)$$

Для знаходження рішення (6) можна скористатися наступним методом: знайти рішення без правої частини, а потім з отриманого загального рішення відняти часткове рішення (праву частину), не залежне від граничних умов. Прирівняти праву частину (6) до нуля можна, припустивши, що режим течії газу в торцевому зазорі тільки радіальний, тобто

обумовлений перепадом тиску між зовнішнім і внутрішнім радіусами торцевого зазору. Невідомими величинами у ньому будуть шукана функція  $P = p^{1+1/\kappa}$  та значення торцевого зазору  $x$ , яке, у свою чергу, в окружному та радіальному напрямках змінюється мало і в першому наближенні може вважатися незмінним [9]. Тоді:

$$\partial^2 P / \partial y^2 + \partial^2 P / \partial z^2 = 0 \quad (7)$$

Суть застосовуваного чисельного методу полягає у зведенні крайової задачі для диференціального рівняння (7) в часткових похідних до інтегрального рівняння по границі досліджуваної області, яке виходить шляхом застосування до шуканої функції третьої формули Гріна. У загальному вигляді інтегральне рівняння для області з границею  $\Gamma$  має вигляд [11]:

$$c(\xi)P(\xi) + \int_{\Gamma} P(\zeta) q^*(\xi, \zeta) d\Gamma(\zeta) = \int_{\Gamma} q(\zeta) P^*(\xi, \zeta) d\Gamma(\zeta) \quad (8)$$

Тут  $\xi$  – довільна точка на границі області,  $c(\xi)$  – функція, що враховує особливості, що виникають при інтегруванні по границі області,  $P^*(\xi, \zeta) = \ln(1/r)/(2\pi)$  – фундаментальне рішення для двовимірного випадку,  $r$  – відстань між точками  $\xi$  і  $\zeta$  на границі області,  $q^*(\xi, \zeta) = \partial P^*(\xi, \zeta)/\partial n(\zeta)$ .

Рішення рівняння (8) здійснюється за допомогою розбиття границі області на ділянки (елементи), інтегрування яких виконується методом механічних квадратур Гауса. Таким чином отримують систему лінійних алгебраїчних рівнянь, рішення якої здійснюється методом Гауса. У результаті її рішення визначаються невідомі значення функції  $P$  і  $\partial P/\partial n$  на границі, знаючи які можна визначити значення функції тиску в будь якій  $i$ -ої точці всередині області, оточеної границею  $\Gamma$ :

$$P_i = \int_{\Gamma} q P^* d\Gamma - \int_{\Gamma} P q^* d\Gamma \quad (9)$$

В якості області для визначення поля тиску газу вибрано ділянку торцевого зазору, обмежену зовнішнім і внутрішнім радіусами ущільнювального кільця і радіальними січними, що проходять через середини сусідніх камер (рис. 3).

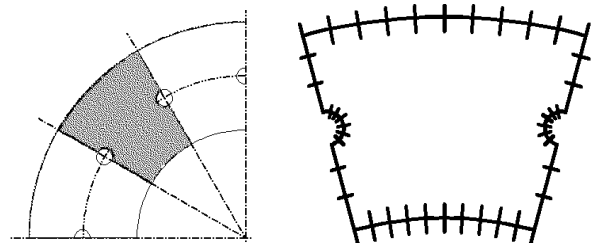


Рис. 2 – Виділення області пошуку рішення і розділення її на елементи

В якості граничних умов задається функція тиску: на зовнішньому радіусі –  $p_3$ , на внутрішньому –  $p_4$ , у зонах живильних каналів  $p_1$ , уздовж радіуса тиск змінюється за квадратичним законом (ізотермічна течія).

Інтегральному рівнянню (8) надається дискретна форма, а границя області розбивається на  $N$  елементів, на кожному з яких задається гранична умова типу Діріхле – значення тиску (рис. 3):

$$\frac{1}{2} P_i + \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} q^* d\Gamma \right) P u_j = \sum_{j=1}^N \left( \int_{\Gamma_j} P^* d\Gamma \right) q_j. \quad (10)$$

Інтеграли  $\int_{\Gamma_j} q^* d\Gamma$  і  $\int_{\Gamma_j} P^* d\Gamma$  встановлюють

зв'язок між  $i$ -м вузлом і  $j$ -м елементом, по довжині якого береться інтеграл, і надалі будуть позначатися відповідно  $H_{ij}$  і  $G_{ij}$ . Звідси отримують співвідношення, яке представляє зв'язок між внутрішньою точкою  $i$  та значеннями  $P$  і  $q$  на границі області:

$$P_i = \sum_{j=1}^N G_{ij} q_j - \sum_{j=1}^N H_{ij} P_j. \quad (11)$$

Знаходження правої частини рівняння (6)  $W(y) = 6(1 + (1/\kappa)) \partial(xUp^{1/\kappa})/\partial u$  здійснюється шляхом послідовних ітерацій: знайдене з (7) методом кінцевих різниць значення похідної  $\partial P/\partial u$  підставляється в інтегральне рівняння (8) у вигляді  $\int_{\Omega} W(y) P^*(\xi, \zeta) d\Omega(\zeta)$ . Після того, як знайдені значення функцій  $P$  і  $q$  на всієї границі, обчислюється  $P$  в довільній внутрішній точці за допомогою виразу [12]:

$$P_i = \sum_{j=1}^N G_{ij} q_j - \sum_{j=1}^N H_{ij} P_j - B_i, \quad (12)$$

де  $B_i$  – чисельне рішення  $W(y)$  для кожного значення фундаментального рішення, заданого в  $i$ -му вузлі.

Застосовуючи (12) до всієї досліджуваної області отримано масив значень тиску затворного газу між сусідніми камерами і живильними каналами для обчислення величини осередненого тиску  $\bar{p}_2$  на торцевому паску, де розміщені камери (обмеженому радіусами  $r_{24}$  і  $r_{23}$ ).

Вирази для сил, що діють на ущільнювальне кільце, в безрозмірному вигляді:

$$\begin{aligned} \varphi_s &= \frac{F_s}{p_b S_b} = \\ &= \frac{2}{3} \frac{\psi_2^3 - \psi_3^3}{\psi_2^2 - \psi_3^2} \frac{S_{23}}{S_b} + \psi_2 \frac{S_{22}}{S_b} + \frac{2}{3} \frac{\psi_2^3 - \psi_4^3}{\psi_2^2 - \psi_4^2} \frac{S_{24}}{S_b}. \quad (13) \\ \varphi_c &= \frac{F_c}{p_b S_b} = \psi_3 \frac{S_{35}}{S_b} + \psi_4 \frac{S_{54}}{S_b} + \lambda \end{aligned}$$

Тут  $S_{ij}$  – площі відповідних торцевих пасків;  $\lambda$  – безрозмірне зусилля підтискання пружин.

Виконавши лінеаризацію (4) поблизу положення статичної рівноваги можна записати, використовуючи варіації:

$$\begin{aligned} &(g_{m12b} \psi_{10} - g_{m12b} \psi_{20}) \delta \Omega - (g_{m12b} \Omega_0) \delta \psi_1 + \\ &+ (g_{m12b} \Omega_0) \delta \psi_2 = (3g_{m23b} u_0^2 \psi_{20}^2 - g_{m23b} u_0^2 \psi_{30}^2 - \\ &- 3g_{m24b} u_0^2 \psi_{20}^2 - 3g_{m24b} u_0^2 \psi_{40}^2) \delta u + \\ &+ (2g_{m23b} u_0^3 \psi_{20} + 2g_{m24b} u_0^3 \psi_{20}) \delta \psi_2 + \\ &+ (g_{mpb}) \delta \psi_2 + (-2g_{m23b} u_0^3 \psi_{30}) \delta \psi_3 + \\ &+ (-2g_{m24b} u_0^3 \psi_{40}) \delta \psi_4 + (g_{mvb}) \delta u \end{aligned} \quad (14)$$

Тут нульовими індексами позначені усталені значення величин. Опустивши знаки варіацій, отримане вираз записується у скороченій формі з використанням оператора диференціювання по часу  $p = d/dt$ :

$$\begin{aligned} (T_1 p + 1) \psi_2 &= -k_{\psi} (T_2 p + 1) u + \\ &+ C_1 \psi_1 + C_3 \psi_3 + C_4 \psi_4 + C_0 \Omega, \quad (15) \end{aligned}$$

Тут і далі  $T_i$ ,  $C_i$ ,  $k_{\psi}$  і  $Y_i$  – тимчасові і геометричні константи, отримані після лінеаризації, залежні від усталених значень  $\psi_{10}$ ,  $\psi_{20}$ ,  $\psi_{30}$ ,  $\psi_{40}$ , а також  $u_0$  і  $\Omega_0$ .

Рівняння динаміки автоматичного регулятора можна отримати, лінеаризуючи (13) і об'єднавши його з (15). Тоді вираз для безрозмірного навантаження на рухоме кільце  $\varphi$ :

$$\begin{aligned} (T_1 p + 1) \varphi &= -k_{\psi} Y_2 (T_2 p + 1) u + \\ &+ Y_3 (T_1 p + 1) \psi_3 + Y_4 (T_1 p + 1) \psi_4 + \\ &+ C_1 Y_2 \psi_1 + C_3 Y_2 \psi_3 + C_4 Y_2 \psi_4 + C_0 Y_2 \Omega \end{aligned} \quad (16)$$

Рівняння осьових коливань кільця (1) в операторній формі має вигляд:

$$(T_3^2 p^2 + T_4 p + \lambda) u = \varphi, \quad (16)$$

Виключивши з (16) і (17) отримують рівняння динамічної моделі системи ущільнення:

$$\begin{aligned} D(p) u &= (a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0) u = \\ &= Y_3 (T_1 p + 1) \psi_3 + Y_4 (T_1 p + 1) \psi_4 + \\ &+ C_1 Y_2 \psi_1 + C_3 Y_2 \psi_3 + C_4 Y_2 \psi_4 + C_0 Y_2 \Omega \end{aligned} \quad (18)$$

де  $a_3 = T_3^2 T_1$ ,  $a_2 = T_3^2 + T_1 T_4$ ,  $a_1 = T_4 + \lambda T_1 + T_2 k$ ,  $a_0 = \lambda + k_{\psi}$ .

Для аналізу динаміки системи використовують критерій Гурвіца, згідно з яким система стійка, якщо всі коефіцієнти власного оператора додатні:

$$T_2 > \frac{(-\lambda T_4) T_1^2 + (K T_3^2 - T_4^2) T_1 - (T_3^2 T_4)}{(T_4 K) T_1 + (K T_3^2)} \quad (19)$$

Так як  $T_1$  і  $T_2$  пропорційні відповідно  $V_k$  та  $S_{34}$ , умову стійкості можна задовольнити, мінімізувавши обсяг камер на поверхні ущільнювального кільця.

Частотні передавальні функції ущільнення по зовнішнім впливам :

$$\begin{aligned} \Phi_{\psi 1} &= \frac{u}{\psi_1} = \frac{Y_2 C_1}{D(i\omega)} \\ \Phi_{\Omega} &= \frac{u}{\Omega} = \frac{Y_2 C_0}{D(i\omega)} \\ \Phi_{\psi 3} &= \frac{u}{\psi_3} = \frac{(b_{1\psi 3})p + (b_{0\psi 3})}{D(i\omega)} \\ \Phi_{\psi 4} &= \frac{u}{\psi_4} = \frac{(b_{1\psi 4})p + (b_{0\psi 4})}{D(i\omega)} \end{aligned} \quad (20)$$

де  $b_{1\psi 3} = Y_3 T_1$ ,  $b_{1\psi 4} = Y_4 T_1$ ,  $b_{0\psi 3} = Y_2 C_3 + Y_3$ ,  $b_{0\psi 4} = Y_2 C_4 + Y_4$ .

Таким чином, амплітудні і фазові частотні характеристики:

$$\begin{aligned} A_{\psi 1, \Omega} &= \frac{Y_2 C_{1,0}}{\sqrt{L^2 + M^2}} \\ A_{\psi 3, \psi 4} &= \sqrt{\frac{b_{0\psi 3,0\psi 4}^2 + \omega^2 b_{1\psi 3,1\psi 4}^2}{L^2 + M^2}} \\ F_{i\psi 1, \Omega} &= \arctg \frac{M}{L} \\ F_{i\psi 3, \psi 4} &= \arctg \frac{L\omega b_{1\psi 3,1\psi 4} + M b_{0\psi 3,0\psi 4}}{L b_{0\psi 3,0\psi 4} + M\omega b_{1\psi 3,1\psi 4}} \end{aligned} \quad (21)$$

Тут:  $L = a_0 - a_2 \omega^2$ ,  $M = a_1 \omega - a_3 \omega^3$ .

### Обговорення результатів

Наведена динамічна модель може бути використана для визначення реакції рухомого торцевого кільця на входні гармонійні зміни зовнішніх впливів, виявлення небезпечної області частот, а також підібрати такі параметри ущільнення, при яких амплітуди коливання рухомого кільця не перевищать допустимих меж.

Представлена методика розрахунку динамічних характеристик побудована на основі підходу до розрахунку незатворних імпульсних ущільнень [5], в якому прийнято допущення, що тиск в просторі між камерами дорівнює осередненому за оборот тиску в камерах. З точки зору автора для затворних імпульсних ущільнень згадане допущення неприпустимо, тому що воно не враховує залежність величини торцевого зазору від тиску затворного газу [7, 8].

### Висновки

Таким чином, шляхом урахування стисливості робочих середовищ та можливості окремого підводу в торцевий зазор затворного середовища, узагальнена існуюча методика розрахунку імпульсних ущільнень. Отримана математична динамічна модель

ущільнення, яка завдяки рішенням рівняння змещення Рейнольдса визначає діючі тиски на ділянках торцевого зазору.

### Список літератури:

- 1 **Adams, W. V.** Applying dry gas sealing technology to pumps / **W. V. Adams** // *Pumps and systems magazine*. – 1997. – No 6. – P. 16-25
- 2 **Patrick M. Flach.** Dry-running sealing technology for emission containment / **Patrick M. Flach** // *Sealing Technology Newsletter*. – 1994. – No 10. – P. 8-11.
- 3 **Adams, W. V.** Gas-barrier seals establish beachhead / **W. V. Adams, R. R. Dihgman** // *Pumps and systems magazine*. – 1995. – No 2. – P. 14-20.
- 4 Sealing hazardous fluids with dry seal technology // *Pumps and systems magazine*. – 1998. – No 7. – P. 46-48.
- 5 **Langermantel, A.** Applications contseptps for pumps, blowers and fans / **A. Langermantel, W. Häbler, D. Ziegenbein** // *Gas lubricated mechanical seals : зб. наук. праць / Wolfpratshausen. Feodor Burgman Dichtungswerke GmbH&Co.* – Wolfpratshausen. – 1997. – P. 27-43.
- 6 What are the basics of gas lubricated seals? (Part One) // *Pumps and systems magazine*. – 2009. – No 11. – P. 48–50.
- 7 **Марцинковский, В. А.** Насосы атомных электростанций / **В. А. Марцинковский, П. Н. Ворона.** – М.: Энергоатомиздат. – 1987. – 256 с.
- 8 **Кузнецов, Э. Г.** Исследование расходных характеристик торцевого затворного импульсного уплотнения / **Э. Г. Кузнецов, Л. А. Савин** // *Известия ОрелГТУ, Сер. Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2010. – №5(283). – С. 9–13
- 9 **Кузнецов, Э. Г.** Экспериментальные исследования поля давления в торцевом зазоре импульсного газозатворного уплотнения / **Э. Г. Кузнецов** // *Ударно-вибрационные системы, машины и технологии: материалы IV международного научного симпозиума.* – Орел: ОрелГТУ. – 2010 – 384 с.
- 10 **Константинеску, В. Н.** Газовая смазка / **В. Н. Константинеску**; под ред. **М. В. Коровчинского.** – пер. с рум. – М.: Машиностроение. – 1968. – 709 с.
- 11 **Бреббия, К.** Методы граничных элементов / **К. Бреббия, Ж. Телес, Л. Вроубел.** – пер. с англ. – М.: Мир. – 1987. – 524 с.
- 12 **Беннерджи, П.** Метод граничных элементов в прикладных науках / **П. Беннерджи, Р. Баттерфилд.** – М.: Мир. – 1984. – 494 с.

### Bibliography (transliterated):

- 1 **Adams, W. V.** Applying dry gas sealing technology to pumps. *Pumps and systems magazine*, 1997, **6**, 16-25.
- 2 **Patrick M. Flach.** Dry-running sealing technology for emission containment. *Sealing Technology Newsletter*, 1994, **10**, 8-11.
- 3 **Adams, W. V.** Gas-barrier seals establish beachhead. *Pumps and systems magazine*, 1995, **2**, 14-20.
- 4 "Sealing hazardous fluids with dry seal technology." *Pumps and systems magazine*, 1995, 46-48.
- 5 **Langermantel, A., Häbler, W., Ziegenbein, D.** Applications contseptps for pumps, blowers and fans. *Gas lubricated mechanical seals*. Wolfpratshausen: Feodor Burgman Dichtungswerke GmbH&Co, 1997, 27-43.



- 6 What are the basics of gas lubricated seals? (Part One)." *Pumps and systems magazine*, 2009, **11**, 48-50.
- 7 **Martsinkovsky, V. A., Vorona, P. N.** *Nasosy atomnykh elektrostantsii [Atomic station pumps]*. Moscow: Energoatomizdat, 1987, 256 p.
- 8 **Kuznetsov, E. G., Savin, L. A.** Issledovanie rashodnykh harakteristik tortseвого zatvornogo impul'snogo uplotneniia [The gas-barrier face pulse seal flow characteristics research]. *Izvestiia OrelGTU: Fundamental'nye i prikladnye problemy tekhniki i tehnologii [OrelGTU News: Fundamental and applied problems of technics and technology]*, 2010, 5, 9-13.
- 9 **Kuznetsov, E. G.** Eksperimental'nye issledovaniia polia davleniia v tortsevom zazore impul'snogo gazozatvornogo uplotneniia [The preesure field of gas-barrier pulse seal operation gap experimental investigations]. *Udarno-vibrotsionnye sistemy, mashiny i tehnologii: materialy IV mezhdunarodnogo nauchnogo simpoziuma [In Proc. of the IV International Science Symposium Shock-vibration systems, machines, and technology]*. Orel: OrelGTU 2010, 144-154.
- 10 **Konstantinesku, V. N.** Gazovaia smazka [Gas lubrication]. Moscow: Mashinostroenie, 1968, 709 p.
- 11 **Brebbia, C. A., Telles, J. C. F., Wrobel, L. C.** Metody granichnykh elementov [Boundary element methods]. Moscow: Mir, 1987, 524 p.
- 12 **Banerjee, P. K., Butterfield, R.** *Metody granichnykh elementov v prikladnykh naukah [Boundary element methods in applied science]*. Moscow: Mir, 1984, 494 p.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Кузнцов Едуард Геннадійович** – кандидат технічних наук, старший викладач кафедри «Комп'ютерні науки», Сумський державний університет, вул. Римського-Корсакова, 2, м. Суми, Україна; e-mail: kuznets.ed@mail.ru.

**Eduard Kuznetsov** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), senior lecturer, Department of Computer Science, Sumy state university, Rimsky-Korsakov str., 2, Sumy, Ukraine; e-mail: kuznets.ed@mail.ru.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Кузнцов, Е. Г.** Динамічна модель імпульсного торцевого ущільнення / **Е. Г. Кузнцов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 80-85. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.12.

*Please cite this article as:*

**Kuznetsov, E.** Dynamic model of pulse mechanical seal. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 80-85, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.12.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Кузнцов, Э. Г.** Динамическая модель импульсного торцевого уплотнения / **Э. Г. Кузнцов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 80-85. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.12.

**АННОТАЦИЯ** Разработана математическая модель импульсного торцевого уплотнения, которая учитывает возможность подачи сжимаемой затворной среды непосредственно в рабочий зазор через питающие каналы. Модель может быть использована для определения основных динамических характеристик уплотнения и определение реакции подвижного торцевого кольца на входные гармонические изменения внешних воздействий. В модели применен численный метод граничных элементов, с помощью которого определено распределение давления в торцевом зазоре уплотнения.

**Ключевые слова:** импульсное уплотнение, динамические характеристики, метод граничных элементов, уравнение Рейнольдса

Поступила (received) 26.05.2016

УДК 621.311

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.13

## ВПЛИВ РОЗОСЕРЕДЖЕНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ НА ОПТИМАЛЬНИЙ ПОТОКОРОЗПОДІЛ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

П. Д. ЛЕЖНЮК\*, І. О. ГУНЬКО

Кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА  
\*e-mail: lpd@inbox.ru

**АНОТАЦІЯ.** В роботі розглядається питання зменшення втрат активної потужності в локальних електричних системах, в яких експлуатуються різноманітні розосереджені джерела енергії, серед яких сонячні електростанції та гідроелектростанції. В статті наведена комп'ютерна модель режиму локальної електричної системи, яка дозволяє визначити місце точок потокорозділу та розрахувати втрати потужності при розімкненні схеми в відповідних вузлах. Показано, що в умовах використання декількох розосереджених джерел енергії в локальній електричній системі оптимальну за втратами енергії точку потокорозділу (з декількох можливих точок потокорозділу) вибирають за найменшою вузловою напругою. Регулювання потужності генерування малої гідроелектростанції впливає на зміну точки потокорозділу в локальній електричній системі і, відповідно, на втрати електроенергії в ній.

**Ключові слова:** розосереджені джерела енергії, сонячні електростанції, точка потокорозділу, локальні електричні системи, гідроелектростанції, втрати активної потужності.

## INFLUENCE DISPERSED POWER SOURCES ON OPTIMAL OF FLOW IN ELECTRICAL NETWORKS

P. LEZHNIUK\*, I. HUNKO

Department of power plants and systems, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, UKRAINE.

**ABSTRACT.** Intensive implementing distributed generation sources from alternative energy sources leads to a situation where one feeder can connect several different types of distributed energy sources, including solar power plant and small hydropower plant. The system consists of distributed generation small-capacity power plants scattered throughout the energy system. They supply electricity to consumers in the near and in the case of excess energy can transfer its network centralized power. This paper discusses the reduction of active power losses in the local electrical systems that operate different types dispersed energy sources. The main goal is to develop a methodology for determining the point of power flow section the local electrical system of dispersed generation sources and develop a method for choosing the optimal place network disconnection criterion of active power losses. The article shows the computer model regime for local electricity system that allows to determined the place point of power flow section and calculated the power loss at section schemes in the respective nodes. The choice of multi sections is difficult optimization problems. It is proved that in the use of multiple distributed sources of energy in the local electrical system for optimum energy losses point of power flow section (several possible points of power flow section) is selected at the lower junction voltage. Regulation of power generated by small hydroelectric power plant affects the change point of power flow section local electric networks and reduces the active power losses in the local electrical system.

**Keywords:** distribution power sources, solar power plant, point of power flow section, the local electrical systems, hydroelectric power plant, active power losses.

### Вступ

На зміну централізованому електропостачанню від крупних електростанцій приходиться комбіноване електропостачання, коли безпосередньо в розподільних електричних мережах розбудовуються відновлювані джерела енергії [1,2]. Це вітрові, сонячні та малі гідро електростанції (ВЕС, СЕС, малі ГЕС). Розподілене генерування в електричній мережі впливає на її режими, в результаті чого виникають нові можливості і нові задачі щодо оптимального використання розподілених джерел енергії (РДЕ).

РДЕ постачають електроенергію найближчим споживачам, а в разі появи надлишків енергії можуть її передавати в мережі централізованого електропостачання. РДЕ умовно можна поділити на керовані (дизельні електричні станції, когенераційні і

т.п.), умовно керовані (малі ГЕС за відсутності достатньої для безперервної роботи кількості води) і не керовані, наприклад, ВЕС і СЕС [3]. Кількість РДЕ з кожним роком зростає, що призводить до виникнення ситуації, коли в електричній мережі можуть експлуатуватись декілька різноманітних РДЕ, серед яких некеровані і умовно керовані [4,5]. За набором задач така електрична мережа має всі ознаки локальної електричної системи (ЛЕС).

Розподільні електричні мережі для забезпечення надійності електропостачання за своєю структурою є замкнені (передбачено що споживачі можуть отримувати живлення по декількох лініях електропередач). Однак з метою зменшення струмів короткого замкнення та зменшення кількості аварійних відключень споживачів кільцеві та петльові фідери розмикаються [6]. Вибір місця розімкнення є

складною багатокритеріальною оптимізаційною задачею. Критеріями оптимальності є задана кількість аварійних відключень радіальних частин розподіленої мережі, нормовані відхилення напруг, перевантаження ліній електропередач, втрати активної та реактивної потужності і т.п. [7,8].

Зростаюча кількість РДЕ ускладнює вибір місць ділення кільцевих схем та схем з двостороннім живлення в розподільних електричних мережах. Розбудова в ЛЕС РДЕ призводить до появи декількох точок поточкорозділу і не завжди є виправданим ділення мережі в точках поточкорозділу за вищезазначеними критеріями оптимальності. Водночас широке впровадження сучасного високовольтного та мікропроцесорного обладнання, впровадження в мережах основних засад концепції Smart Grid дозволяє автоматизувати процес керування режимами розподільних електричних мереж та зміщення точки поточкорозділу, викликаного зміною навантаження у вузлах, з неоптимального вузла мережі в інші [9]. Для цього можливо та доцільно використовувати керовані і умовно керовані РДЕ, зокрема малі ГЕС. Останні використовуються для підтримування в мережі, розімкненій за критерієм надійності, таких оптимальних потоків потужності, що забезпечує мінімум втрат активної потужності та електроенергії.

### Мета роботи

Метою роботи є розроблення методу визначення оптимальної точки поточкорозділу та оптимального місця розмикання мережі в локальній електричній системі з джерелами розосередженого генерування та підтримування оптимальних потоків в ній за критерієм мінімуму втрат активної потужності.

### Визначення точки поточкорозділу

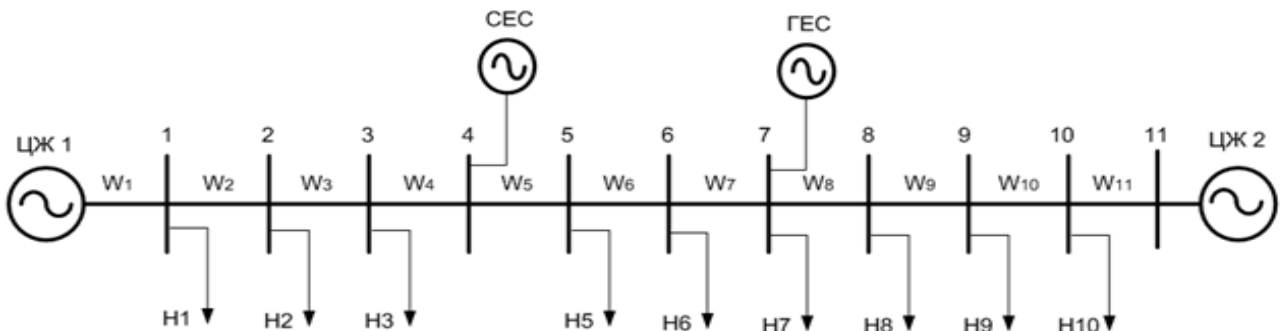


Рис. 1 – Комп'ютерна модель ЛЕС 10кВ.

Розглянути метод визначення точки поточкорозділу доцільно на типовому прикладі локальної електричної мережі (див. рис. 1), в якій є два центри живлення ЦЖ1 і ЦЖ2 від електроенергетичної системи, некерована СЕС та умовно керована мала ГЕС. Параметри віток ЛЕС наведені в табл. 1.

Таблиця 1–Параметри віток схеми

Умовн. познач. ЛЕП	Марка проводу	Дов. ЛЕП, км	Z, Ом/км
W1	АС-50	5	2,96+j·1,91
W2	АС-50	10	5,92+j·3,82
W3	АС-50	10	5,92+j·3,82
W4	АС-50	0,7	0,41+j·0,27
W5	АС-50	1,35	0,79+j·0,51
W6	АС-50	2	1,184+j·0,764
W7	АС-50	0,5	0,29+j·0,19
W8	АС-50	1,7	1,01+j·0,65
W9	АС-50	4	2,368+j·1,528
W10	АС-50	2	1,184+j·0,764
W11	АС-50	2	1,184+j·0,764

Встановлена потужність генерування СЕС – 500 кВт і в ході дослідження не змінювалась. Спочатку розглянемо режим роботи ЛЕС, коли ГЕС вимкнено, а в якості джерел живлення виступають ЦЖ1, ЦЖ2 та СЕС. Навантаження вузлів для даного режиму роботи ЛЕС наведені у табл. 2.

Таблиця 2 – Навантаження вузлів ЛЕС

Вузол	S <sub>нав.</sub> , кВА
1	200+j·123,945
2	300+j·185,92
3	300+j·185,92
5	600+j·371,85
6	500+j·309,87
7	50+j·30,98
8	350+j·216,91
9	150+j·92,96
10	250+j·154,94
11	1400+j·867,64

З метою розрахунку місця точки поточкорозділу було обрано метод вузлових напруг. Розрахунки проводились у програмному забезпеченні Mathcad. В якості вхідних параметрів задаємо матрицю з'єднань віток у вузлах, матрицю опорів віток та матрицю вузлових струмів, як показано у виразах. Схема складається з 11 віток та 11 вузлів. Отже перша матриця інцидентів (M) матиме розмірність 11×11.

$$M = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix}. \quad (1)$$

Маючи параметри ЛЕП та навантаження вузлів запишемо матрицю опорів віток (z), та матрицю задаючих струмів у вузлах (J), вирази 2-3.

$$z = \begin{pmatrix} 2,96 + j \cdot 1,91 \\ 5,92 + j \cdot 3,8 \\ 5,92 + j \cdot 3,8 \\ 0,41 + j \cdot 0,27 \\ 0,79 + j \cdot 0,51 \\ 1,184 + j \cdot 0,764 \\ 0,29 + j \cdot 0,19 \\ 1,01 + j \cdot 0,65 \\ 2,368 + j \cdot 1,528 \\ 1,184 + j \cdot 0,764 \\ 1,184 + j \cdot 0,764 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

$$J = \begin{pmatrix} -11,517 - j \cdot 7,156 \\ -28,867 - j \cdot 17,89 \\ 28,867 \\ -34,641 - j \cdot 21,468 \\ -28,867 - j \cdot 17,89 \\ -2,836 - j \cdot 1,789 \\ -20,207 - j \cdot 12,523 \\ -8,66 - j \cdot 5,367 \\ -14,434 - j \cdot 8,9452 \\ 76,210 + j \cdot 47,23 \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де z – матриця опорів віток схеми, J – матриця задаючих струмів у вітках.

За виразом 4 визначаємо матрицю вузлових провідностей:

$$Y = M \cdot z^{-1} \cdot M^T \quad (4)$$

де z – матриця опорів віток схеми, M – перша матриця інциденцій, M<sup>T</sup> – транспонована перша матриця інциденцій.

Розрахуємо матрицю стовбець вузлових напруг відносно балансуєчого вузла, за формулою 5:

$$U_a = Y^{-1} \cdot J, \quad (5)$$

де Y – матриця опорів віток схеми, J – матриця задаючих струмів у вітках.

Наступним кроком розраховуємо абсолютні напруги у вузлах за виразом 6:

$$U = U_a + U_0 \quad (6)$$

де U<sub>в</sub> – стовбець напруг відносно балансуєчого вузла, U<sub>0</sub> – напруга балансуєчого вузла.

Напруга балансуєчого вузла прийнята такою, яка дорівнює 10кВ.

В результаті розрахунку, отримали матрицю напруг у вузлах, наступного виду:

$$U = \begin{pmatrix} 9,927 \cdot 10^3 - j \cdot 262,139 \\ 9,822 \cdot 10^3 - j \cdot 700,058 \\ 9,788 \cdot 10^3 - j \cdot 1,022 \cdot 10^3 \\ 9,793 \cdot 10^3 - j \cdot 1,029 \cdot 10^3 \\ 9,779 \cdot 10^3 - j \cdot 1,058 \cdot 10^3 \\ 9,783 \cdot 10^3 - j \cdot 1,05 \cdot 10^3 \\ 9,789 \cdot 10^3 - j \cdot 1,037 \cdot 10^3 \\ 9,812 \cdot 10^3 - j \cdot 989,35 \\ 9,894 \cdot 10^3 - j \cdot 816,408 \\ 9,941 \cdot 10^3 - j \cdot 716,96 \\ 1,001 \cdot 10^4 - j \cdot 595,899 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Як видно з отриманих результатів, найменшими будуть напруги в 3 та 5 вузлі, тоді, як в 2,4,6 напруги вищі. Тому можна зробити висновок, що для даного режиму роботи ЛЕС, має місце наявність двох точок поточкорозділу відповідно в 3 та 5 вузлі. Пропонуємо в якості точки розмикання кільцевої схеми або мережі з двостороннім живленням вибирати точку, в якій буде найменша вузлова напруга. Такою точкою пропонуємо вибрати точку вузла 3.

#### Визначення втрат потужності в локальних електричних системах

Наступним кроком, визначаємо втрати потужності до розмикання мережі. Для розрахунку втрат потужності задамося вхідними параметрами: матрицею вузлових навантажень, та матрицею T – матрицею взаємозв'язку вузлових потужностей і перетоків потужності в системі. Таким чином, матриця вузлових навантажень має наступний вигляд:

$$S = \begin{pmatrix} -200 - j \cdot 123,9488 \\ -300 - j \cdot 185,9233 \\ -300 - j \cdot 185,9233 \\ 500 \\ -600 - j \cdot 371,846 \\ -500 - j \cdot 309,872 \\ -50 - j \cdot 30,9872 \\ -350 - j \cdot 216,91 \\ -150 - j \cdot 92,96 \\ -250 - j \cdot 154,936 \\ 1400 + j \cdot 867,642 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Якщо потужність споживається, то в відповідному вузлі, записуємо величину споживаної

потужності зі знаком «-», якщо в вузлі є джерело генерування, записуємо зі знаком «+».

Рядки матриці  $T$  відповідають віткам, а стовбці - вузлам схеми. Матриця  $T$ , запишеться в наступному вигляді:

$$T = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (8)$$

Перетони потужності у вітках схеми визначаються за виразом (9):

$$S_g = T \cdot S, \quad (9)$$

де  $T$  – матриця взаємозв'язку вузлових потужностей і перетоків потужності в системі,  $S$  – матриці вузлових навантажень.

Втрати потужності визначаються за формулою (10):

$$\Delta S = \sum_{i,j=1}^n \frac{S_{ei,j}^2}{U_i^2} \cdot z_{i,j}, \quad (10)$$

де  $S_{ei,j}$  – перетік потужності по  $ij$  вітці,  $U_i$  – напруга в  $i$ -ому вузлі,  $z_{ij}$  – опір  $ij$ -ої вітки;  $i=1..n-1$ ,  $j=i+1..n$ .

При цьому активні втрати знаходяться за виразом 11:

$$\Delta P = Re(\Delta S), \quad (11)$$

де  $\Delta S$  – втрати потужності в ЛЕС, кВт.

До розмикання, для заданого режиму роботи ЛЕС, втрати активної потужності становлять 155,52 кВт.

Наступним кроком алгоритму є розмикання мережі у 3 вузлі (в першій точці покорозділу). В результаті розмикання, отримуємо 2 ділянки, в кожній з яких, за наведеним вище алгоритмом розраховуємо втрати. На рис. 2 наведена схема 1 ділянки ЛЕС.

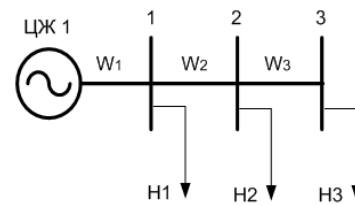


Рис.2 – Схема 1-ої ділянки ЛЕС (ТПЗ)

Втрати активної потужності в наведеній ділянці становлять 21,147 кВт.

Розрахуємо втрати на другій ділянці схеми наведеній на рис.3.

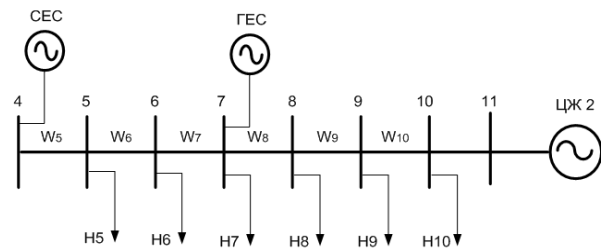


Рис.3 – Схема 2-ої ділянки ЛЕС (ТПЗ)

Втрати активної потужності у наведеній на рис. 3 схемі дорівнюють 76,963 кВт. Сумарні втрати на двох ділянках становлять 98,11 кВт, що значно менше за втрати активної потужності до розмикання мережі.

Тепер розрахуємо, які будуть втрати, якщо розімкнути мережу в 5 вузлі (в другій точці покорозділу). Отримаємо наступні 2 ділянки, наведені на рис.4 та 5.

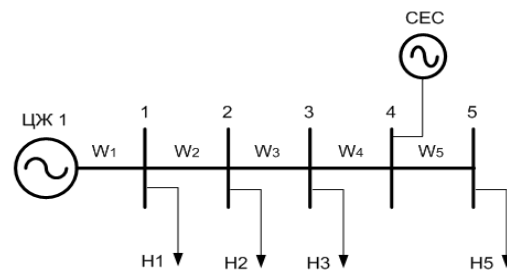


Рис.3 – Схема 1-ої ділянки ЛЕС (ТП5)

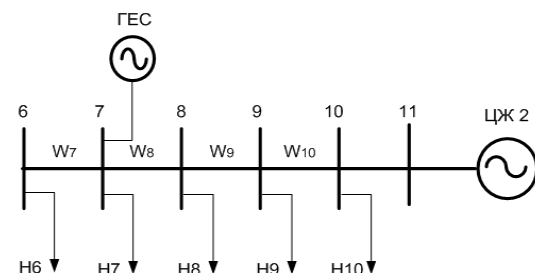


Рис.4 – Схема 2-ої ділянки ЛЕС (ТП3)

Після розмикання схеми в 5 вузлі отримали втрати активної потужності на першій ділянці 152,596 кВт, на другій ділянці – 17,257 кВт. Сумарні втрати відповідно – 169,853 кВт. Отже, з отриманих результатів, можна зробити висновок, що розмикання краще робити в 3 вузлі, де напруга була меншою, і втрати активної потужності після розмикання теж менші.

Наступним етапом дослідження є підключення малої ГЕС, що під'єднана до сьомого вузла схеми. Розглянемо як змінять точки поточкорозділу у не розімкненій схемі. При потужності генерування малою ГЕС в 250 кВт, точка поточкорозділу з 3-ого вузла перемістилася в 2-ий вузол, як видно з матриці наведеній нижче:

$$U = \begin{pmatrix} 9,944 \cdot 10^3 \cdot j \cdot 225,387 \\ 9,873 \cdot 10^3 \cdot j \cdot 589,809 \\ 9,875 \cdot 10^3 \cdot j \cdot 838,396 \\ 9,882 \cdot 10^3 \cdot j \cdot 840,665 \\ 9,874 \cdot 10^3 \cdot j \cdot 859,927 \\ 9,884 \cdot 10^3 \cdot j \cdot 836,579 \\ 9,892 \cdot 10^3 \cdot j \cdot 819,932 \\ 9,912 \cdot 10^3 \cdot j \cdot 778,036 \\ 9,987 \cdot 10^3 \cdot j \cdot 618,922 \\ 1,003 \cdot 10^4 \cdot j \cdot 526,39 \\ 1,008 \cdot 10^4 \cdot j \cdot 412,249 \end{pmatrix} \quad (12)$$

Втрати активно потужності до розмикання становлять 111 кВт, а після розмикання у другому вузлі, сумарні втрати на двох ділянках становлять 115 кВт. Збільшуючи потужність генерування малої ГЕС до 350 кВт, вдалося зменшити втрати активної потужності до 98,858 кВт.

### Висновки

Точка розмикання кільцевої ділянки розподільних електричних мереж з умов забезпечення надійності схеми може не співпадати з точкою оптимального поточкорозділу за критерієм мінімуму втрат потужності, яка до того ж може змінюватися в залежності від навантаження у вузлах. Підтримувати потоки потужності в ЛЕС, які відповідають оптимальній точці поточкорозділу за критерієм мінімуму втрат потужності, можливо малими ГЕС.

Регулювання потужності малих ГЕС здійснюється за незмінної схеми ЛЕС. Значення потужностей ГЕС визначаються і задаються такими, що вони мають забезпечити потоки потужності, які відповідають оптимальній точці поточкорозділу, розрахованій за критерієм мінімуму втрат потужності. Тобто, реальна точка розмикання електричної мережі не змінюється, а потоки потужності за таких умов відповідають розрахунковій оптимальній точці поточкорозділу. Цим забезпечується надійність електропостачання за мінімальних втрат електроенергії під час її передавання.

### Список літератури

- 1 **Gonen, T.** Electric power distribution system engineering / **T. Gonen** // Second Edition, CRC Press. – 2007. – 856 p.
- 2 **Pepermans, G.** Distributed generation: definition, benefits and issues / **G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, R. Belmans, W. D'haeseleer** // *Energy Policy*. – 2005. – No. 33. – P.787-798. – doi: 10.1016/j.enpol.2003.10.004.
- 3 **Hrisheekesha, P.** Evolutionary algorithm based optimal control in distribution system with dispersed generation / **P. Hrisheekesha, J. Sharma** // *International Journal of Computer Applications*. – 2010. – No. 14. – P. 31-37. – doi:10.5120/305-471.
- 4 **Jung, J.** Coordinated control of automated devices and photovoltaic generators for voltage rise mitigation in power distribution circuits / **J. Jung, A. Onen, R. Arghandeh, R. Broadwater** // *Renewable Energy*. – 2014. – № 66. – P. 532-540. – doi:10.1016/j.renene.2013.12.039.
- 5 **Tran, K.** Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems / **K. Tran, M. Vaziri** // *Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting* – 2005 – vol.3. – P. 2173-2178. – doi:10.17485/ijst/2011/v4i10/30172.
- 6 **Мусаев, Т.** Методика выбора оптимальной точки деления городской распределительной сети напряжением 6(10) кВ / **Т. А. Мусаев** // *Энергетика Татарстана*. – 2013. – №2(30). – С. 38 - 41.
- 7 **Лежнюк, П.** Вплив інверторів СЕС на показники якості електричної енергії / **П. Лежнюк, О. Рубаненко, І. Гунько** // *Вісник Хмельницького національного технічного університету. Серія: Технічні науки*. – 2015. – № 2. – С. 134-139.
- 8 **Лежнюк, П.** Вплив сонячних електричних станцій на напругу споживачів 0,4 кВ / **П. Лежнюк, О. Рубаненко, І. Гунько** // *Науковий журнал «Енергетика: економіка технології, екологія»*. – 2015. – №3(51). – С.7-13.
- 9 **Buslavets, O.** Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / **O. Buslavets, P. Legnuk, O. Rubanenko** // *Eastern-European journal of enterprise technologies* – 2015. – No 2/8 (74). – P. 35-41. – doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
- 10 **Ковальчук, О.** ГЕС в локальних електричних системах з розосередженим генеруванням / **О. Ковальчук, О. Нікіторович, П. Лежнюк, В. Кулик** // *Гідроенергетика України*. – 2011. – № 1. – С.54-58.
- 11 **Мельников, Н.** Матричный метод анализа электрических сетей / **Н. А. Мельников**. – М.: «Энергия». – 1996. – 120 с.

### Bibliography (transliterated)

- 1 **Gonen, T.** Electric power distribution system engineering. *Second Edition, CRC Press*, 2007, 856 p.
- 2 **Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R. D'haeseleer, W.** Distributed generation: definition, benefits and issues. *Energy Policy*, 2005, **33**, 787-798, doi:10.1016/j.enpol.2003.10.004.
- 3 **Hrisheekesha, P., Sharma, J.** Evolutionary algorithm based optimal control in distribution system with dispersed generation. *International Journal of Computer Applications*, 2010, **14**, 31-37, doi:10.5120/305-471.
- 4 **Jung, J., Onen, A., Arghandeh, R., Broadwater, R.** Coordinated control of automated devices and photovoltaic generators for voltage rise mitigation in power distribution

- circuits. *Renewable Energy*, 2014, **66**, 532-540, doi:10.1016/j.renene.2013.12.039.
- 5 **Tran, K., Vaziri, M.** Effects of dispersed generation (DG) on distribution systems. *Proc. of IEEE Power Engineering Society General Meeting*, 2005, **3**, 2173-2178, doi:10.17485/ijst/2011/v4i10/30172.
  - 6 **Musaev, T.** Metodyka vybora optimal'noy tochky deleniya horodskoy raspredyitel'noy sety napryazhenyem 6(10) kV [Method of selection of the optimal city distribution network dividing point voltage 6 (10) kV]. *Enerhetyka Tatarstana [Energy Tatarstan]*, 2013, **2**(30), 38 - 41.
  - 7 **Lezhnyuk, P., Rubanenko, O., Hun'ko, I.** Vplyv inverteriv SES na pokaznyky yakosti elektrychnoyi enerhiyi [Impact inverters SES quality electricity]. *Visnyk Khmel'nyts'koho natsional'noho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Tekhnichni nauky [Herald of Khmelnytsky National Technical University. Series: Engineering]*, 2015, **2**, 134-139.
  - 8 **Lezhnyuk, P., Rubanenko, O., Hun'ko, I.** Vplyv sonyachnykh elektrychnykh stantsiy na napruhu spozhyvachiv 0,4 kV [The impact of solar power plants on voltage of 0.4 kV consumers]. *Naukovyy zhurnal «Enerhetyka: ekonomika tekhnolohiyi, ekolohiya [Scientific journal "Energy: Economy of technology, ecology]*, 2015, **3**(51), 7-13.
  - 9 **Buslavets, O., Legnuk, P., Rubanenko, O.** Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2015, **2**/8(74), 35-41, doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
  - 10 **Koval'chuk, O., Nikitorovych, O., Lezhnyuk, P., Kulyk, V.** HES v lokal'nykh elektrychnykh systemakh z rozoseredzhenym heneruvannyam [Hes a local electric systems with dispersed generation]. *Hidroenerhetyka Ukrainy [Hydropower Ukraine]*, 2011, **1**, 54-58.
  - 11 **Mel'nykov, N.** Matrychnyy metod analiza elektrycheskykh setey [Matrychnyy method of analysis of electrical networks], Moscow: «Enerhiya», 1996, 120 p.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Лежнюк Петро Дем'янович** – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: lpd@inbox.ru

**Lezhniuk Petro D.** – Dr. Sc., Professor, Head of Department of power plants and systems, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine.; e-mail: lpd@inbox.ru.

**Гулько Ірина Олександрівна** – аспірантка, Вінницький національний технічний університет, аспірант кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: ira\_rubanenko@bk.ru.

**Hunko I.** - postgraduate student, Vinnitsa National Technical University, graduate student of power plants and systems; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: ira\_rubanenko@bk.ru.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю так:*

**Лежнюк, П. Д.** Вплив розосереджених джерел енергії на оптимальний потік розподіл в електричних мережах / **П. Д. Лежнюк, І. О. Гулько** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: *Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 86-91. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.13.

*Please cite this article as:*

**Lezhniuk, I., Hunko, S.** The impact of distributed power sources to the best of flow in electrical networks. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 86-91, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.13.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Лежнюк, П. Д.** Влияние рассредоточенных источников энергии на оптимальное потокораспределение в электрических сетях / **П. Д. Лежнюк, И. А. Гулько** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: *Новые решения в современных технологиях*. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 86-91. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.13.

**АНОТАЦІЯ** В роботі розглядається питання зменшення втрат активної потужності в локальних електричних системах, в яких експлуатуються різномітні розподілені джерела енергії, серед яких сонячні електростанції і гідроелектростанції. В статті приведена комп'ютерна модель режиму локальної електричної системи, яка дозволяє визначити місце точок потікорузділу і розрахувати втрати потужності при розмиканні схеми в відповідних вузлах. Показано, що в умовах використання декількох розподілених джерел енергії в локальній електричній системі оптимальну по втратам енергії точку потікорузділу (з декількох можливих точок потікорузділу) вибирають по найменшій вузловій напрузі. Регулювання потужності генерації малої гідроелектростанції впливає на зміну точки потікорузділу в локальній електричній системі і, відповідно, на втрати електроенергії в ній.

Надійшла (received) 12.05.2016

УДК 621.311

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.14

## ОЦІНЮВАННЯ ІМОВІРНІСНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ГЕНЕРУВАННЯ СОНЯЧНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ В ЗАДАЧІ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ ЛОКАЛЬНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

П. Д. ЛЕЖНІЮК, В. О. КОМАР\*, С. В. КРАВЧУК

Кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА  
\*e-mail: kvo76@mail.ru

**АНОТАЦІЯ.** В роботі розглядається питання аналізу імовірнісних характеристик генерування відновлювальних джерел електроенергії, зокрема сонячних електричних станцій (СЕС). Проаналізовано закон розподілу генерування сонячної електростанції для певного проміжку часу доби протягом року. Представлена математична модель гаусових сумішей, що дозволяють отримати основні характеристики імовірнісного характеру генерування сонячної електростанції. Оцінено можливість узгодження генерування сонячної електростанції з добовими графіками споживання. Визначено імовірність покриття заданого графіка навантаження генеруванням СЕС протягом певного часу доби впродовж всього року

**Ключові слова:** потужність генерування, сонячні електростанції, графік навантаження, активний споживач, гаусові суміші розподілу, імовірнісні характеристики.

## EVALUATION OF PROBABILISTIC GENERATION CHARACTERISTICS OF SOLAR POWER PLANTS IN THE PROBLEM OF INTELLECTUALIZATION OF LOCAL ELECTRIC SYSTEMS

P. LEZHNIUK\*, V. KOMAR, S. KRAVCHUK

Department of power plants and systems, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, UKRAINE.

**ABSTRACT** Growth of the share of renewable sources of energy in electric energy balance of the country is stipulated both by state preferences and certain reduction of the prices at the world market for the elements of such sources. Solar power plants are developing at a rapid pace. Some consumers start to construct plants of direct conversion of solar energy as a means to provide certain level of energy independence. These consumers leave the group of "passive" and join the group of "active" users and are able to influence the operation mode of local energy system.

In new conditions the coordination of the work of active consumers, sources of distributed generation and distributive electric network is impossible without intellectualization of the process of generation, distribution and consumption on the level of local electric system, using Smart Grid technologies.

Greater part of renewable sources of energy is represented by solar power plants (SPP). Their operation mode depends on natural conditions of the region, where they are located. That is why the problem of SPP stability estimation is important in the problem of covering the daily schedule of energy consumption. The aim of the research is to evaluate the probability of providing the consumption schedule by means of corresponding source on the base of statistic data.

The authors try to solve the given problem, using EM algorithm. The authors could not select the law of SPP generation distribution, applying direct analysis of statistical data, that would satisfy the character of data change, it is suggested to divide the data into the series of mixtures, each of which would correspond to normal law. EM algorithm enables to select optimal, by the criterion of maximum of probability, amount of mixtures. By the values of characteristics of these mixtures the probabilities of emergence both of certain generation and consumed power could be obtained. To reduce the negative impact of random factors, characteristic for certain periods of the day, statistic data were considered by half hour periods of the day.

As a result, the authors succeeded in determining the general coefficient of source stability. Probabilities of covering the possible load in determined period of the day are defined. It enables further to evaluate necessary volume of reserve and start-stop characteristics of energy sources that can be used as the reserve..

**Keywords:** power generation, solar power, load schedule, active consumer, Gaussian mixture distribution, probability characteristics.

### Вступ

Відсоткова частка відновлюваної енергетики в балансі країн Європи і України, зокрема, продовжує зростати. Одним з визначальних чинників цього процесу є державне стимулювання та відносно здешевлення відновлюваних джерел енергії.

Доступність відновлюваних джерел енергії відкриває нові можливості для споживачів на шляху

до їх енергонезалежності [1]. Поява власного джерела енергії у споживача дозволяє перейти йому від пасивного до активного учасника енергоринку.

Для енергетики України актуальним є створення загальних методологічних засад і засобів докорінної модернізації розподільних електричних мереж таким чином, щоб впровадження нових технологій, формування мікромереж (microgrid) [2], як перспективного напрямку використання



розосередженої генерації (РГ) приносили максимальний позитивний ефект у плані покращення техніко-економічних та надійнісних [3] показників їх функціонування [4].

Значна частина приросту потужностей відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) в Україні з початку 2015 року, припадає на генерування електроенергії СЕС та 6% від цього приросту на СЕС, що встановлені безпосередньо у споживача. Збільшення кількості джерел ВДЕ супроводжується виникненням додаткових ризиків, пов'язаних з їх імовірнісною природою і менш стабільними характеристиками, що може призвести до зниження надійності електропостачання [5, 6, 7] та якості електроенергії [8]. Для зменшення вказаних ризиків необхідно здійснювати двосторонню комунікацію, більш інтенсивно впроваджувати інформаційне забезпечення та «інтелектуальний» контроль.

### Мета роботи

Зростання частки відновлюваних джерел енергії, зокрема СЕС, у балансі енергетичної системи країни вимагає розв'язання задачі оцінювання стабільності СЕС і можливості останніх забезпечувати надійне і якісне електропостачання. Принциповою є інформація щодо стабільності джерела в задачі розробки режиму функціонування активного споживача. Отож метою даної роботи є оцінювання показника стабільності на основі імовірнісних характеристик генерування СЕС та споживачів.

### Виклад основного матеріалу

Розглянемо статистичні дані добової потужності генерування електроенергії СЕС та потужності навантаження (рис.1) протягом 2013 року в розрізі кожної доби в проміжок часу 12:30 - 13:00 (рис.2), опрацювання та аналіз даних здійснюється в статистичному програмному середовищі Statistica. Маємо статистичну вибірку  $m=365$  (кількість днів в році), по значенням генерованої потужності СЕС та потужність навантаження визначаємо закон розподілу випадкової величини.

Річний графік генерування (рис. 2) говорить про невисоку здатність СЕС самостійно покривати графік навантаження протягом всього року [9]. У [10] оцінювати імовірність покриття заданого графіка навантаження пропонується за допомогою коефіцієнта стабільності.

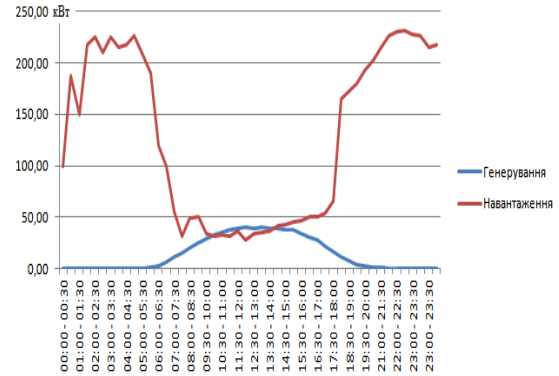


Рис. 1 – Добовий графік навантаження та генерування СЕС

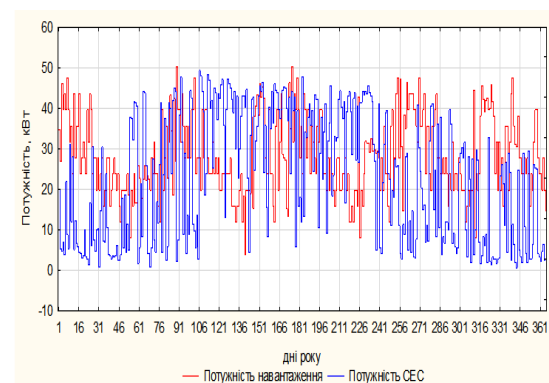


Рис. 2 – Річний графік навантаження та генерування СЕС в проміжку часу 12:30-13:00

Для визначення імовірнісних характеристик потужності генерування СЕС (рис.3) та потужності навантаження (рис.5) визначаємо закон розподілу величини.

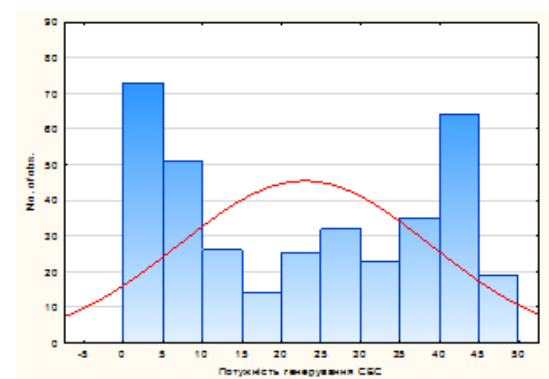


Рис. 3 – Гістограма щільностей потужності генерування СЕС

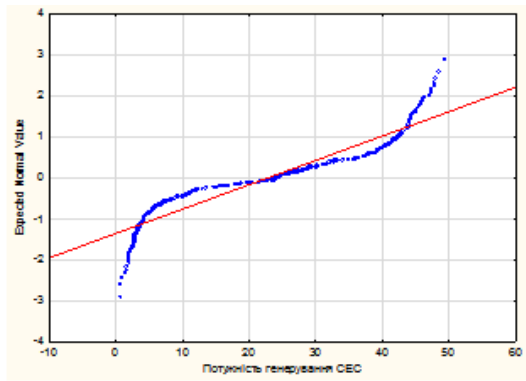


Рис. 4 – Перевірка на нормальність розподілу потужності генерування СЕС

Гістограма щільності потужності генерування (рис. 3), має полімодальний закон розподілу (наявність двох і більше мод вибірки). Така полімодальність може бути викликана залежністю графіка генерування СЕС від змінних погодних умов або сезонних змін.

Провівши перевірку на нормальність для розподілу потужності генерування СЕС (рис. 4) робимо висновок про невідповідність даних розподілів нормальному закону.

Проводимо аналіз графіка навантаження в заданий проміжок часу (12:30 – 13:00).

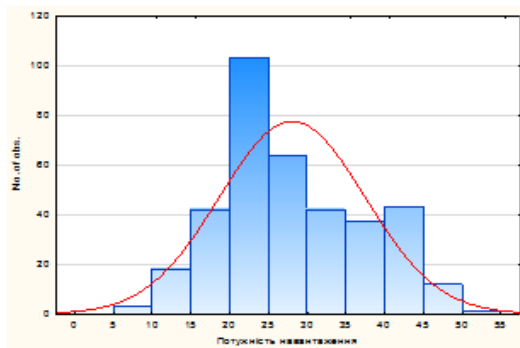


Рис. 5 – Гістограма щільностей потужності навантаження

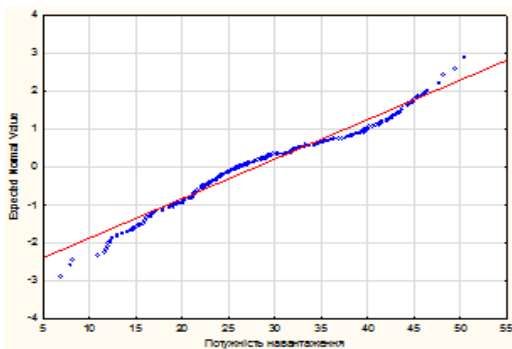


Рис. 6 – Перевірка на нормальність розподілу потужності навантаження

Як видно (рис. 3, рис. 5) графіки генерування СЕС та навантаження мають полімодальні закони розподілу.

В тих випадках, коли «форму» розподілу не вдається описати одним розподілом, можна описати її за допомогою суміші розподілів. Серед інших, можна виділити модель гаусової суміші [11], яка представляє собою зважену суму  $k$  компонентів, щільність розподілу якого має вигляд:

$$p(x) = \sum_{j=1}^m w_j p_j(x), \quad (1)$$

де  $p_j(x)$  – функція щільності розподілу  $j$ -тої компоненти суміші,  $w_j$  – вага  $j$ -тої компоненти суміші

(апріорна імовірність)  $\sum_{j=1}^k w_j = 1, w_j \geq 0, j = 1 \dots k$  –

кількість компонент в суміші.

Функція щільності розподілу має вигляд:

$$p_j(x) = \frac{1}{(2\pi)^{\frac{k}{2}} |\zeta_j|^{\frac{1}{2}}} e^{\left(-\frac{1}{2}(x-\mu_j)^T \zeta_j^{-1}(x-\mu_j)\right)}, \quad (2)$$

де  $\mu_j$  – математичне очікування  $j$ -тої компоненти,  $\zeta_j$  – коваріаційна матриця  $j$ -тої компоненти, що має зміст середньоквадратичного відхилення.

Функції правдоподібності належать параметричному сімейству розподілів  $\varphi(x; \theta)$  і відрізняються тільки значеннями параметра  $p_j(x) = \varphi(x; \theta_j), \theta_j = \{\mu_j, \Sigma_j\}$  при цьому  $\varphi$  – фіксована функція.

Іншими словами, вибрати об'єкт  $x$  із суміші  $p(x)$  означає вибрати його із розподілу  $p_j(x)$  з імовірністю  $w_j$ .

Задача розщеплення суміші вирішується коли маючи вибірку  $X^m$  випадкових величин з суміші  $p(x)$ , знаючи число  $k$  і функцію  $\varphi$ , потрібно оцінити вектор параметрів

$$\Theta_j = (w_j, \theta_j). \quad (3)$$

В задачі визначення розподілу випадкової величини на певному проміжку часу, загальна математична модель розподілу буде описуватись рівнянням (1). Застосування гаусових сумішей для визначення закону розподілу генерування СЕС та потужності навантаження обумовлено двома основними причинами. Перша, можливість врахування різних факторів, що впливають на зміну генерування (погодні умови, зміну сезонів), та для потужності навантаження (режим великих та малих

навантажень). Друга, висока здатність гаусової суміші до апроксимації довільних розподілів.

Розщеплення гаусової суміші проводимо за допомогою методу оцінки-максимізації (expectation-maximization) правдоподібності [12]. EM-алгоритм складається з ітераційного повторення двох кроків. На E-кроці вираховуємо очікуване значення (expectation) вектора прихованих параметрів  $G$  за поточним приближенням вектора параметрів  $\Theta$ . На M-кроці вирішується задача максимізації правдоподібності (maximization) і знаходиться наступне наближення вектора  $\Theta$ , за поточними значеннями векторів  $G$  та  $\Theta$ .

**E-крок.** Позначимо щільність імовірності як  $p(x, \theta_j)$ , того що об'єкт  $x$  отриманий з  $j$ -тої компоненти суміші. Згідно з формулою умовної ймовірності:

$$p(x, \theta_j) = p(x)P(\theta_j | x) = w_j p_j(x). \quad (4)$$

Позначимо,  $g_{ij} = P(\theta_j | x_i)$ . Це невідома апостеріорна імовірність того, що  $x_i$  отриманий з  $j$ -тої компоненти суміші. Приймаємо ці величини в якості прихованих змінних, тобто  $G = (g_{ij}) = (g_{1...g_j})$ , де  $g_j$  –  $j$ -й стовбець матриці  $G$ . Отже, кожен об'єкт може бути згенерований лише одною компонентою. Згідно формули повної імовірності маємо умову нормування для  $g_{ij}$ ,  $\sum_{j=1}^k g_{ij} = 1$ , для всіх  $i=1...m$ .

Знаючи параметри  $w_j, \theta_j$ , можна визначити  $g_{ij}$  за формулою Байеса:

$$g_{ij} = \frac{w_j p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} \quad (5)$$

**M- крок.** Маючи значення прихованих змінних  $g_{ij}$ , вирішуємо оптимізаційну задачу:

$$Q(\Theta) = \ln \prod_{i=1}^m p(x_i) = \sum_{i=1}^m \ln \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \rightarrow \max(\Theta) \quad (6)$$

для обмеження  $\sum_{j=1}^k w_j = 1$ . Запишемо лагранжіан цієї оптимізаційної задачі:

$$L(\Theta; X^m) = \sum_{i=1}^m \ln \left( \sum_{j=1}^k w_j p_j(x_i) \right) - \lambda \left( \sum_{j=1}^k w_j - 1 \right) \quad (7)$$

Прирівнюємо до нуля похідну лагранжіана по  $w_j$ :

$$\frac{\partial L}{\partial w_j} = \sum_{i=1}^m \frac{p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} - \lambda = 0, \quad j=1, \dots, k \quad (8)$$

Помножимо ліву та праву частини на  $w_j$ , додамо всі  $k$  цих рівностей, і змінимо місцями знаки додавання за  $j$  та  $i$ :

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^k \frac{w_j p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} = \lambda \sum_{j=1}^k w_j$$

З чого випливає, що  $\lambda = m$ . Тепер знову помножимо ліву та праву частини (8) на  $w_j$ , підставимо  $\lambda = m$ , і відмічаючи схожість з (5), отримаємо вираз ваги компонентів через приховані змінні:

$$w_j = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \frac{w_j p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m g_{ij}, \quad j=1, \dots, k. \quad (9)$$

Легко перевірити, що обмеження-нерівності  $w_j \geq 0$ , будуть виконані на кожній ітерації, якщо вони виконані для початкового наближення.

Прирівнюємо нулю похідну лагранжіана за  $\theta_j$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial L}{\partial \theta_j} &= \sum_{i=1}^m \frac{w_j}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} \frac{\partial}{\partial \theta_j} p_j(x_i) = \\ &= \sum_{i=1}^m \frac{w_j p_j(x_i)}{\sum_{s=1}^k w_s p_s(x_i)} \frac{\partial}{\partial \theta_j} \ln p_j(x_i) = \\ &= \sum_{i=1}^m g_{ij} \frac{\partial}{\partial \theta_j} \ln p_j(x_i) = \frac{\partial}{\partial \theta_j} \sum_{i=1}^m g_{ij} \ln p_j(x_i) = 0, \end{aligned}$$

Отримана умова співпадає з необхідною умовою максимуму в задачі максимізації зваженої правдоподібності:

$$\sum_{i=1}^m g_{ij} \ln \varphi(x_i; \theta_j) \rightarrow \max(\theta_j), \quad j=1, \dots, k \quad (10)$$

Визначимо оптимальну кількість компонент в загальній моделі суміші гаусового розподілу, за допомогою «крутого слона», при цьому вирішуємо задачу декілька раз для поступового збільшення (зменшення) значень  $k$ , для якого будемо графік

залежності правдоподібності вибірки (5) від  $k$ , і обираємо найменше  $k$ , при якому графік відображає різкий скачок правдоподібності.

Метод «крутого слона» добре себе зарекомендував, для нашої задачі, так як можна візуально оцінити приблизну кількість мод у вибірці. Наявність «крутого слона» на графіку залежності свідчить про те, що модель добре підбрана.

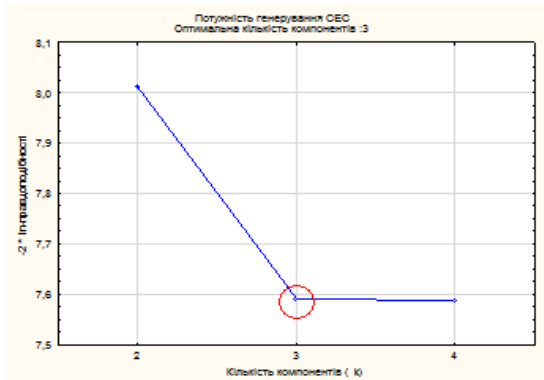


Рис. 7 – Графік залежності логарифму правдоподібності від кількості компонент в суміші потужності генерування СЕС.

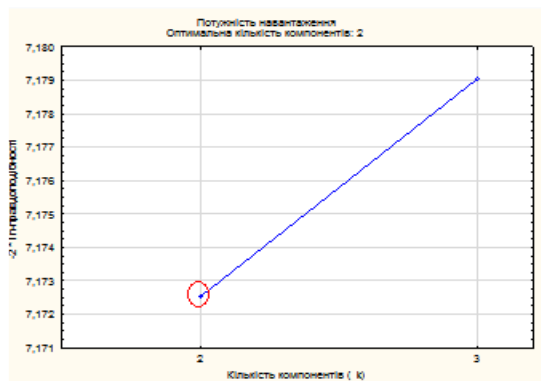


Рис. 8 – Графік залежності логарифму правдоподібності від кількості компонент в суміші потужності навантаження.

Оптимальна кількість компонентів кожної суміші для моделі потужності генерування СЕС (рис.7) – 3, та потужності навантаження (рис.8) – 2.

Результати реалізації алгоритму оцінки-максимізації правдоподібності (1) подані графічно (рис.9), без врахування вагових коефіцієнтів, а параметри зведені до таблиці 1.

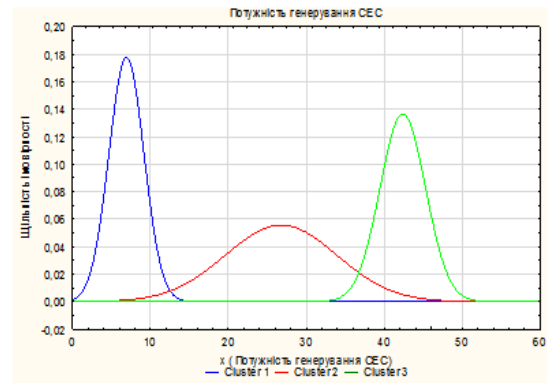


Рис. 9 – Графічне зображення моделі компонент гаусової суміші для потужності генерування СЕС

Таблиця 1 – Параметри моделі гаусової суміші потужності генерування СЕС.

Параметри	K1	K2	K3
Мат. очікування, $\mu$	6.92	26.19	42.46
Ср-відхилення, $\sigma$	2.25	5.86	2.84
Коеф. варіації, $V$	0.325	0.224	0.067
Вага, $w$	0.3965	0.3211	0.2823
Мін. значення	0.6240	13.62	37.02
Макс. значення	13.48	36.348	49.304

Аналіз отриманих даних (табл. 1), дає змогу дати характеристику суміші нормальних розподілів генерування СЕС в заданий період. Так, перший компонент (K1) моделі суміші потужності генерування СЕС буде мати параметри характерні низькій потужності генерування (сезонний та погодний вплив на генерування) найчастіше така потужність генерування зустрічається в зимній період, другий компонент (K2) для середньої потужності генерування (описує режим генерування в сонячні дні), а третій компонент (K3) характеризує потужність генерування СЕС, що відповідає великій потужності генерування СЕС (звичай це літній період, або дні з хорошою, сонячною погодою).

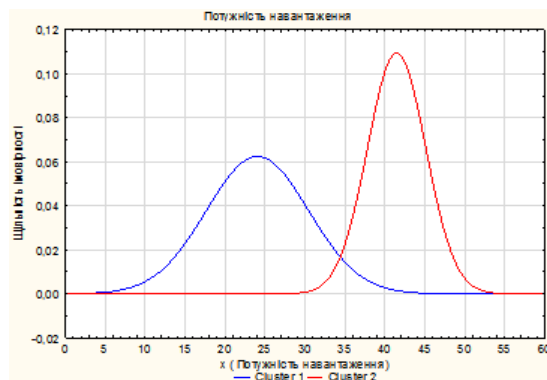


Рис. 10 – Графічне зображення моделі компонент гаусової суміші для потужності навантаження

Таблиця 2 – Параметри моделі гаусової суміші потужності навантаження.

Параметри	K1	K2
Мат. очікування, $\mu$	23.03	40.66
Ср-відхилення, $\sigma$	5.71	3.82
Коеф. варіації, V	0.248	0.094
Вага, w	0.7487	0.2512
Мін. значення	3.96	35.64
Макс. значення	35.04	50.28

Параметри суміші потужності навантаження (табл. 2) дають змогу оцінити режими великих (K2) та малих навантажень (K1).

Враховуючи вагові коефіцієнти кожної компоненти суміші, будемо розподіл випадкової статистичної величини потужності генерування СЕС (рис.11) та потужності навантаження (рис. 12),

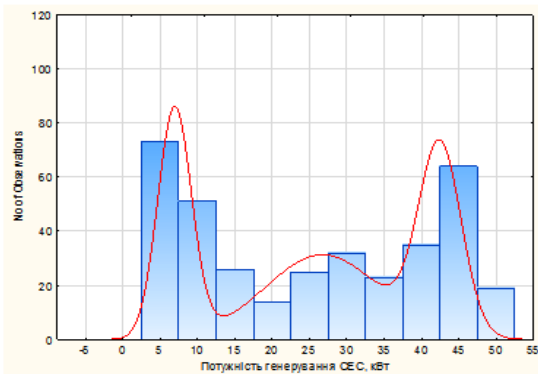


Рис. 11 – Графічне зображення розподілу потужності генерування СЕС з урахуванням вагових коефіцієнтів компонент суміші

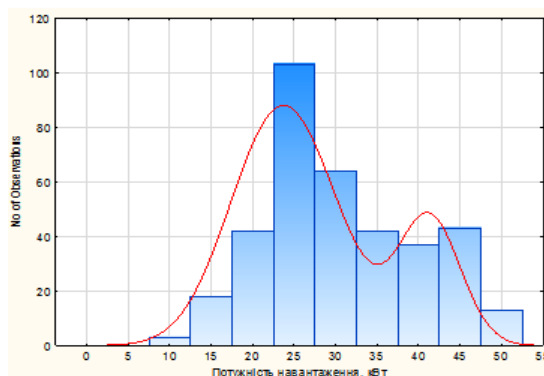


Рис. 12 – Графічне зображення розподілу потужності навантаження з урахуванням вагових коефіцієнтів компонент суміші

Візуальне оцінювання графіка відповідності закону розподілу гаусових сумішей емпіричним даним, підтверджується проведенням тестом Колмогорова-Смірнова, згідного якого значення

$p=0.68$  для розподілу потужності СЕС (рис. 11) та потужності навантаження (рис. 12)  $p=0.77$ , що значно більше 0.05, тому можемо вважати, що розподіл генерування потужності СЕС та навантаження відбувається за моделлю гаусової суміші (1).

Отримавши дані про розподіл потужності генерування СЕС (табл. 1) та навантаження (табл. 2), можна оцінити імовірність покриття потужністю генерування СЕС заданого графіка навантаження (рис. 13).

Для більш точного аналізу покриття графіка навантаження та (або) забезпечення балансу потужності, пропонується розбити кожну компоненту генерування і навантаження на складові з кроком 1кВт.

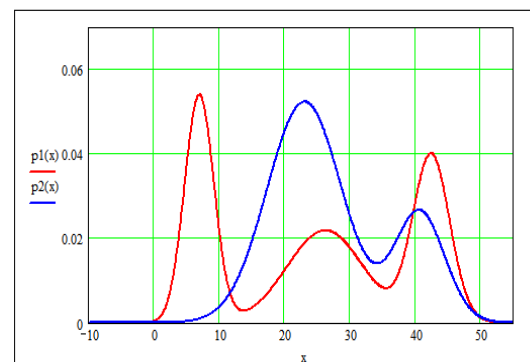


Рис. 13 – Графік щільностей потужностей навантаження  $p_2(x)$  та генерування СЕС  $p_1(x)$  з урахуванням вагових коефіцієнтів

Для визначення імовірності появи  $u$ -тої складової компоненти графіка навантаження і генерування на проміжку часу з 12:30-13:00 скористаємося інтегралом імовірності, який для нормального розподілу буде мати вигляд:

$$F(P_u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{P_{min,u}}^{P_{max,u}} e^{-\frac{t^2}{2}} dP,$$

де  $t = \frac{(P_u - \mu_u)}{\sigma_u}$  а  $P_u$  відповідно приймає значення  $P_{min}$

та  $P_{max}$  кожної складової компоненти генерування чи навантаження.

Визначивши імовірність появи  $u$ -тої складової компоненти генерування  $P_{G,u}$  та навантаження  $P_{N,u}$ , визнаємо імовірність покриття  $u$ -тої компоненти навантаження генеруванням СЕС:

$$P_{покр,u} = P_{N,u} \sum_{u=u+1}^d P_{G,u},$$

де  $d$  – загальна кількість складових компонент генерування.

А повна імовірність покриття навантаження генеруванням СЕС на заданому часовому проміжку буде дорівнювати сумі імовірностей покриття всіх складових компонент навантаження:

$$P_{\text{покр}} = \sum_{u=1}^z P_{\text{покр}_u} \quad (11)$$

де  $z$  – кількість імовірностей покриття складових компонент суміші навантаження.

Для заданого проміжку часу доби 12:30-13:00 імовірність покриття заданого графіка навантаження генеруванням СЕС становить  $P_{\text{покр}} = 0.398$ .

За вказаним алгоритмом, проводимо розрахунок  $P_{\text{покр}}$  з кроком 30 хв в розрізі кожної доби протягом року, результати розрахунку показані на графіку (рис. 14)

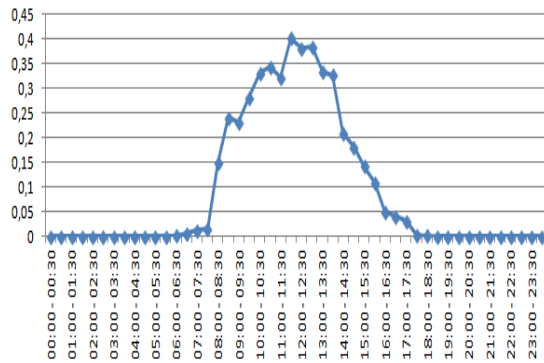


Рис. 14 – Графік залежності імовірності покриття графіка навантаження генеруванням СЕС від часу доби

Отримана залежність дозволяє визначити імовірність покриття заданого графіка споживання протягом доби:

$$P_{\text{покр.д}} = \frac{1}{v} \sum_{a=1}^v P_{\text{покр}_v}$$

де  $v$  – це кількість часових проміжків, на яких визначалась імовірність покриття,  $P_{\text{покр}_v}$  – імовірність покриття  $v$ -того часового проміжку, визначається за (11).

Для прикладу, що розглядається в роботі  $P_{\text{покр.д}} = 0.15$ .

### Висновки

Використання ЕМ-алгоритму дозволяє отримати імовірнісні характеристики як процесу

генерування на сонячних електричних станціях, так і процесу споживання.

За отриманими характеристиками відносно просто можна отримати імовірність покриття графіка навантаження відповідним джерелом відновлюваної енергії.

Оцінювання імовірності забезпечення графіка навантаження проводиться в роботі за півгодинними періодами, на які розбита доба. Це, по-перше, дозволяє уникнути помилок аналізу зумовлених індивідуальними особливостями періоду, по-друге, отримати вихідну інформацію для визначення об'єму резерву та його маневрених характеристик.

### Список літератури

- 1 **Santiago, G.** Prosumer-based control architecture for the future electricity grid / **G. Santiago, M. Costley, N. Ainsworth** // *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)* – 2011. – No. 1. – P. 43-48. – doi:10.1109/CCA.2011.6044467.
- 2 **Agarwal, Y.** Understanding the role of buildings in a smart microgrid / **Y. Agarwal, T. Weng, R. Gupta** // *2011 Design, Automation & Test in Europe*. – 2011. P. 1-6. – doi:10.1109/DATE.2011.5763195.
- 3 **Buslavets, O.** Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / **O. Buslavets, P. Legnuk, O. Rubanenko** // *Eastern-European journal of enterprise technologies* – 2015. – No. 2/8 (74). – P. 35-41. – doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
- 4 **Попов, В.** Алгоритм многокритериального управления режимами работы микросетей / **В. Попов, Е. Ярмолюк, П. Замковой** // *Восточно-европейский журнал передовых технологий*. – 2014. – № 2. – P. 61-68. – doi:10.15587/1729-4061.2014.23158.
- 5 **Chowdhury, A. A.** Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis / **A. Chowdhury** // *IEEE Transactions on Industry Application*. – 2003. – Vol.39. – No.5. – P. 1493-1498. – doi:10.1109/TIA.2003.816554.
- 6 **Bae, I.** Reliability Evaluation of Distributed Generation Based on Operation Mode. / **I. Bae, J. Kim** // *IEEE Transactions on Power Systems*. – 2007. – Vol.22. – No.2. – P. 785-790. – doi:10.1109/TPWRS.2007.894842.
- 7 **Medeiros, R.** Assessment of Operating Condition Dependent Reliability Indices in Microgrids. / **R. Medeiros, X. Xu, E. Makram** // *Journal of Power and Energy Engineering*. – 2016. – No. 4. – P. 56-66. – doi:10.4236/jpee.2016.44006.
- 8 **Kondo, T.** Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generations using facts devices / **Jumpei Baba, Akihiko Yokoyama** // *Electrical Engineering in Japan* – 2008. – Vol. 165. – № 3. – P. 16-28. – doi:10.1002/ej.20499.
- 9 **Попов, В.** Пути рационального формирования и управления режимами интегрированных систем электроснабжения / **В. Попов, В. Ткаченко, Е. Луцько** // *Праці Інституту електродинаміки Національної*



- академії наук України. – Київ, 2010. – С. 60-65. – (Спец. вип.).
- 10 **Lezhniuk, P. D.** Method for determination of optimal installed capacity of renewable sources of energy by the criterion of minimum losses of active power in distribution system / **P. D. Lezhniuk, V. A. Komar, D. S. Sobchuk** // *Energy and Power Engineering*. – 2014. – Vol. 6. – No.3. – P. 37-46. – doi:10.4236/epe.2014.63005.
  - 11 **Miao, F.** Adaptive Gaussian Mixture Model-Based Relevant Sample Selection for JITL Soft Sensor Development / **F. Miao, G. Zhiqiang, S. Zhihuan** // *Industrial & Engineering Chemistry Research* – 2014. – No. 51. – P. 19979-19986. – doi:10.1021/ie5029864.
  - 12 **Jeroen, K.** An EM algorithm for the estimation of parametric and nonparametric hierarchical nonlinear models / **K. Jeroen** // *Statistica Neerlandica*. – 2004. – Vol.58. – No. 2. – P. 220-233. – doi:10.1046/j.00390402.2003.00257.x.
  - 5 **Chowdhury, A. A.** Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis. *IEEE Transactions on Industry Application*, 2003, **5(39)**, 1493-1498, doi:10.1109/TIA.2003.816554.
  - 6 **Bae, I., Kim, J.** Reliability Evaluation of Distributed Generation Based on Operation Mode. *IEEE Transactions on Power Systems*, 2007, **2(22)**, 785-790, doi:10.1109/TPWRS.2007.894842.
  - 7 **Medeiros, R., Xu, X., Makram, E.** Assessment of Operating Condition Dependent Reliability Indices in Microgrids. *Journal of Power and Energy Engineering*, 2016, **4**, 56-66, doi:10.4236/jpee.2016.44006.
  - 8 **Kondo, T., Baba, J., Yokoyama, A.** Voltage control of distribution network with a large penetration of photovoltaic generations using facts devices. *Electrical Engineering in Japan*, 2008, **3(165)**, 16-28, doi:10.1002/ej.20499.
  - 9 **Popov, V., Tkachenko, V., Lutsko, E.** Ways rational management regimes and the formative yntehryrovannyyh electric power systems. *Proceedings of the Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine*, Kyiv, 2010, 60-65.
  - 10 **Lezhniuk, P. D., Komar, V. A., Sobchuk, D. S.** Method for determination of optimal installed capacity of renewable sources of energy by the criterion of minimum losses of active power in distribution system. *Energy and Power Engineering*, 2014, **3(6)**, 37-46, doi:10.4236/epe.2014.63005.
  - 11 **Miao, F., Zhiqiang, G., Zhihuan, S.** Adaptive Gaussian Mixture Model-Based Relevant Sample Selection for JITL Soft Sensor Development. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2014, **51**, 19979-19986, doi:10.1021/ie5029864.
  - 12 **Jeroen, K.** An EM algorithm for the estimation of parametric and nonparametric hierarchical nonlinear models. *Statistica Neerlandica*, 2004, **2(58)**, 220-233, doi:10.1046/j.00390402.2003.00257.x.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Santiago, G., Costley, M., Ainsworth, N.** Prosumer-based control architecture for the future electricity grid. *IEEE International Conference on Control Applications (CCA)*, 2011, **1**, 43-48, doi:10.1109/CCA.2011.6044467.
- 2 **Agarwal, Y., Weng, T., Gupta, R.** Understanding the role of buildings in a smart microgrid. *2011 Design, Automation & Test in Europe*, 2011, 1-6, doi:10.1109/DATE.2011.5763195.
- 3 **Buslavets, O., Legnuk, P., Rubanenko, O.** Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2015, **2/8 (74)**, 35-41, doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
- 4 **Popov, A., Yarmolyuk, E., Zamkovoy, P.** Algorithm of multi-criteria management modes microgrids. *East European magazine of enterprise technology*, 2014, **2**, 61-68, doi:10.15587/1729-4061.2014.23158.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Лежнюк Петро Дем'янович** – доктор технічних наук, професор, Вінницький національний технічний університет, завідувач кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: lpd@inbox.ru

**Lezhniuk Petro D.** – Dr. Sc., Professor, Head of Department of power plants and systems, Vinnitsa National Technical University, Vinnitsa, Ukraine.; e-mail: lpd@inbox.ru.

**Комар В'ячеслав Олександрович** – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний технічний університет, доцент кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: kvo76@mail.ru

**Komar Vyacheslav O.** - Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, assistant professor of electrical plants and systems; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: kvo76@mail.ru.

**Кравчук Сергій Васильович** – аспірант, Вінницький національний технічний університет, аспірант кафедри електричних станцій і систем; Вінниця, Україна; e-mail: w1\_1992@mail.ru.

**Kravchuk Sergey V.** - postgraduate student, Vinnitsa National Technical University, graduate student of power plants and systems; Vinnitsa, Ukraine; e-mail: w1\_1992@mail.ru.

Будь ласка посилайтесь на цю статтю так:

**Лежнюк, П. Д.** Оцінювання імовірнісних характеристик генерування сонячних електростанцій в задачі інтелектуалізації локальних електричних систем / **П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 92-100. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.14.

*Please cite this article as:*

**Lezhniuk, P., Komar, V., Kravchuk, S.** Evaluation probabilistic characteristics of solar power generation in applications of intellectualization local electric systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 92-100, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.14.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Лежнюк, П. Д.** Оценка вероятностных характеристик генерирования солнечных электростанций в задаче интеллектуализации локальных электрических систем / **П. Д. Лежнюк, В. О. Комар, С. В. Кравчук** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 92-100. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.14.

**АНОТАЦІЯ** В роботі розглядається актуальний питання аналізу ймовірнісних характеристик генерування відновлюваних джерел електроенергії, в частині сонячних електростанцій (СЕС). Проаналізовано закон розподілу генерування сонячної електростанції для визначеного часу доби впродовж року. Представлена математична модель гауссових сумішей, що дозволяє отримати основні характеристики ймовірнісного характеру генерування сонячної електростанції. Оцінено можливість узгодження генерування сонячної електростанції з добовими графіками споживання. Визначено ймовірність покриття заданого графіка навантаження генеруванням СЕС впродовж визначеного часу доби впродовж всього року.

**Ключові слова:** потужність генерації, сонячні електростанції, графік навантаження, активний споживач, гауссові суміші розподілу, ймовірнісні характеристики.

*Надійшла (received) 12.05.2016*



## МЕТОД РАСЧЕТА ПОГЛОЩЕННОЙ (ЭКВИВАЛЕНТНОЙ) ДОЗЫ И МОЩНОСТИ ПОГЛОЩЕННОЙ (ЭКВИВАЛЕНТНОЙ) ДОЗЫ ИОНИЗИРУЮЩЕГО ИЗЛУЧЕНИЯ

**В. В. МОРГУНОВ<sup>1\*</sup>, Н. В. ДИДЕНКО<sup>2</sup>, Р. М. ТРИЩ<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> УИПА, Харьков, УКРАИНА

<sup>2</sup> ХНАДУ, Харьков, УКРАИНА

\*email: volodymyr.morgunov@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** В статье предложен метод расчета поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы ионизирующего излучения (гамма-, нейтронное и электронное излучение) в точке. Предложены аппроксимирующие функции и рассчитаны соответствующие коэффициенты. Приведены графики зависимостей коэффициентов перевода флюенса частиц и флюенса энергии частиц в поглощенную (эквивалентную) дозу в зависимости от энергии частиц.

**Ключевые слова:** ионизирующее излучение, численное моделирование, GEANT4, поглощенная и эквивалентная доза, мощность поглощенной (эквивалентной) дозы.

## CALCULATION METHOD OF THE ABSORBED (EQUIVALENT) DOSE AND ABSORBED (EQUIVALENT) DOSE RATE OF THE IONIZING RADIATION

**V. MORGUNOV<sup>1\*</sup>, N. DIDENKO<sup>2\*</sup>, R. TRISHCH<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> UEPA, Kharkov, UKRAINE

<sup>2</sup> KhNAHU, Kharkov, UKRAINE

\*email: volodymyr.morgunov@gmail.com

**ABSTRACT** One of the perspective way to calculate absorbed (equivalent) dose and their rate is numerical simulation. GEANT4 is one of the software toolkit for the simulation of the passage of particles through matter. The article is devoted to define correct way of dose and dose rate calculation as dose rate should be calculated at the point; correct way of dose conversion coefficient approximation by piecwise continuous function. Calculation method of the absorbed (equivalent) dose and absorbed (equivalent) dose rate of ionizing radiation (gamma, neutron and electron radiation) at the point is proposed in the article. Approximating functions are proposed and the corresponding coefficients are calculated. Figures with coefficients dependencies of particles fluence and particle fluence energy depending on the energy of the particles are given. These coefficients are needed for calculations of absorbed (equivalent) dose. The absorbed dose rate calculation method which is used in GEANT4 can not be used for dose rate calculation. Proper mathematical method for absorbed dose rate calculation was chosen and was described in the article. Also, the method of absorbed (equivalent) dose rate calculation are given. Proposed calculation method of the absorbed (equivalent) dose and absorbed (equivalent) dose rate of the ionizing radiation may be used for numerical simulation of ionization radiation passage through the matter, for example, with the use of GEANT4.

**Keywords:** ionization radiation, numerical simulation, GEANT4, absorbed and equivalent dose, absorbed (equivalent) dose rate.

### Введение

Численные методы расчета поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы от радиоактивных источников находят широкое применение. Это обусловлено прогрессом в разработке, усовершенствованию, верификации программного обеспечения и ростом производительности компьютерной техники.

Программы для численного моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество используют метод Монте-Карло [1]. За последние десятилетия разработано большое количество (около десятка) программных комплексов для такого моделирования, но чаще всего используются следующих три программных комплекса: GEANT4 [2, 3], MCNP [4] и FLUKA [5].

Хотя эти программные комплексы используют метод Монте-Карло и дают согласующиеся результаты [6], разница в их частном применении может делать один комплекс предпочтительнее других. В программных комплексах, моделирующих прохождение ионизирующего излучения через вещество, можно получить следующую информацию: кинетическую энергию, момент частицы; длину шага; поглощенную энергию частицы; вещество, в котором произошло поглощение энергии частицы; поглощенную дозу и др.

Поглощенная доза в упомянутых программных комплексах рассчитывается в конечном объеме. Для последующего расчета мощности поглощенной дозы желательно знать поглощенную дозу в точке. Приведенный метод позволяет рассчитать поглощенную дозу и мощность поглощенной дозы в

точке, что дает более точные расчеты.

### Цель работы

В статье приведен метод определения поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы для различных источников ионизирующего излучения: гамма-лучей, нейтронов и электронов в точке, что необходимо для проведения численного моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество. Приведены аппроксимирующие функции для расчета коэффициентов перевода флюенса частиц и флюенса энергии частиц в поглощенную (эквивалентную) дозу в зависимости от энергии частиц.

### Расчет поглощенной (эквивалентной) дозы

Для расчета **поглощенной дозы гамма-излучения** используется следующий подход. Поглощенная доза гамма излучения в точке рассчитывается по следующей формуле:

$$dD_{\gamma} = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \Psi \frac{\mu_{en}}{\rho}, \quad (1)$$

где  $dD_{\gamma}$  – поглощенная доза в точке от гамма-излучения (Флюенс энергии — количество энергии, перенесенной частицами через элементарную площадку, перпендикулярную пучку (для случая

пучка), или через поверхность элементарной сферы (для случая диффузного поля частиц)), Гр;  $\Psi$  – флюенс энергии гамма излучения<sup>1</sup>, МэВ/см<sup>2</sup>;  $\frac{\mu_{en}}{\rho}$  – массовый коэффициент ослабления, см<sup>2</sup>/г.

Для расчета массового коэффициента ослабления  $\frac{\mu_{en}}{\rho}$ , входящего в формулу (1) данные взяты из [7]. На рис. 1 приведены зависимость массового коэффициента ослабления для воды от энергии гамма кванта (обозначены точками). Отображенные на рис. 1 данные в источнике приведены в табличном виде, с большим шагом между соседними значениями энергий гамма кванта, поэтому для расчета поглощенной (эквивалентной) дозы необходимо табличные данные аппроксимировать. С этой целью применялся программный комплекс ROOT [8]. В связи с тем, что с увеличением энергии гамма кванта значение массового коэффициента ослабления быстро уменьшается подобрать аппроксимирующую функцию на весь диапазон энергий не удалось. Для решения этой проблемы диапазон энергий разбивался на малые интервалы энергий гамма кванта, и для каждого интервала подбирались аппроксимирующая функция.

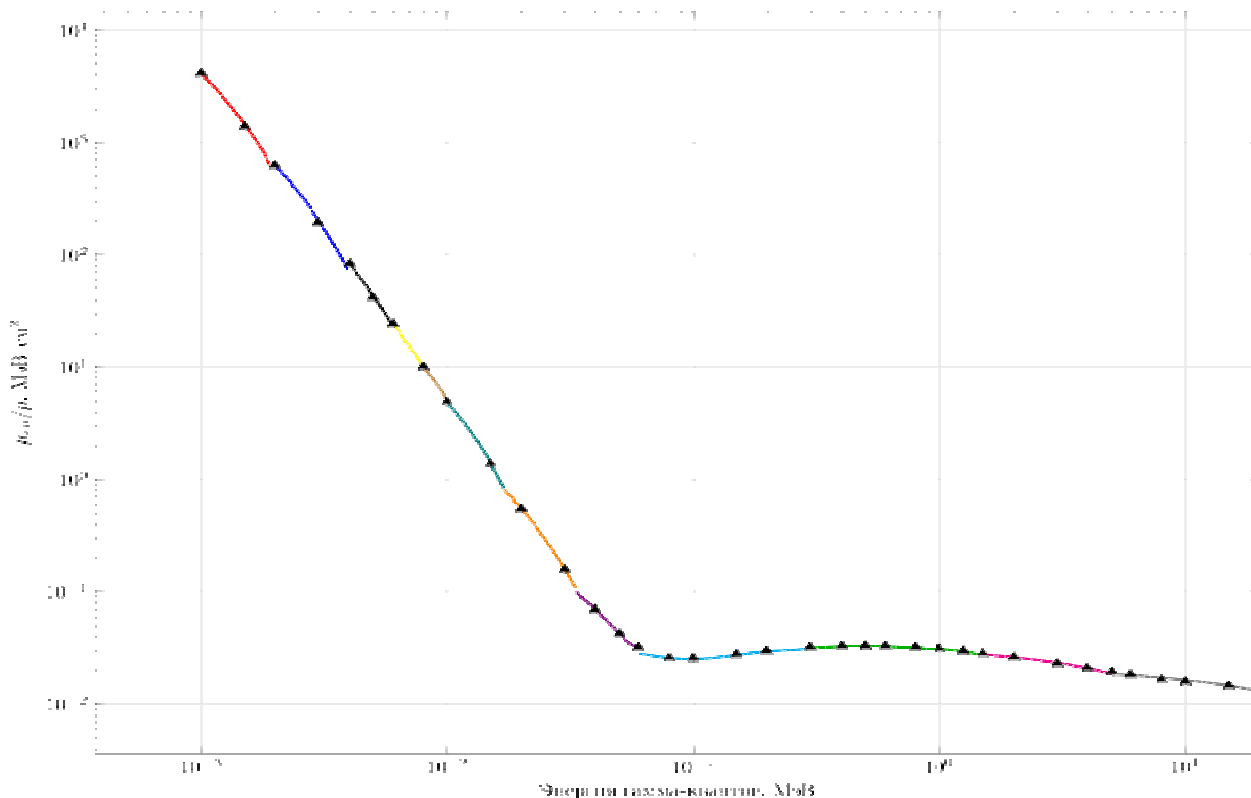


Рис. 1 – Зависимость массового коэффициента ослабления для воды от энергии гамма кванта. ▲ - табличные данные зависимости коэффициента массового ослабления для воды.

Результаты подбора аппроксимирующих функций приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Зависимость коэффициентов аппроксимирующих функций от диапазона энергий гамма-кванта.

Диапазон энергий, МэВ	Вид функции	p <sub>0</sub>	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>	p <sub>5</sub>	p <sub>6</sub>	p <sub>7</sub>
0,0÷0,002	эсп.	10.371	-2063,95						
0,002÷0,004	эсп.	8,64225	6,9475						
0,004÷0,006	эсп.	-1111,52	-636,505						
0,006÷0,008	эсп.	5,83839	-443,043						
0,008÷0,01	эсп.	5,07754	-347,937						
0,01÷0,016	эсп.	4,15907	-256,09						
0,016÷0,032		1,927770.34753	-126,253						
0,032÷0,06	полином.	0.34753	-10.3335	84.65					
0,06÷0,3	полином.	0.06051	-0.98887	9.59759	-34.3428	-5.00379	347.751	-835.313	621.782
0.3÷1.5	полином.	0.022611	0.0318272	0.0640415	-0.358006	0.511662	-0.309909	0.0689375	
1.5÷5.0	эсп.	-3.40742	-0.115632						
5.0÷20.0	эсп.	-3.8712	-0.0238322						

Примечание. В случае, когда в таблице указан вид функции — «эсп.» вид функции соответствует экспоненциальной функции:  $y = \exp(p_0 + p_1 \cdot x)$ ; «полином.» соответствует полиномиальной функции:  $y = p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x^3 + \dots$  причем порядок полиномиальной функции соответствует индексу коэффициента p, для которого указано значение.

Для расчета **поглощенной (эквивалентной) дозы нейтронного излучения** используется подход, аналогичный к расчету поглощенной дозы гамма-излучения. Рассмотрим расчет эквивалентной дозы

нейтронного излучения. Коэффициенты перевода флюенса энергии нейтронов в эквивалентную дозу приведены в табл. А.42 ICRP74 [9] и показаны на рис. 2.

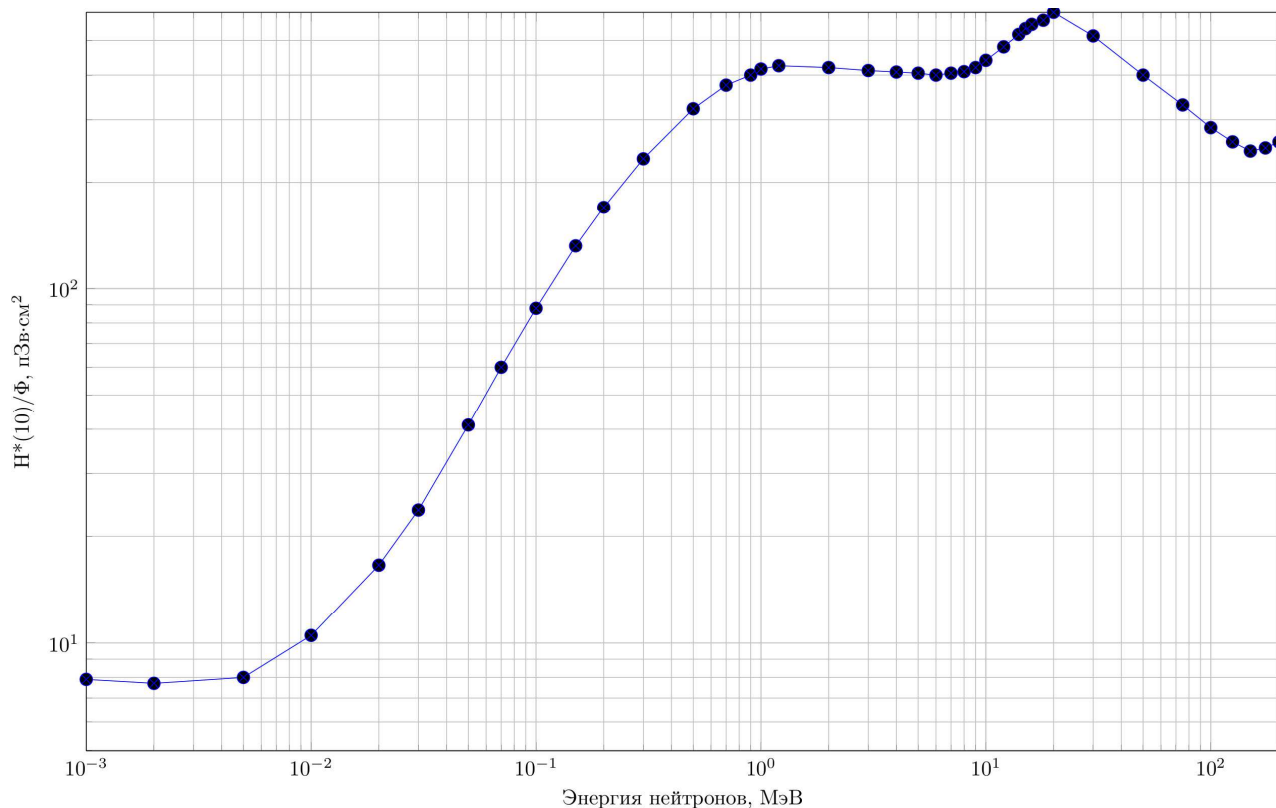


Рис. 2 – Зависимость значения коэффициента перевода флюенса энергии нейтронов в эквивалентную дозу от энергии нейтронов. □ - табличные данные.

Расчет эквивалентной дозы проводится в соответствии со следующей формулой:

$$dD_n = \Phi_n(E) \cdot H(10) / \Phi, \quad (1)$$

где  $dD_n$  — эквивалентная доза в точке от нейтронного излучения, Гр;  $\Phi_n(E)$  — флюенс нейтронного излучения, МэВ/см<sup>2</sup>;  $H^*(10)/\Phi$  — коэффициент перевода флюенса нейтронов в эквивалентную дозу, пЗв/см<sup>2</sup>.

Коэффициент перевода для нейтронов с энергиями, приходящимися между точками графика, аппроксимируется при помощи линейной интерполяции. Для вычисления поглощенной дозы от **электронов** используется следующий подход. Поглощенная доза рассчитывается по следующей формуле:

$$dD_{e^-} = 1,6 \cdot 10^{-10} \cdot \Phi_{e^-}(E) \cdot \frac{S_{col}}{\rho}, \quad (2)$$

где,  $dD_{e^-}$  - поглощенная доза от электронов, Гр;

$\Phi_{e^-}(E)$  - флюенс электронов, см<sup>-2</sup>;  $\frac{S_{col}}{\rho}$  - тормозная

способность воды для электронов, МэВ·см<sup>2</sup>/г.

Значения тормозной способности воды для электронов различных энергий приведены в [10] (см. рис. 3).

Также, как и для гамма-излучения, для определения значений тормозной способности воды для электронов для различных значений энергий электронов, подбирались аппроксимирующие функции. Результаты подбора аппроксимирующих функций приведены в табл. 3.

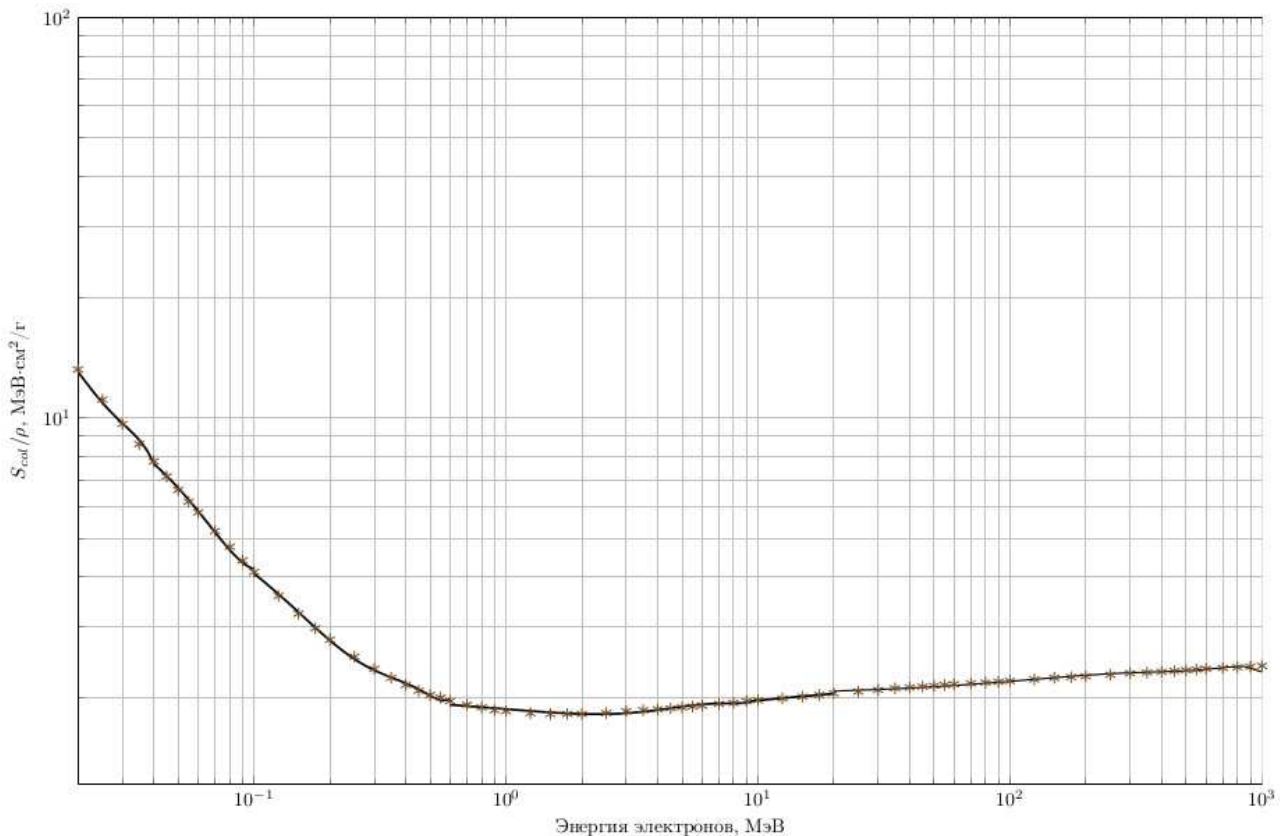


Рис. 3 – Зависимость тормозной способности воды для электронов от энергии электронов.  
\* - табличные данные.

### Выводы

В статье предложен метод определения поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы для различных источников ионизирующего излучения: гамма-лучей, нейтронов и электронов в точке, что необходимо для проведения

численного моделирования прохождения ионизирующего излучения через вещество. Приведены аппроксимирующие функции для расчета коэффициентов перевода флюенса частиц и флюенса энергии частиц в поглощенную (эквивалентную) дозу в зависимости от энергии частиц.

Таблиця 3 – Зависимость коэффициентов аппроксимирующих функций от диапазона энергий электронов.

Диапазон энергий, МэВ	Вид функции	p <sub>0</sub>	p <sub>1</sub>	p <sub>2</sub>	p <sub>3</sub>	p <sub>4</sub>
0.01÷0.04	полином.	42,2388	-2673.44	76059.4	-770632	
0.04÷0.1	полином.	13,3505	-175,489	838,396		
0.1÷0.6	полином.	7.17108	-43.8685	151.899	-240.324	141.624
0.6÷10.0	полином.	2.02582	-0.22147	0.07693 5	-0.00956	0.0004
10.0÷20.0	полином.	1.898	-0.00407	0.00207	-0.00012	2.13333e-06
20,÷100,0	полином.	2.03675	0.00214	- 6.29101e -6	8.35556e -9	-3.9225e-12

Примечание. В случае, когда в таблице указана вид функции — «эксп.» вид функции соответствует экспоненциальной функции:  $y = \exp(p_0 + p_1 \cdot x)$ ; «полином.» соответствует полиномиальной функции:  $y = p_0 + p_1 \cdot x + p_2 \cdot x^2 + p_3 \cdot x^3 + \dots$  причем порядок полиномиальной функции соответствует индексу коэффициента  $p$ , для которого указано значение.

### Список литературы

1. **Brown, F. B.** Recent advances and future prospects for Monte Carlo / **F. B. Brown** // *Progress in nuclear science and technology*. – 2011. – № 2. – P. 1-4.
2. **Allison, J.** Geant4 developments and applications / **J. Allison, K. Amako, J. E. A. Apostolakis, H. A. A. H. Araujo, P. A. Dubois, M. A. A. M. Asai, G. A. P. Cirrone** // *Nuclear Science, IEEE Transactions on*. – 2006. – № 53(1). – P. 270-278. – doi:10.1109/TNS.2006.869826.
3. **Agostinelli, S.** Geant4 - a simulation toolkit / **S. Agostinelli, J. Allison, K. A. Amako, J. Apostolakis, H. Araujo, P. Arce, F. Behner** // *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2003. – № 506(3). – P. 250-303. – doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
4. **Goorley, J. T.** Initial MCNP6 release overview-MCNP6 version 1.0. / **J. T. Goorley, M. James, T. Booth, F. Brown, J. Bull, L. J. Cox, J. Hendricks** // *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-13-22934*. – 2013. – № 1. – P. 1-42. – doi:10.2172/1086758.
5. **Battistoni, G.** The FLUKA code: Description and benchmarking / **G. Battistoni, F. Cerutti, A. Fasso, A. Ferrari, S. Muraro, J. Ranft, P. R. Sala** // *In Hadronic Shower Simulation Workshop(AIP Conference Proceedings)*. – 2007. – Vol. 896. – P. 31-49. – doi:10.1063/1.2720455.
6. **Colonna, N.** Simulations of neutron transport at low energy: A comparison between GEANT and MCNP / **N. Colonna, S. Altieri** // *Health physics*. – 2002. – № 82(6). – P. 840-846.
7. **Hubbell, J. H.** Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements  $z=1$  to 92 and 48 additional substances of dosimetric interest / **J. H. Hubbell, S. M. Seltzer** // *Tech. rep., National 110 Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). Ionizing Radiation Div.* – 1995.
8. **Antcheva, I.** ROOT – A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization / **I. Antchevaa, M. Ballintijna, B. Bellenota, M. Biskupa, R. Bruna, N. Buncica, Ph. Canalb, et al.** // *Computer Physics Communications*. – 2009. – 12(180). – P. 2499-2512. – doi:10.1016/j.cpc.2009.08.005.
9. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *ICRP Publication 74. Ann. ICRP*. – 1996. – 26(3-4).
10. **Berger, M. J.** Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions / **M. J. Berger, J. Coursey, M. Zucker, J. Chang** // *NIST Physics Laboratory*. – 1998.

### Bibliography (transliterated)

1. **Brown, F. B.** Recent advances and future prospects for Monte Carlo. *Progress in nuclear science and technology*, 2011, 2, 1-4.
2. **Allison, J., Amako, K., Apostolakis, J. E. A., Araujo, H. A. A. H., Dubois, P. A., Asai, M. A. A. M., Cirrone, G. A. P.** Geant4 developments and applications. *Nuclear Science, IEEE Transactions on*, 2006, 53(1), 270-278, doi:10.1109/TNS.2006.869826.
3. **Agostinelli, S., Allison, J., Amako, K. A., Apostolakis, J., Araujo, H., Arce, P., Behner, F.** Geant4 – a simulation toolkit. *Nuclear instruments and methods in physics research section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2003, 506(3), 250-303, doi:10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
4. **Goorley, J. T., James, M., Booth, T., Brown, F., Bull, J., Cox, L. J., Hendricks, J.** (2013). Initial MCNP6 release overview-MCNP6 version 1.0. *Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, LA-UR-13-22934*, 2013, 1, 1-42, doi:10.2172/1086758.
5. **Battistoni, G., Cerutti, F., Fasso, A., Ferrari, A., Muraro, S., Ranft, J., Sala, P. R.** The FLUKA code: Description and benchmarking. In *Hadronic Shower Simulation Workshop(AIP Conference Proceedings Volume 896)*, 2007, 896, 31-49, doi:10.1063/1.2720455.
6. **Colonna, N., Altieri, S.** Simulations of neutron transport at low energy: A comparison between GEANT and MCNP. *Health physics*, 2002, 82(6), 840-846.
7. **Hubbell, J. H., Seltzer, S. M.** Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients 1 keV to 20 MeV for elements  $z=1$  to 92 and 48

- additional substances of dosimetric interest. *Tech. rep., National 110 Inst. of Standards and Technology-PL, Gaithersburg, MD (United States). Ionizing Radiation Div, 1995.*
8. **Antchevaa, I., Ballintijna, M., Bellenota, B., Biskupa, M., Bruna, R., Buncica, N., Canalb, Ph., et al.** ROOT – A C++ framework for petabyte data storage, statistical analysis and visualization. *Computer Physics Communications*, 2009, **12(180)**, 2499-2512, doi:10.1016/j.cpc.2009.08.005.
9. International Commission on Radiological Protection. Conversion coefficients for use in radiological protection against external radiation. *ICRP Publication 74. Ann. ICRP*, 1996, **26(3-4)**.
10. **Berger, M. J., Coursey, J., Zucker, M., Chang, J.** Stopping-power and range tables for electrons, protons, and helium ions, *NIST Physics Laboratory*, 1998.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Моргунов Владимир Викторович** – кандидат технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, доцент кафедры физики, теоретической и общей электротехники; г. Харьков, Украина; e-mail: volodymyr.morgunov@gmail.com.

**Volodymyr Morgunov** – Ph. D., Docent, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; e-mail: volodymyr.morgunov@gmail.com.

**Триш Роман Михайлович** – доктор технических наук, Украинская инженерно-педагогическая академия, профессор кафедры охраны труда, стандартизации и сертификации; г. Харьков, Украина; e-mail: trich\_@ukr.net.

**Roman Trishch** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Ukrainian Engineering Pedagogics Academy, Kharkiv, Ukraine; e-mail: trich\_@ukr.net.

**Диденко Наталья Викторовна** – Харьковский национальный автомобильно-дорожный университет, ассистент кафедры метрологии и БЖД, г. Харьков, Украина; e-mail: nataly.v.didenko@gmail.com.

**Natalya Didenko** – Assistant lecturer, Kharkiv National Automobile and Highway University, Kharkiv, Ukraine; e-mail: nataly.v.didenko@gmail.com.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Моргунов, В. В.** Метод расчета поглощенной (эквивалентной) дозы и мощности поглощенной (эквивалентной) дозы ионизирующего излучения / **В. В. Моргунов, Р. М. Триш, Н. В. Диденко** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 101-106. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.

*Please cite this article as:*

**Morgunov, V., Trishch, R., Didenko, N.** Calculation method of the absorbed (equivalent) dose and absorbed (equivalent) dose rate of the ionizing radiation. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 101-106, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Моргунов, В. В.** Метод розрахунку поглиненої (еквівалентної) дози і потужності поглиненої (еквівалентної) дози іонізуючого випромінювання / **В. В. Моргунов, Р. М. Триш, Н. В. Діденко** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 101-106. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.15.

**АНОТАЦІЯ** У статті запропоновано метод розрахунку поглиненої (еквівалентної) дози і потужності поглиненої (еквівалентної) дози іонізуючого випромінювання (гамма-, нейтронне і електронне випромінювання) в точці. Запропоновано апроксимуючі функції і розраховані відповідні коефіцієнти. Наведено графіки залежностей коефіцієнтів перекладу флюенса частинок і флюенса енергії частинок в поглинену (еквівалентну) дозу в залежності від енергії частинок.

**Ключові слова:** іонізуюче випромінювання, чисельне моделювання, GEANT4, поглинена і еквівалентна доза, потужність поглиненої (еквівалентної) дози.

*Поступила (received) 22.05.2016*

## ОПЕРАТИВНЕ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ

О. Є. РУБАНЕНКО

Кафедра електричних станцій і систем, Вінницький національний технічний університет, Вінниця, УКРАЇНА  
\*email: rubanenko@bk.ru

**АНОТАЦІЯ** В статті розглянуто пошкоджуваність високовольтних маслонаповнених вимірювальних трансформаторів струму 110 кВ та наведено приклад визначення поточного залишкового ресурсу цих трансформаторів в умовах неповноти початкових даних. Розроблено нейро-нечітку математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу трансформатора струму, яка дозволяє враховувати як результати поточного так і періодичного контролю діагностичних параметрів. На прикладі трансформатора ТФНД 110 показано можливість використання методів нейро-нечіткого моделювання у прогнозуванні залишкового ресурсу трансформаторів струму. Запропоновано оцінювати стан трансформаторів струму в залежності від значення коефіцієнту загального залишкового ресурсу під час керування режимами електроенергетичних систем.

**Ключові слова:** вимірювальні трансформатори струму високої напруги, он-лайн діагностика, нейро-нечітке моделювання, залишковий ресурс

## OPERATIONAL DIAGNOSTICS OF HIGH VOLTAGE INSTRUMENT CURRENT TRANSFORMERS

O. RUBANENKO

Department of Electric Stations and Systems, Vinnytsia National Technical University, Vinnytsia, UKRAINE

**ABSTRACT** The research contains the results the analysis of oil-filled high-voltage current transformers and selected diagnostic parameters that enable to detect main types of damage. It is shown that in case of the most common faults numerous diagnostic parameters are to be controlled and it is not always possible in conditions of electric power systems modes control by operative dispatching staff of power systems. To reduce the information load on the personal, responsible for decision-making regarding modes control it is proposed to use the parameter of total residual resource, the method of this parameter determination is given, based on the usage of remaining resource ratios, defined by individual diagnostic parameters, taking into account statistical data, concerning taking the current transformers out of service. It is proposed to determine these factors in relative units, that will simplify their usage while determining the ratio of general residual resource that varies from 1 during putting into operation to 0, that corresponds to taking the transformer out of service. Application of mathematical tools of neural-fuzzy modeling, namely Sugeno algorithm, allows to develop mathematical and computer models of total residual resource that enables to determine the impact of diagnostic parameters on the ratio of total residual resource. In training sample of neural-fuzzy model it is suggested to use data, verified by independent experts and taken from the test reports. It is shown that the current prediction error residual life does not exceed 14%. It is expected that the error can be reduced by increasing the training set, and the number of failures in the current transformer will reduce the defects in the early stages of development.

**Keywords:** high-voltage instrument current transformers, on-line diagnostics, neural-fuzzy modeling, residual resource

### Вступ

В наш час в електроенергетичних системах широко використовуються вимірювальні трансформатори струму [4], які відіграють важливу роль в забезпеченні безпечної, надійної, якісної та економічної роботи релейного захисту, технологічної та протиаварійної автоматики, вимірювальних комплексів та систем і т. п. Водночас, серед експлуатованих трансформаторів струму велика частка відпрацювала свій паспортний ресурс, тобто знаходяться в експлуатації понад 25 років. Часто це маслонаповнені трансформатори (табл. 1, рис. 1). В експлуатації все більше з'являється елегазових трансформаторів струму [10].

Таблиця 1 – Введення ТС в експлуатацію в Південно-Західній електроенергетичній системі

Роки	Маслонаповнені		Елегазові		
	110кВ	330 кВ	110 кВ	330 кВ	750 кВ
1965-70	65	7	0	0	0
1971-75	17	8	0	0	0
1976-80	27	21	0	0	0
1981-85	24	45	0	0	0
1986-90	10	32	0	0	0
1991-95	6	18	0	0	0
1996-00	3	0	0	0	0
2001-05	21	9	27	0	6
2006-10	20	16	0	20	3
2011-13	52	19	0	43	18



В наш час частка експлуатованих маслонаповнених трансформаторів струму залишається великою.

Відома залежність пошкоджуваності обладнання в залежності від терміну експлуатації (рис. 1).



Рис. 1 – Залежність пошкоджуваності обладнання (одиниць за рік) від року експлуатації

Ця тенденція спостерігається і у високовольтних вимірювальних трансформаторів. На рис. 2 та 3 показані пошкоджені трансформатор напруги 35 кВ у 2015 році (перший рік експлуатації), трансформатор струму 750 кВ (понад 20 років експлуатації), та виведені з експлуатації трансформатори струму 750 кВ (а – 25 років експлуатації).



Рис. 2 – Пошкоджені в 2015 році трансформатор напруги 35 кВ (2014 року випуску)

Трансформатор струму ТФРМ-750 (виготовлений у 1982 р., масло Т-750) був виведений з експлуатації в 2007 р. на підстанції «Вінницька 750» (рис.3 б).

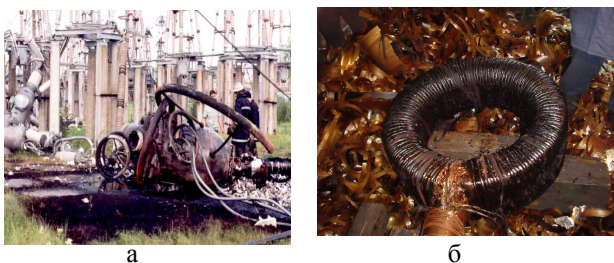


Рис. 3 – Виведені з експлуатації трансформатори струму 750 кВ

Отже пошкоджуваність такого вартісного та відповідального обладнання, як вимірювальні трансформатори струму свідчить про актуальність мети та завдань проведених досліджень.

### Мета досліджень

Метою досліджень є вдосконалення методів оперативного діагностування [9] вимірювальних трансформаторів струму (ТС) 110 кВ під час керування режимами електроенергетичних систем (ЕЕС).

### Дослідження пошкоджуваності трансформаторів струму ТФНД-110

Визначення поточного стану ТС ґрунтується на результатах як поточного так і періодичного контролю [1, 5–8, 11]. Наявність періодичної складової в початкових даних інформаційного забезпечення процесу визначення поточного технічного стану ТС свідчить про прогнозовані оцінки цього стану. Трансформатор ТФНД-110 є маслонаповненим трансформатором струму в фарфоровому корпусі зовнішнього встановлення.

Для пояснення запропонованого методу оперативного діагностування [2, 9] (табл.2 та рис. 6) наведені результати досліджень виведених з експлуатації для обслуговування, ремонту або заміни [3] трансформаторів струму ТФНД-110 на протязі десяти років в уявній ЕЕС.

Таблиця 2 – Пошкоджуваність ТФНД-110

Позначення діагностичного параметру (ДП)	Кількість виявлених відхилень (ДП)
$R_{вт.об}$	6
$tg(\delta)$	3
C	1
$t_1$	4
$t_2$	1
$t_3$	1
$k_{тр}$	8
$k_{кт}$	5
$P_1$	1
$k_{ФХА}$	6
$K_{ХАРГ}$	5 (з них 2 – горючі)
$k_{сел}$	70

До найбільш частих видів пошкоджень [3] відносяться: пошкодження основної ізоляції, що виявляються шляхом контролю діагностичних параметрів – опору ізоляції  $R_{із}$  (провідності ізоляції  $Y_{із}$ ), опору ізоляції через 15 секунд –  $R_{із,15''}$ , опору ізоляції через 60 секунд –  $R_{із,60''}$ , коефіцієнта абсорбції  $k_{абс}$  ( $k_{абс} = R_{із,60''}/R_{із,15''}$ ), опору ізоляції з'єднаних між собою вторинних обмоток відносно заземленого корпусу ТС –  $R_{вт.об}$ , тангенса кута діелектричних втрат основної ізоляції –  $tg(\delta)$ , ємності основної ізоляції – C; пошкодження перемикача коефіцієнту трансформації та якості контактів апаратних вводів, що виявляються шляхом контролю: надлишкової температури цього перемикача та апаратних вводів –  $t_1$ , надлишкової температури



розширювача ТС –  $t_2$ , надлишкової температури корпусу ТС –  $t_3$ , пошкодження магнітопроводу та обмоток ТС, що виявляються: шляхом контролю контрольних точок на кривій намагнічування ТС –  $k_{тр}$ , шляхом контролю коефіцієнта трансформації та класу точності –  $k_{кт}$ ; пошкодження ущільнень, що виявляється шляхом візуального спостереження за відсутністю або появою підтікань трансформаторного масла з під ущільнень і характеризуються надлишковим тиском трансформаторного масла всередині ТС за якого виникають підтікання  $P_1$ ; погіршення стану трансформаторного масла, яке виявляється: шляхом контролю параметрів фізико-хімічного аналізу трансформаторного масла та розрахунку поточного значення коефіцієнта залишкового ресурсу трансформаторного масла –  $k_{ФХА}$ , шляхом контролю вмісту розчинених в трансформаторному маслі газів (методами та засобами хімічного аналізу розчинених газів – ХАРГ) та розрахунку коефіцієнта залишкового ресурсу трансформаторного масла за результатами ХАРГ –  $k_{ХАРГ}$  та шляхом візуального контролю кольору силікагелю –  $k_{сел}$  (зволоження трансформаторного масла).

#### Моделювання залишкового ресурсу трансформатора струму

Проведення оперативного діагностування [9] високовольтних ТС в умовах неповноти даних на момент визначення поточного стану ТС пов'язано з необхідністю продовження експлуатації зношеного електрообладнання (ЕО) енергопідприємств.

За результатами аналізу даних таблиці 2 та літературних джерел була створена схема, яка показує взаємно-залежний діагностичних параметрів на коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТС (рис. 4).

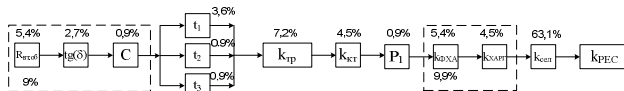


Рис.4 – Структурна схема моделі коефіцієнта залишкового ресурсу ТС

На рис. 4 послідовні позначені блоки з параметрами, відхилення яких від норми сприяло виведенню ТС в ремонт, а паралельно – блоки з параметрами, які сприяють виведенню ТС в ремонт за умови одночасного відхилення від норм цих параметрів, що зумовлено вимогами до надійності роботи ТС.

З метою отримання узагальненого показника залишкового ресурсу ТС, який вираховує значення всіх діагностичних параметрів та їх вплив, пропонується від відомих значень діагностичних параметрів перейти до відповідних цим значенням коефіцієнтів залишкових ресурсів по кожному діагностичному параметру. Ці коефіцієнти визначаються у відносних одиницях за виразом (1) і тому характеризують сумарне напрацювання ТС від моменту контролю його технічного стану до переходу у граничний стан, коли діагностичний параметр досягає граничного значення,

тобто залишковий технічний ресурс [10]. Коефіцієнт залишкового ресурсу  $k_i$  за  $i$ -м діагностичним параметром:

$$k_{iI} = \frac{x_{iI,гран} - x_{iI,ном}}{x_{iI,гран} - x_{iI,поч}} \quad (1)$$

де  $x_{iI,гран}$  – граничне нормативне значення  $i_I$ -го діагностичного параметра,  $x_{iI,ном}$  – значення  $i_I$ -го діагностичного параметра на момент контролю,  $x_{iI,поч}$  – початкове значення  $i_I$ -го діагностичного параметра (на момент введення в експлуатацію нового обладнання або після ремонту),  $i_I$  – діагностичний параметр.

Так, для високовольтного ТС на клас напруги 110 кВ параметр  $tg(\delta)$  паперово – масляної ізоляції після ремонту дорівнював 0,2 %, а на момент контролю дорівнював 0,4 %, граничне значення цього параметра – 1,0 %. Тому коефіцієнт залишкового ресурсу  $k_{tg(\delta)}$  за діагностичним параметром  $tg(\delta)$  визначається за виразом (2):

$$k_{tg(\delta)} = \frac{3.5 - 1.0}{3.5 - 0.5} = 0.833(в.о.).$$

Для послідовної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом

$$k_{pec} = \prod_{\tau=1}^{\nu} k_{\tau}^{p_{\tau}}, \quad (2)$$

де  $k_{\tau}$  – коефіцієнт залишкового ресурсу ТС по  $\tau$ -му діагностичному параметру,  $\tau$  –  $\tau$ -тий діагностичний параметр,  $\nu$  – кількість блоків у послідовній частині схеми рис. 8,  $p_{\tau}$  – ймовірність відхилення контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра:

$$p_{\tau} = \frac{y_{\tau}}{m_2}, \quad (3)$$

де  $y_{\tau}$  – кількість відхилень контрольованого параметра від гранично допустимого нормованого значення цього параметра, які були виявлені шляхом контролю  $\tau$ -го діагностичного параметра з загальної кількості виявлених відхилень контрольованих параметрів від гранично допустимого нормованого значення,  $m_2$  – загальна кількість виявлених відхилень контрольованих діагностичних параметрів від їх гранично допустимих нормованих значень.

Для паралельної частини схеми коефіцієнт загального залишкового ресурсу знаходиться за виразом:

$$k_{pec\Sigma} = 1 - \sum_{j=1}^{mI} \left[ (1 - k_{pec,j}) p_j \right], \quad (4)$$

де  $k_j$  – коефіцієнт залишкового ресурсу ТС за  $j$ -м діагностичним параметром,  $j$  –  $j$ -тий діагностичний параметр,  $m_1$  – кількість блоків у паралельній частині схеми, яка згортається.

Відповідно до виразів (3) і (4) та рис. 7 коефіцієнт загального залишкового ресурсу ВУ визначається за виразом (5):

$$k_{заг.рес} = k_{R_{от.об}}^{P_{R_{от.об}}} \cdot k_{tg(\delta)}^{P_{tg(\delta)}} \cdot k_C^{P_C} \cdot \left[ \left[ (1-k_{T1}) \cdot P_{пар.ч.T1} + (1-k_{T2}) \cdot P_{пар.ч.T2} + (1-k_{T3}) \cdot P_{пар.ч.T3} \right]^{P_{УЗАГ.Ч.Т1,Т2,Т3}} \cdot k_{ТР}^{P_{ТР}} \cdot k_{КТ}^{P_{КТ}} \cdot k_{Р1}^{P_{Р1}} \cdot k_{ФХА}^{P_{ФХА}} \cdot k_{ХАРГ}^{P_{ХАРГ}} \cdot k_{сел}^{P_{сел}}$$

де  $k_{ТР}$ ,  $k_{КТ}$ ,  $k_{R_{от.об}}$ ,  $k_C$ ,  $k_{tg(\delta)}$ ,  $k_{ФХА}$ ,  $k_{ХАРГ}$ ,  $k_{Р1}$ ,  $k_{T2}$ ,  $k_{T1}$ ,  $k_{T3}$ ,  $k_{сел}$  – відомі на момент розрахунку значення коефіцієнтів залишкового ресурсу відповідно по параметрах  $ТР$ ,  $КТ$ ,  $R_{от.об}$ ,  $C$ ,  $tg(\delta)$ ,  $T_3$ ,  $ХАРГ$ ,  $ФХА$ ,  $P_1$ ,  $T_2$ ,  $T_1$ ;  $P_{R_{от.об}}$ ,  $P_{ФХА}$ ,  $P_{Р}$ ,  $P_C$ ,  $P_{tg(\delta)}$ ,  $P_{T3}$ ,  $P_{ХАРГ}$ ,  $P_{Р1}$ ,  $P_{T2}$ ,  $P_{T1}$  – ймовірності відхилення значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилення всіх діагностичних параметрів;  $P_{пар.ч.T1}$ ,  $P_{пар.ч.T2}$ ,  $P_{пар.ч.T3}$  – ймовірності відхилення значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень з урахуванням загальної кількості відхилення діагностичних параметрів лише паралельної частини схеми;  $P_{УЗАГ.Ч.Т1,Т2,Т3}$  – ймовірність відхилення значень діагностичних параметрів від гранично допустимих нормованих значень для узагальненого (паралельної частини схеми) блоку (в послідовній частині схеми) з урахуванням загальної кількості відхилення діагностичних параметрів. Так, відповідно до табл. 2:  $r_{сел}=0,631$  в.о.,  $r_{R_{от.об}}=0,054$  в.о.,  $r_C=0,009$  в.о.,  $r_{tg(\delta)}=0,027$  в.о.,  $r_{T3}=0,009$  в.о.,  $r_{ХАРГ}=0,045$  в.о.,  $r_{P1}=0,009$  в.о.,  $r_{T2}=0,009$  в.о.,  $r_{T1}=0,036$  в.о.,  $r_{ТР}=0,072$  в.о.,  $r_{КТ}=0,045$  в.о.,  $r_{ФХА}=0,054$  в.о.,  $r_{пар.ч.T1} = r_{T1}/(r_{T1}+r_{T2}+r_{T3})=0,66$  в.о.,  $r_{пар.ч.T2}=r_{T2}/(r_{T1}+r_{T2}+r_{T3})=0,17$  в.о.,  $r_{пар.ч.T3} = r_{T3}/(r_{T1}+r_{T2}+r_{T3})=0,17$  в.о.,  $r_{УЗАГ.Ч.Т1,Т2,Т3} = r_{T1}+r_{T2}+r_{T3}=0,054$  в.о.

**Нейро-нечітка модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТС**

Задача полягає у знаходженні не завжди відомих, нечітких взаємовпливів різних технічних параметрів на загальний технічний стан ТС і якомога точнішому прогнозуванні динаміки розвитку пошкоджень і їх впливу на загальний технічний стан.

Використання для вирішення поставленої задачі методів теорії нечітких множин дає змогу врахувати значення різних діагностичних параметрів при діагностуванні ТС і створити базу правил їх взаємодії, не знаючи математичного зв'язку між ними. За допомогою системи комп'ютерної математики – системи MATLAB – є можливість створити математичну модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТС, використовуючи яку відредагувати раніше створену ймовірнісну вибірку навчальних даних, за якими далі можна отримати аналітичну залежність коефіцієнта залиш-

кового ресурсу ТС від діагностичних параметрів у вигляді поліному.

Для дванадцяти вхідних параметрів моделі, які змінювались випадковим чином від 0 до 1, було визначено коефіцієнт загального залишкового ресурсу ТС за виразом (5). Для зручності застосування даних і спрощення поточних розрахунків у системі комп'ютерної математики MATLAB вхідні параметри моделі зводились до відносних одиниць їх відхилення від норми. Результати розрахунків зведені в таблицю.

Повна таблиця містить 2600 розглянутих варіантів сполучень діагностичних параметрів та відповідних їм значень загального залишкового ресурсу ТС. Далі у 100 рядках цієї таблиці було скореговано значення коефіцієнту залишкового ресурсу ТС шляхом опитування незалежних експертів: кваліфікованих представників цеху ремонту ТС служби ремонтів високовольтного обладнання, служби підстанцій, служби ізоляції, діагностування та грозозахисту, монтажно-ї та інших організацій. В останній комірці табл. 3 показано відкоригований рядок.

Таблиця 3 – Фрагмент скорегованих значень коефіцієнта залишкового ресурсу ТС

Діагностичні параметри, в.о.											k <sub>заг.рес.</sub> , в.о.	
k <sub>от.об.</sub>	k <sub>tg(δ)</sub>	k <sub>C</sub>	k <sub>T1</sub>	k <sub>T2</sub>	k <sub>T3</sub>	k <sub>ТР</sub>	k <sub>КТ</sub>	k <sub>P1</sub>	k <sub>ФХА</sub>	k <sub>ХАРГ</sub>		k <sub>сел</sub>
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
0,95	0,95	0,95	0,5	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95
0,9	0,9	0,9	0,9	0,5	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,5	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...	...
0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,65	0,6

Відкориговані дані були використані як навчальні дані при моделюванні в системі комп'ютерної математики MATLAB. Для цього використовувався пакет Fuzzy Logic Toolbox. За допомогою редактора ANFIS Editor з використанням гібридного навчального алгоритму та використовуючи алгоритм нечіткого висновку Сугено було отримано нейро-нечітку модель коефіцієнта залишкового ресурсу ТФНД-110 кВ. Отримана структура нейро-мережі показана на рис. 5.

Для кожної вхідної змінної нечіткої моделі використовувались по чотири лінгвістичних терми з гаусовими функціями. Це такі терми, як: «нормальні» значення діагностичного параметра, «незначні відхилення» значення діагностичного параметра,

«передаварійні» значення діагностичного параметру, «аварійні» значення діагностичного параметра.

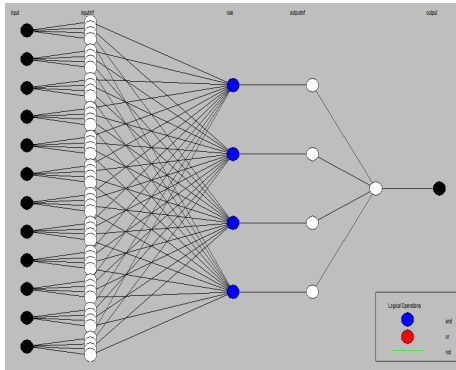


Рис. 5 – Структура нейро-мережі ТС

Для визначення значення коефіцієнта загальнозалишкового ресурсу ВУ використовуємо модель логічного висновку Такагі-Сугено. В цій моделі нечіткі правила визначаються на основі заданої кількості значень «вхід-вихід» модельованого об'єкта у вигляді (6):

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО } x_1 \in A_1 \text{ ТА } x_2 \in B_2 \text{ ТА...} x_m \in V_m \\ \text{ТО } y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m) \end{aligned} \quad (6)$$

де  $A_1, B_2, V_m$  – нечіткі множини посилань, а  $y_i = f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  – чітка функція висновку, зазвичай  $f(x_1, x_2, \dots, x_m)$  визначається у вигляді поліноміальної залежності від вхідних змінних  $x_1, x_2, \dots, x_m$ .

Математична модель загальнозалишкового ресурсу є системою логічних рівнянь фрагмент якої показаний в (7):

$$\begin{aligned} \text{ЯКЩО } k_{\text{ФАХ}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Ротор.об.}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{С}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{ІГ(6)}} \in \text{"нормальне"} \\ \text{ТА } k_{\text{Т3}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{КР}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Р1}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Т2}} \in \text{"нормальне"} \\ \text{ТА } k_{\text{Т1}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Т3}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{ТР}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТА } k_{\text{Сел.}} \in \text{"нормальне"} \text{ ТО} \\ k_{\text{заг.залирес}} = a_{1,1} \cdot k_{\text{ФАХ}} + a_{1,2} \cdot k_{\text{Ротор.об.}} + a_{1,3} \cdot k_{\text{С}} + a_{1,4} \cdot k_{\text{ІГ(6)}} + a_{1,5} \cdot k_{\text{Т3}} + a_{1,6} \cdot k_{\text{ФАХ}} + a_{1,7} \cdot k_{\text{Р1}} \\ + a_{1,8} \cdot k_{\text{Т2}} + a_{1,9} \cdot k_{\text{Т1}} + a_{1,10} \cdot k_{\text{ТР}} + a_{1,11} \cdot k_{\text{КР}} + a_{1,12} \cdot k_{\text{Сел.}} + c_1 \\ \dots \\ \text{ЯКЩО } k_{\text{ФАХ}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Ротор.об.}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{С}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{ІГ(6)}} \in \text{"аварійне"} \\ \text{ТА } k_{\text{Т3}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{КР}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Р1}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Т2}} \in \text{"аварійне"} \\ \text{ТА } k_{\text{Т1}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Т3}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{ТР}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТА } k_{\text{Сел.}} \in \text{"аварійне"} \text{ ТО} \\ k_{\text{заг.залирес}} = a_{1,1} \cdot k_{\text{ФАХ}} + a_{1,2} \cdot k_{\text{Ротор.об.}} + a_{1,3} \cdot k_{\text{С}} + a_{1,4} \cdot k_{\text{ІГ(6)}} + a_{1,5} \cdot k_{\text{Т3}} + a_{1,6} \cdot k_{\text{ФАХ}} + a_{1,7} \cdot k_{\text{Р1}} \\ + a_{1,8} \cdot k_{\text{Т2}} + a_{1,9} \cdot k_{\text{Т1}} + a_{1,10} \cdot k_{\text{ТР}} + a_{1,11} \cdot k_{\text{КР}} + a_{1,12} \cdot k_{\text{Сел.}} + c_1 \end{aligned} \quad (7)$$

де  $a, c$  – параметри висновків правил нечіткої моделі.

Ознакою припинення навчання моделі є незмінність середньоквадратичної похибки. Середньоквадратична похибка після 8 епох навчання становить 0,06 в. о.

Похибка моделі з використанням контрольної вибірки становить 0,11 в. о.

## Висновки

Під час керування режимами ЕЕС оперативно-диспетчерський персонал визначає стан задіяного обладнання [9] за показами контрольно-вимірних приладів.

Використовуючи математичний апарат нейронічного моделювання розроблено математичну модель загального залишкового ресурсу, яка дозволяє визначити вплив діагностичних параметрів на коефіцієнт загального залишкового ресурсу.

## Список літератури

- 1 **Стогній, Б.С.** Основи моніторингу в електроенергетиці. Про поняття моніторингу / **Б. С. Стогній, М. Ф. Сопель** // *Технічна електродинаміка*. – 2013. – №1. – С. 62-69.
- 2 **Лежнюк, П. Д.** Оперативне діагностування високовольтного обладнання в задачах оптимального керування режимами електроенергетичних систем / **П. Д. Лежнюк, О. Є. Рубаненко, О. В. Нікіторович** // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 35-36.
- 3 **Федоренко, Г. М.** Комплексний аналіз аварійних ситуацій генеруючого обладнання електростанцій / **Г. М. Федоренко, О. Г. Кенцицький** // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 2. – С. 48-49.
- 4 **Gray, W.** Voltage transformers and current transformers associated with switchgear / **W. Gray, A. Wright** // *Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering*. – 2010. – vol. 100. – P. 223-236. – doi:10.1049/pi-2.1953.0089.
- 5 **Harper, G.** The selection of insulation levels and tests for high-voltage transformers / **G. B. Harper** // *Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering*. – 2010. – Vol. 106. – P. 429 - 444. – doi:10.1049/pi-a.1959.0116.
- 6 **Saponara, S.** Predictive Diagnosis of High-Power Transformer Faults by Networking Vibration Measuring Nodes With Integrated Signal Processing / **S. Saponara, L. Fannucci, F. Bernardo, A. Falciani** // *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* – 2016. – P. 1-12. – doi:10.1109/TIM.2016.2552658.
- 7 **Boczar, T.** Diagnostic expert system of transformer insulation systems using the acoustic emission method / **T. Boczar, A. Cichon, S. Borucki** // *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* – 2014. – Vol. 21. – P. 854-865. – doi:10.1109/TDEI.2013.004126.
- 8 **Bahmani, M.** Comparative Study of a Multi-MW High-Power Density DC Transformer With an Optimized High-Frequency Magnetics in All-DC Offshore Wind Farm / **M. Bahmani, T. Thiringer, A. Rabiei, T. Abdulahovic** // *IEEE Transactions on power delivery* – 2016. – No. 2. – P. 857-866. – doi:10.1109/TDEI.2013.004126.
- 9 **Buslavets, O.** Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities / **O. Buslavets, P. Legnuk, O. Rubanenko** // *Eastern-European journal of enterprise technologies* – 2015. – No. 2/8 (74). – P. 35-41. – doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
- 10 **Pilzecker, P.** Evaluation of gas insulated substations and circuit breakers using partial discharge - IMS / **P. Pilzecker, J. I. Baumbach** // *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium on* – 2002. – P. 399-402. – doi:10.1109/ELINSL.2002.995960.
- 11 **Mentlik, V.** On-line diagnostics of power transformers / **V. Mentlik, P. Prosr, J. Pihera, R. Polansky** // *Conference*

*Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation – 2006. – P. 546-549. – doi:10.1109/ELINSL.2006.16653772006.*

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Stohnii, B. S., Sopol, M. F.** Osnovy monitorynhu v elektroenerhetytsi. Pro poniattia monitorynhu [Fundamentals monitoring in power. On the concept of monitoring] *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics]*, 2013, **1**, 62-69.
- 2 **Lezhniuk, P. D., Rubanenko, O. Ie., Nikitorovych, O. V.** Operatyvne diahnostuvannia vysoko vol- toho obladnannia v zadachakh optimalnoho keruvannia rezhymamy elektroenerhetychnykh system [High-operative diagnosis-tnoho equipment in problems of optimal control mode of the electro-nerhetychnykh]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics]*, 2012, **3**, 35-36.
- 3 **Fedorenko, H. M., Kensitytskiy, O. H.** Kompleksnyi analiz avariinykh situatsii heneruii choho obladnannia elektrostantsii [Comprehensive analysis of the emergency power generating equipment]. *Tekhnichna elektrodynamika [Technical electrodynamics]*, 2012, **2**, 48-49.
- 4 **Gray, W., Wright, A.** Voltage transformers and current transformers associated with switchgear. *Proceedings of the IEE - Part II: Power Engineering*, 2010, **100**, 223-236, doi:10.1049/pi-2.1953.0089.
- 5 **Harper, G.** The selection of insulation levels and tests for high-voltage transformers. *Proceedings of the IEE - Part A: Power Engineering*, 2010, **106**, 429 - 444, doi:10.1049/pi-a.1959.0116.
- 6 **Saponara, S., Fanucci, L., Bernardo, F., Falciani, A.** Predictive Diagnosis of High-Power Transformer Faults by Networking Vibration Measuring Nodes With Integrated Signal Processing. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2016, 1-12, doi:10.1109/TIM.2016.2552658.
- 7 **Boczar, T., Cichon, A., Borucki, S.** Diagnostic expert system of transformer insulation systems using the acoustic emission method. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2014, **21**, 854-865, doi:10.1109/TDEI.2013.004126.
- 8 **Bahmani, M., Thiringer, T., Rabiei, A., Abdulahovic, T.** Comparative Study of a Multi-MW High-Power Density DC Transformer With an Optimized High-Frequency Magnetics in All-DC Offshore Wind Farm. *IEEE Transactions on power delivery*, 2016, **2**, 857-866, doi:10.1109/TDEI.2013.004126.
- 9 **Buslavets, O., Legnuk, P., Rubanenko, O.** Evaluation and increase of load capacity of on-load tap changing transformers for improvement of their regulating possibilities. *Eastern-European journal of enterprise technologies*, 2015, **2/8(74)**, 35-41, doi:10.15587/1729-4061.2015.39881.
- 10 **Pilzecker, P., Baumbach, J. I.** Evaluation of gas insulated substations and circuit breakers using partial discharge – IMS. *Conference Record of the 2002 IEEE International Symposium*, 2002, 399-402, doi:10.1109/ELINSL.2002.995960.
- 11 **Mentlik, V., Prosr, P., Pihera, J., Polansky, R.** On-line diagnostics of power transformers. *Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, 2006, 546-549, doi:10.1109/ELINSL.2006.1665377.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Рубаненко Олександр Євгенійович** – кандидат технічних наук, доцент, Вінницький національний університет, доцент кафедри електричних станцій та системи; м. Вінниця, Україна; e-mail: rubanenko@bk.ru

**Rubanenko Olexander Evhenevych** – Candidate of Science (Engineering), Assistant Professor, Vinnytsia National Technical University, Assistant Professor of the Chair of Electric Stations and Systems; Vinnytsia, Ukraine; e-mail: rubanenko@bk.ru

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Рубаненко, О. Є.** Оперативне діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів струму / **О. Є. Рубаненко** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 107-112. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.16.

*Please cite this article as:*

**Rubanenko, O.** Operational diagnostics of high voltage instrument current transformers. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 107-112, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.16.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Рубаненко, А. Е.** Оперативное диагностирование высоковольтных измерительных трансформаторов тока / **А. Е. Рубаненко** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 107-112. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.16.

**АННОТАЦІЯ** В статті розглянуто пошкоджуваність високовольтних маслонаповнених вимірювальних трансформаторів струму 110 кВ і наведено приклад визначення залишкового ресурсу цих трансформаторів в умовах неповноти вихідних даних. Розроблена нечітка математична модель коефіцієнта залишкового ресурсу трансформатора струму, яка дозволяє враховувати як результати поточного так і періодичного контролю діагностичних параметрів. На прикладі трансформатора ТФНД 110 показано можливість використання методів нейро-нечіткого моделювання в прогнозуванні залишкового ресурсу трансформаторів струму. Предложено оцінювати стан трансформаторів струму в залежності від значення коефіцієнта загального залишкового ресурсу при управлінні режимами електроенергетических систем.

**Ключові слова:** вимірювальні трансформатори струму високого напруги, он-лайн діагностика, нейро-нечітке моделювання, залишковий ресурс

Надійшла (received) 12.05.2016

## МОДЕЛЮВАННЯ ЗОВНІШНІХ ЗБУРЕНЬ ОПОРНОЇ ПОВЕРХНІ ПІД ЧАС РУХУ ВІЙСЬКОВОЇ ГУСЕНИЧНОЇ МАШИНИ

А. В. РУДИЙ<sup>1\*</sup>, А. Ю. ВАСИЛЬЄВ<sup>2</sup>, М. Є. БИСТРИЦЬКИЙ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Національна академія сухопутних військ ім. гетьмана П.Сагайдачного, Львів, УКРАЇНА

<sup>2</sup> Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», Харків, УКРАЇНА

\*email: rasty82@ukr.net

**АНОТАЦІЯ** У статті розглянуто питання імітаційного моделювання впливу випадкових зовнішніх збурень на рух військової гусеничної машини, зокрема випадкову зміну параметрів покриття, по якому здійснюється рух. З використанням методу зворотнього перетворення побудовано алгоритм отримання масиву випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту. Запропонований алгоритм дозволяє підвищити адекватність імітаційної моделі збуреного руху військової гусеничної машини та може бути використаний під час досліджень, спрямованих на вдосконалення елементів трансмісії та силових установок військових гусеничних машин

**Ключові слова:** військова гусенична машина; імітаційне моделювання; функція розподілу; алгоритм; метод зворотніх перетворень.

## MODELING OF THE EXTERNAL DISTURBANCES OF THE GROUND SURFACE DURING MILITARY TRACKING VEHICLES MOVEMENT

A. V. RUDYY<sup>1</sup>, A. Yu. VASILIEV<sup>2</sup>, M. Ye. BYSTRYTSKYI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, Lviv, UKRAINE

<sup>2</sup> National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, UKRAINE.

**ABSTRACT** This article is dedicated to the study of the simulation modeling of random external perturbation influence on the military tracked vehicles movement, including accidental changes of the ground surface characteristics. Despite the significant amount of work which has been done in the field of simulation modeling regarding the perturbed motion of the tracked vehicles, the modeling of the ground surface characteristics changes needs additional consideration. The purpose of this work is to construct a simulation of random changes of the ground surface characteristics during the military tracked vehicles movement.

Based on the inverse-transform method has been proposed an algorithm to obtain an array of random coefficients of resistance to the linear motion and rotation. The obtained random data has been used in the mathematical model of tracked vehicles to specify torque parameters on the driving wheels of right and left side of tracked vehicles, which are required to move on a defined path. Used as a random variables the empirical coefficients of the linear motion and rotation resistance also take into account the microprofile of ground surface that helps to adjust and at the same time to reduce the simulation complexity of tracked vehicles perturbed motion. Distribution functions of random values for the ground surface characteristics are simpler compared to the functions that describe a random change of only the ground surface microprofile. The results show that the algorithm can improve the accuracy of the simulation of tracked military vehicles perturbed motion and could be useful for studies aimed at improving the transmission elements and power units of military tracked vehicles.

**Keywords:** military tracked vehicle; simulation; distribution function; algorithm; the inverse-transform method.

### Вступ

Одним з сучасних методів, що застосовуються під час розробки та модернізації зразків озброєння та військової техніки (ОВТ) є імітаційне моделювання. Використання імітаційного моделювання дозволяє зменшити вартість та обсяги проектувальних робіт. Окремим питанням імітаційного моделювання є реалізація стохастичних збурень, які впливають на об'єкт, що моделюється, завдяки чому підвищується адекватність та точність імітаційної моделі.

Розробка гідроб'ємного механізму повороту (ГОМП) військових гусеничних машин (ВГМ) потребує моделювання криволінійного руху гусеничної машини, під час якого стає можливим

дослідити сили і моменти, які впливають на ВГМ. У даному випадку імітаційне моделювання випадкових збурень дозволяє уточнити сили та моменти, необхідні для криволінійного руху ВГМ.

Моделюванню збуреного руху гусеничних машин присвячено значну кількість робіт [1-7, 15]. Імітаційне моделювання випадкових збурень, що виникають під час руху гусеничної машини розглянуто у ряді робіт, спрямованих здебільшого на дослідження впливу мікропрофілю покриття на систему підресорювання та вібронавантаженисть. [8, 9, 13, 16, 17, 22]. У роботах [7, 11, 15] розглянуто вплив мікропрофілю покриття на силові та кінематичні параметри роботи силової установки. Робота [14] спрямована лише на моделювання

мікропрофілю поверхні без вирішення окремих технічних завдань. У представлених дослідженнях не враховано випадкової зміни характеристик опорної поверхні під час руху ВГМ. Втім відомо, що зміна характеристик опорної поверхні впливає на динамічні властивості транспортного засобу [10, 12]. Це необхідно врахувати під час моделювання руху ВГМ при вирішенні завдань дослідження параметрів трансмісії та силової установки.

### Мета роботи:

Метою даної роботи є побудова імітаційної моделі випадкової зміни характеристик опорної поверхні під час руху військової гусеничної машини.

### Виклад основного матеріалу

Під час руху ВГМ з лінійною швидкістю  $v$  та кутовою швидкістю  $\omega$ , на неї діють реакції опору, які обумовлюють величину сили тяги, необхідної для здійснення руху (рис.1) [21].

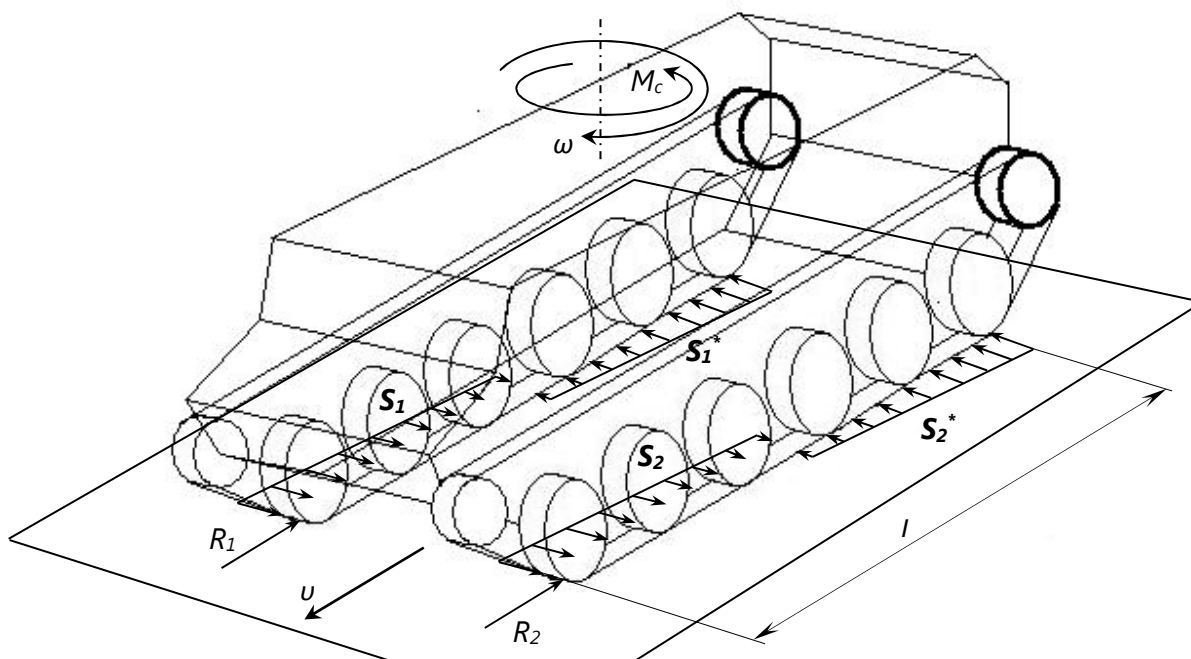


Рис. 1 – Схема реакцій опору, що здійснюють вплив на гусеничну машину під час повороту праворуч.

Реакції опору поступальному переміщенню військової гусеничної машини  $R_1$  та  $R_2$ , прямо залежні від коефіцієнту опору прямолінійному рухові ВГМ –  $f$ .

$$R = fN, \quad (1)$$

де  $N$  – сумарна нормальна реакція опорної поверхні.

Момент опору повороту  $M_c$  визначається величиною поперечних реакцій  $S_1, S_2, S_1^*, S_2^*$  та довжиною  $L$  повздовжньої бази ВГМ.

$$M_c = (S_1 + S_2 + S_1^* + S_2^*) \frac{L}{2}, \quad (2)$$

Поперечні реакції, у свою чергу, напряму залежать від коефіцієнту опору повороту  $\mu$  [20].

$$S_1 = S_2 = S_1^* = S_2^* = \mu \frac{G}{4} \quad (3)$$

Отже, випадкова зміна коефіцієнтів опору прямолінійному рухові  $f$  та повороту  $\mu$  визначає випадкову зміну реакцій  $R_1, R_2$  та моменту опору рухові ВГМ  $M_c$ , які необхідно подолати.

З робіт [12, 21] відомо, що коефіцієнти опору прямолінійному рухові  $f_n$  та повороту  $\mu_{max}$  гусеничної машини (ГМ) є величинами, отриманими експериментальним шляхом. У такому випадку немає необхідності здійснювати моделювання мікропрофілю опорної поверхні, оскільки отримання експериментальних даних не виключає впливу мікропрофілю на визначення емпіричних коефіцієнтів. Таким чином, під час імітаційного моделювання впливу зовнішніх збурень на необхідні для руху сили та моменти є достатнім здійснити

моделювання випадкової зміни параметрів опорної поверхні.

Побудуємо алгоритм отримання масиву випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту (рис.2)

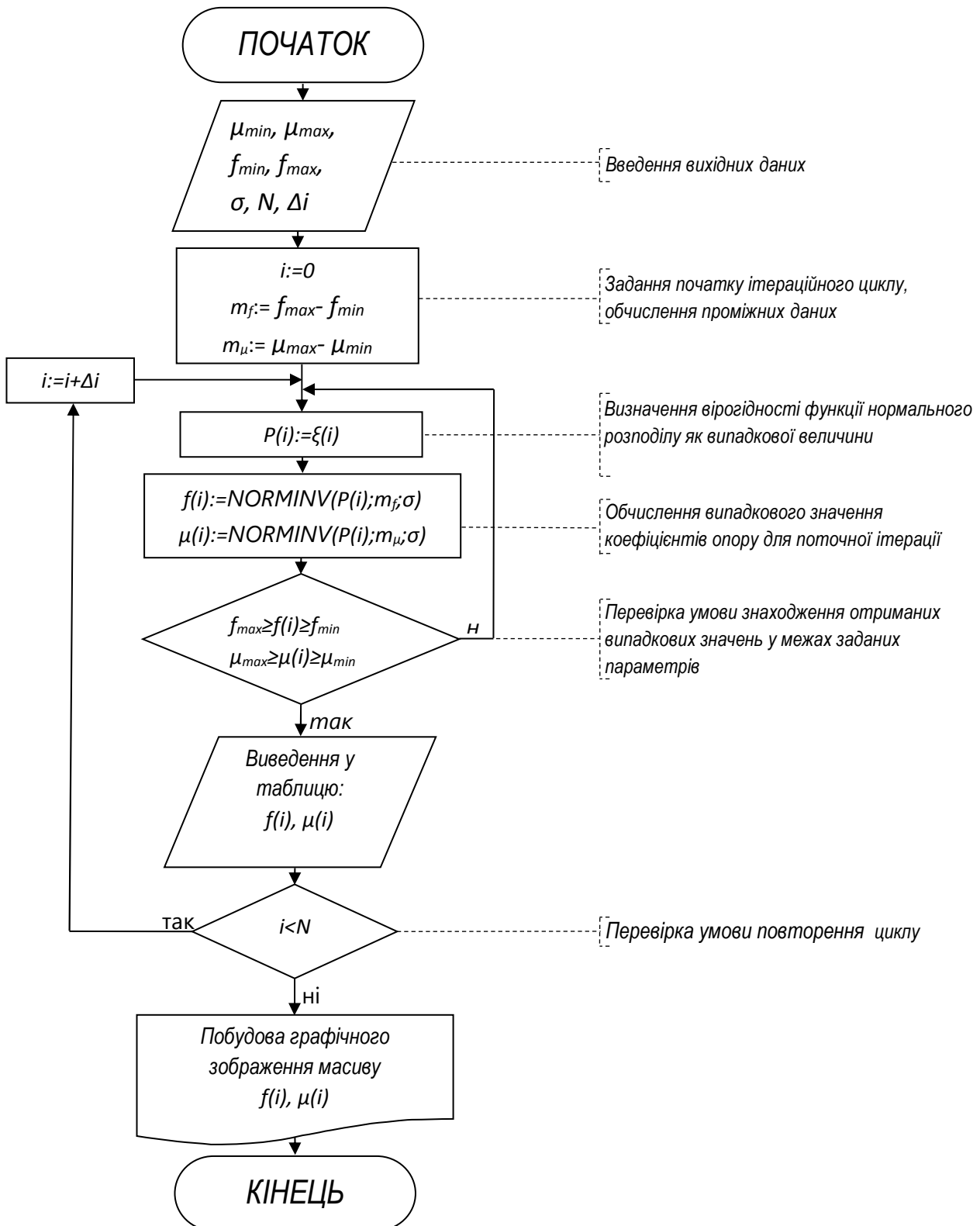


Рис. 2 – Алгоритм отримання масиву випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту

Обробка численних експериментальних даних вказує на те, що зміна коефіцієнтів опору прямолінійному рухові  $f_n$  та повороту  $\mu_{max}$  підпорядковується закону нормального розподілу [20], тобто

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \cdot \exp\left(-\frac{x - m_x}{2\sigma^2}\right), \quad (4)$$

де  $x$  – коефіцієнт опору  $f_n$  або  $\mu_{max}$ .

У такому випадку функція щільності розподілу вірогідності коефіцієнтів опору прямолінійному рухові  $f_n$  та повороту  $\mu_{max}$  повністю визначається середнім квадратичним відхиленням  $\sigma$  та математичним очікуванням  $m_x$ . Значення їх наведено у таблиці 1.

Таблиця 1 – Характеристика функцій розподілу коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту ВГМ

Дорожно-грунтові умови	Математичне очікування $m_f$	Математичне очікування $m_\mu$	Середньо-квадратичне відхилення $\sigma$
Дороги з твердим покриттям	0,035 – 0,045	0,3 - 0,5	0,0055
Гравійні дороги	0,05 – 0,055	0,8	0,007
Укатана ґрунтова дорога	0,07	0,8	0,009
Розбита ґрунтова дорога	0,0675	0,8	0,015
Бездоріжжя	0,06 – 0,25	0,6 – 0,96	0,0225

Значення математичного очікування  $m_f$  та  $m_\mu$  являють собою середнє арифметичне значення верхньої та нижньої меж обраного типу покриття. Залежність коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту від типу ґрунту наведено у таблиці 2. [12, 21, 22].

Таблиця 2 – Залежність коефіцієнтів опору від характеру опорної поверхні.

Дорожно-грунтові умови	Коефіцієнт опору прямолінійному руху $f_n$	Коефіцієнт опору повороту $\mu_{max}$
Асфальтобетонна дорога категорії 1	0,035 – 0,045	0,4 – 0,5
Асфальтобетонна дорога категорій 2, 3	0,04 – 0,05	0,4 – 0,5
Суха гладка бруківка	0,045 – 0,055	0,75 – 0,85
Задовільна бруківка	0,05 – 0,06	0,75 – 0,85
Суха профільована ґрунтова дорога	0,06 – 0,08	0,7 – 0,9
Суха розбита ґрунтова дорога	0,065 – 0,07	0,7 – 0,9
Ґрунтова дорога у період розпутиці	0,1 – 0,15	0,3 – 0,5
Засніжена укатана дорога	0,06 – 0,08	0,12 – 0,22
Обледеніла снігова дорога	0,05 – 0,1	0,25 – 0,35
Льодова дорога	0,03 – 0,04	0,45 – 0,55
Сухий дернистий ґрунт	0,05 – 0,07	0,7 - 0,9
Сухий піщаний ґрунт	0,1 – 0,25	0,8 – 0,9
Вологий піщаний ґрунт	0,08 – 0,1	0,9 – 1,1
Сухий дернистий суглинок	0,07 – 0,09	0,8 – 1,0
Сухий пилувидний суглинок	0,06 – 0,08	0,7 - 0,9
Сухий скошений луг	0,08 – 1,0	0,7 - 0,9
Вологий скошений луг	0,1 – 0,16	0,9 – 1,1
Стерня	0,06 – 0,08	0,55 – 0,65
Пахота	0,1 – 0,16	0,6 – 0,8
Снігова цілина	0,15 – 0,25	0,5 – 0,7
Заболочена місцевість	0,2 – 0,3	0,85 – 0,9



Для отримання масиву випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові  $f_n$  та повороту  $\mu_{max}$  використаємо метод зворотнього перетворення (перетворення Н.В. Смирнова) [19], для чого отримаємо інверсію інтегральної функції спектральної щільності, або т.з. функцію розподілу

$$F(P) = \frac{1}{2} + \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^t \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt = \frac{1}{2} \operatorname{erf}\left(\frac{P - m_x}{\sigma\sqrt{2}}\right), \quad (5)$$

де  $t = \frac{P - m_x}{\sigma}$ ,  $x$  – коефіцієнт опору  $f_n$  або  $\mu_{max}$ .

Графіки функцій розподілу коефіцієнтів опору представлені на рис. 3 та рис. 4

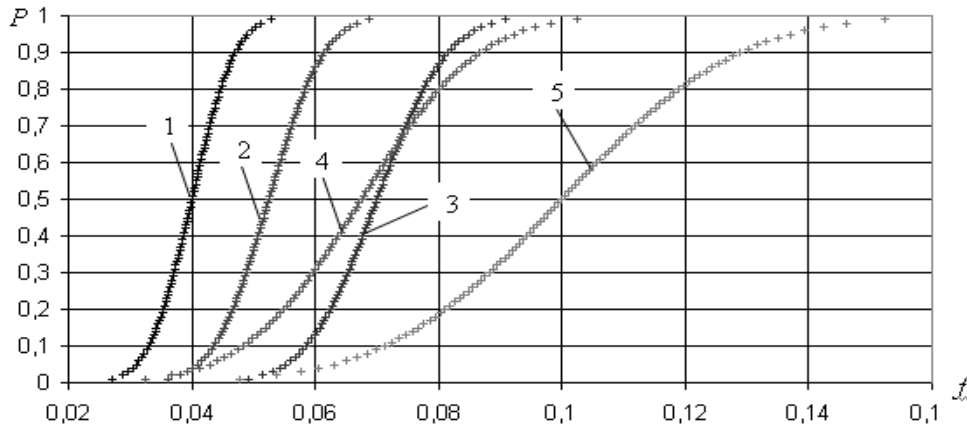


Рис. 3 – Функція розподілу коефіцієнтів опору прямолінійному рухові для різних типів поверхонь:

1 – дороги з твердим покриттям, 2 – гравійні дороги, 3 – укатані ґрунтові дороги, 4 – розбиті ґрунтові дороги, 5 - бездоріжжя

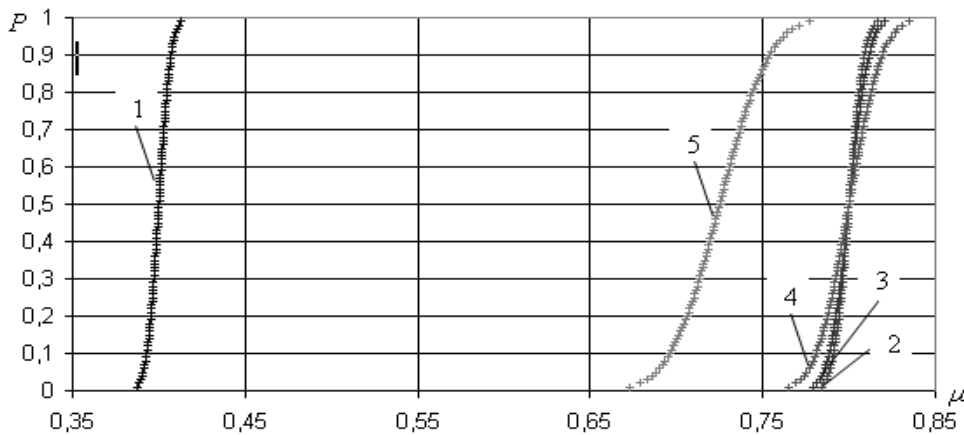


Рис. 4 – Функція розподілу коефіцієнтів опору повороту для різних типів поверхонь:

1 – дороги з твердим покриттям, 2 – гравійні дороги, 3 – укатані ґрунтові дороги, 4 – розбиті ґрунтові дороги, 5 - бездоріжжя

Маючи генератор масиву випадкових чисел за рівномірним розподілом  $\xi(i)$  у проміжку 0..1, модифікуємо його роботу шляхом використання випадкових значень у якості показника вірогідності під час побудови оберненої функції нормального розподілу. Для побудови масиву випадкових

значень коефіцієнтів опору було використано функцію NORMINV(P,m<sub>x</sub>,σ) програмного середовища Excel.

Оскільки згенеровані значення коефіцієнтів опору у ряді випадків можуть перевищувати визначені табличними показниками межі, алгоритм передбачає повторне генерування випадкового значення  $\zeta(i)$  до тих пір, поки показники не відповідатимуть умовам:

$$f_{max} \geq f(i) \geq f_{min}$$

$$\mu_{max} \geq \mu(i) \geq \mu_{min}$$

**Обговорення результатів**

З використанням алгоритму, зображеного на рис.2, у якості прикладу, за допомогою програмного середовища Excel

було побудовано масиви випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові  $f_n$  та повороту  $\mu_{max}$  для сухого піщаного ґрунту на 1000 ітерацій (рис. 5 та рис. 6.)

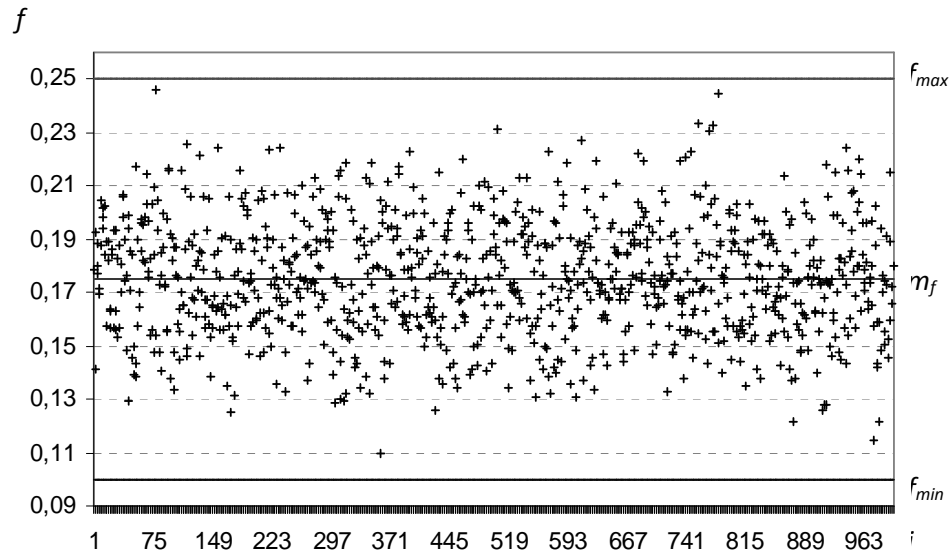


Рис. 5 – Масив випадкових даних для коефіцієнта опору прямолінійному рухові  $f$  (сухий піщаний ґрунт)

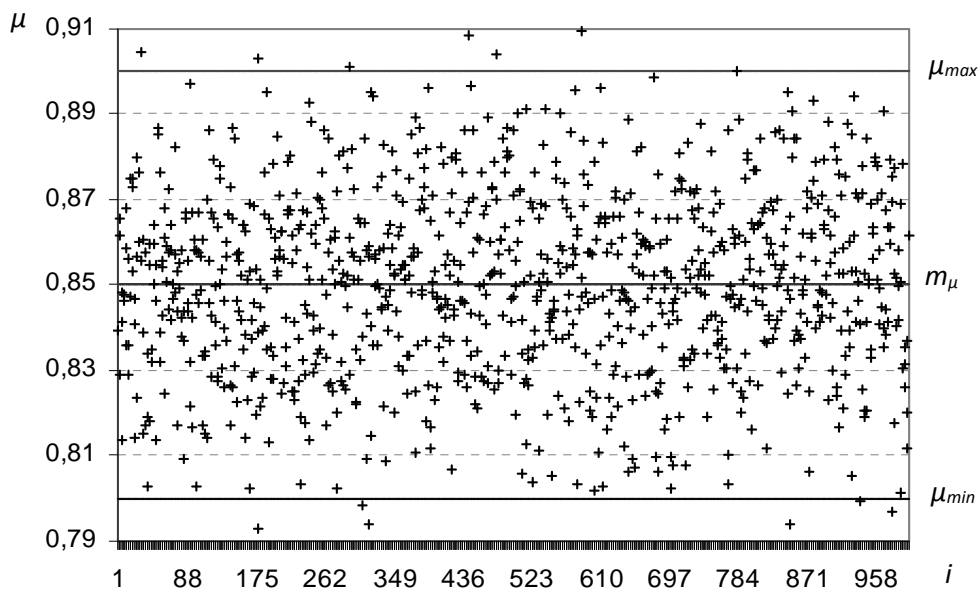


Рис. 6 – Масив випадкових даних для коефіцієнта опору повороту  $\mu$  (сухий піщаний ґрунт)

Отримуючи для кожної наступної ітерації нове випадкове значення можливо змодельовати випадкову зміну параметрів покриття, по якому здійснює рух гусенична машина. Це дає змогу уточнити існуючі імітаційні моделі збуреного руху ВГМ. Під час використання даного алгоритму для моделювання сил та моментів, необхідних для криволінійного руху ВГМ, з метою підвищення адекватності імітаційної моделі було паралельно змодельовано коефіцієнти опору для правого та лівого борту окремо, що, з

використанням математичної моделі [12], дало змогу отримати значення крутних моментів  $M1$  та  $M2$  на ведучих колесах необхідних для руху ВГМ вагою 42т. по сухому піщаному ґрунту з швидкістю 25 км/г (рис. 7 – 9), та порівняти ці дані з результатами моделювання  $M1(f=const)$ ,  $M2(f=const)$ , коли постійне значення показників коефіцієнтів опору  $f$  та  $\mu$  прийнято як середнє арифметичне табличних значень цих коефіцієнтів.

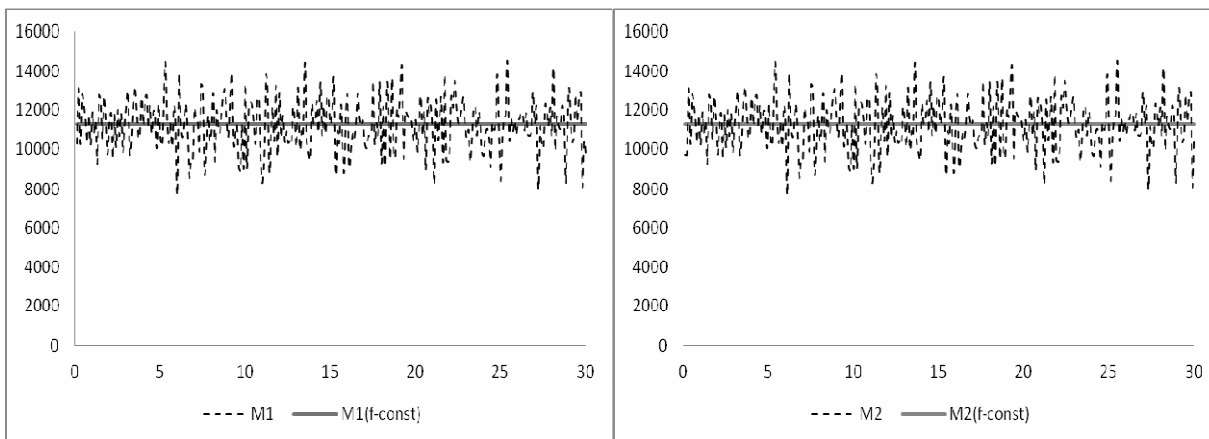


Рис. 7 – Результати імітаційного моделювання крутних моментів на ведучих колесах, необхідних для прямолінійного руху ВГМ вагою 42 т. по сухому піщаному ґрунту.

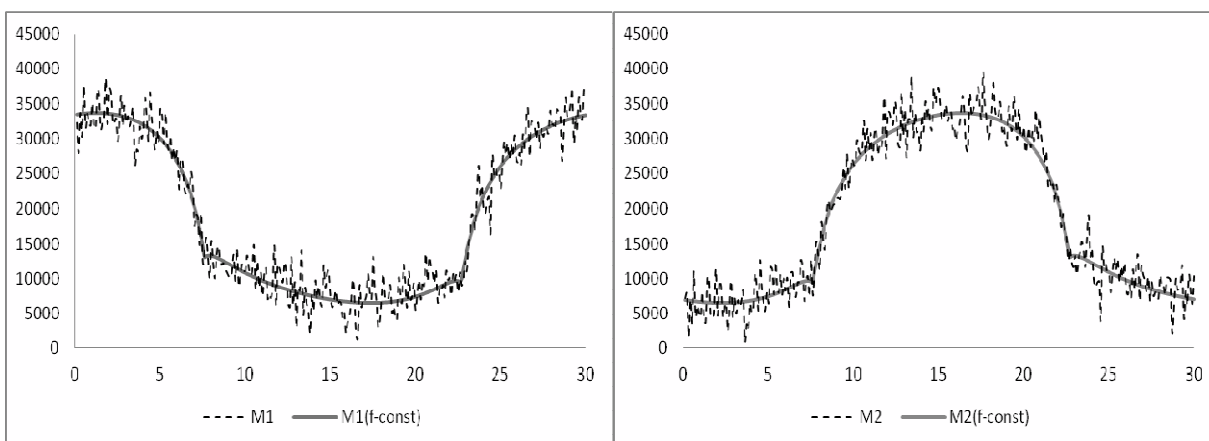


Рис. 8 – Результати імітаційного моделювання крутних моментів на ведучих колесах, необхідних для руху «змієюю» ВГМ вагою 42 т. по сухому піщаному ґрунту.

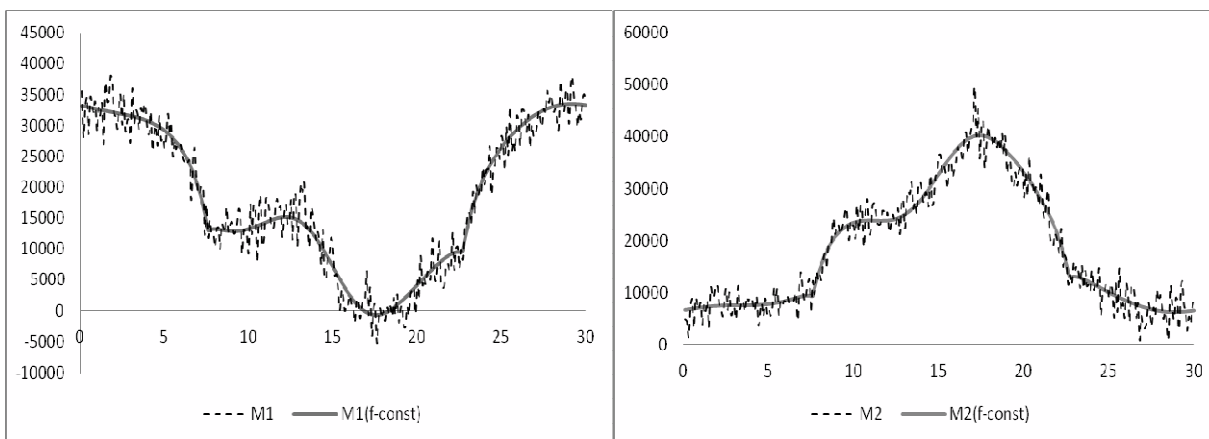


Рис. 9 – Результати імітаційного моделювання крутних моментів на ведучих колесах, необхідних для руху «змієюю» ВГМ вагою 42 т. по сухому піщаному ґрунту на схилі 10°.

Порівняння показників крутних моментів, отриманих під час математичного та імітаційного моделювання (рис. 10) дає змогу визначити, що різниця між ними під час збуреного криволінійного

руху на косогорі у окремих випадках сягає 7кН·м, що свідчить про підвищення адекватності імітаційної моделі порівняно з математичною.

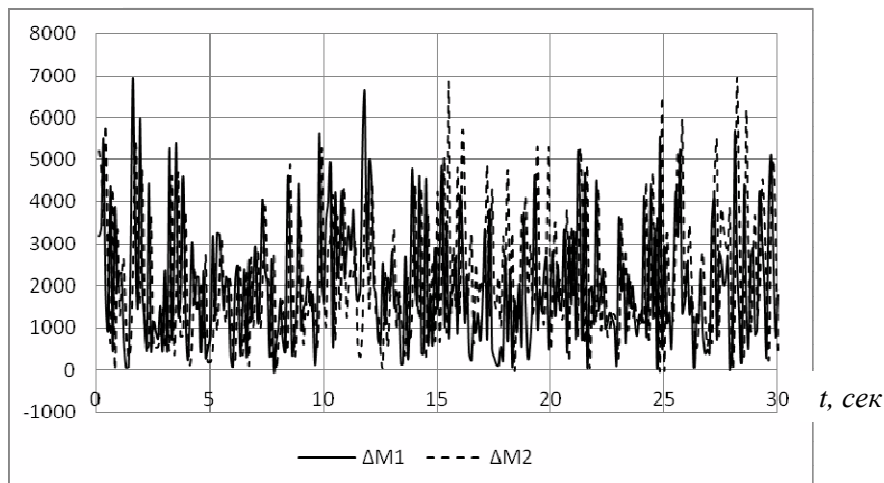
$M, Нм$ 

Рис. 10 – Різниця значень крутних моментів на ведучих колесах ВГМ отриманих під час імітаційного та математичного моделювання.

### Висновки:

Існуючі імітаційні моделі зовнішніх збурень, діючих на ВГМ під час руху, спрямовані на моделювання лише мікропрофілю поверхні, не враховуючи випадкових змін параметрів покриття. Такий підхід є прийнятним під час дослідження коливальних корпусу машини, але, водночас, є недостатньо точним у випадку дослідження впливу зовнішніх збурень на силові та кінематичні параметри трансмісії та силової установки.

У роботі запропоновано алгоритм побудови масиву нормально розподілених випадкових значень коефіцієнтів опору прямолінійному рухові та повороту ВГМ, значення яких використано під час імітаційного моделювання руху ВГМ.

Запропонований алгоритм підвищує адекватність імітаційної моделі збуреного руху ВГМ, не впливаючи на її складність, завдяки урахуванню коефіцієнтів опору, значення яких враховують параметри мікропрофілю опорної поверхні.

### Список літератури

- 1 **Al-Milli, S.** Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain / **S. Al-Milli, L. Seneviratne, K. Althoefer.** // *Journal of Terramechanics.* – 2010. – №3. – P. 151–160. – doi:10.1016/j.jterra.2010.02.001.
- 2 **Dawkins, J.** Evaluation of fractal terrain model for vehicle dynamic simulations / **J. Dawkins, D. Bevely, R. Jackson.** // *Journal of Terramechanics.* – 2012. – №6. – P. 299–307. – doi:10.1016/j.jterra.2012.10.003.
- 3 Predicting mobility performance of a small, lightweight track system using the computer-aided method NTVPM / **J. Y. Wong, C. Senatore, P. Jayakumar, K. Iagnemma.** // *Journal of Terramechanics.* – 2015. – №61. – P. 23–32. – doi:10.1016/0022-4898(94)90010-8.
- 4 **Monga, M.** Real-time simulation of dynamic vehicle models using a high-performance reconfigurable platform / **M. Monga, D. Roggow, M. Karkee and etc.** // *Microprocessors and Microsystems.* – 2015. – №8. – P. 720–740. – doi:10.1016/j.micpro.2015.08.014.
- 5 **Rubinstein, D.** A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles / **D. Rubinstein, R. Hitron.** // *Journal of Terramechanics.* – 2004. – №2. – P. 163–173. – doi:10.1016/j.jterra.2004.02.004.
- 6 **Rabbani, M.** Simulation for Vertical Dynamic Loading Forces on Track Rollers of the Half-tracked Tractor Based on Nonlinear Voigt's Model / **M. Rabbani, S. Takeoka, M. Mitsuoka and etc.** // *Engineering in Agriculture, Environment and Food.* – 2010. – №4. – P. 119–126. – doi:10.1016/S1881-8366(10)80003-5.
- 7 **Александров, Е. Е.** Имитационное моделирование возмущенного движения гусеничной машины с гидробъемным механизмом поворота / **Е. Е. Александров, Д. Е. Хаустов.** // *Вісник НТУ «ХПІ» «Транспортне машинобудування».* – 2005. – №37. – С. 19–28.
- 8 **Белецкий, А. В.** Математическое и имитационное моделирование профиля дорожного покрытия [Электронный ресурс] / **А. В. Белецкий, С. С. Рекунов.** // *Интернет-журнал "НАУКОВЕДЕНИЕ".* – 2014. – Вып. 5(24). – Режим доступа до ресурсу: <http://naukovedenie.ru>.
- 9 **Бровцин, В. М.** Моделирование микропрофиля поверхности полей и дорог / **В. М. Бровцин.** // *Сборник научных трудов ИАЭП.* – 2015. – №86. – С. 59–68.
- 10 **Высоцкий, М. С.** Основы проектирования модульных магистральных автопоездов / **М. С. Высоцкий, С. И. Кочетов, С. В. Харитончик.** – Минск: "Беларусская наука". – 2011. – 392 с.
- 11 **Александров, Е. Е.** Динамика транспортно-тяговых колесных и гусеничных машин / **Е. Е. Александров, Д. О. Волонцевич, В. Б. Самородов та ін.** – Харьков: ХНАДУ. – 2001. – 640 с.
- 12 **Исаков, П. П.** Теория и конструкция танков / **П. П. Исаков.** – Москва: "Машиностроение". – 1987. – 196 с.
- 13 **Лелиовский, К. Я.** Исследование вибраций трансмиссии при движении автомобиля по дорогам различного микропрофиля / **К. Я. Лелиовский, В. С. Макаров.** // *Труды Нижегородского государственного технического университета им. П. Е. Алексеева.* – 2013. – №4. – С. 98 – 103.

- 14 **Мазманишвили, А. С.** Построение случайных поверхностей движения объектов бронетанковой техники / **А. С. Мазманишвили, Т. Е. Александрова** // *Системы озброєння і військова техніка*. – 2012. – №1. – С. 68-71.
- 15 **Марченко, Н. А.** Имитационное моделирование движения транспортного средства по пересеченной местности / **Н. А. Марченко**. // *Двигатели внутреннего сгорания*. – 2004. – №1. – С. 87-89.
- 16 **Сергиенко, А. Н.** Методика описания неровностей профиля дороги при моделировании подвески автомобиля с рекуператором энергии колебаний / **А. Н. Сергиенко, Н. Г. Медведев, Б. Г. Любарский та ін.** // *Вісник НТУ "ХПИ"*. – 2013. – №37. – С. 185-192.
- 17 **Ндикумана, Э.** Разработка метода регистрации микропрофиля дороги с целью исследования плавности хода автомобиля: дис. канд. техн. наук: 05.05.03 / **Ндикумана Эдуард** – Москва. – 2000. – 150 с.
- 18 **Рудий, А. В.** Математична модель руху гусеничної машини на основі рівнянь Гіббса-Аппеля / **А. В. Рудий, Д. В. Рудавський** // *Сучасні інформаційні технології у сфері безпеки та оборони*. – 2015. – №3. – С. 113-117.
- 19 **Королюк В. С.** Справочник по теории вероятностей и математической статистике. / **В. С. Королюк, Н. И. Портенко, А. В. Скороход, А. Ф. Турбин**. – Москва: "Наука". – 1985. – 640 с.
- 20 **Фролов, К. В.** Колёсные и гусеничные машины / **К. В. Фролов**. – Москва: "Машиностроение". – 1997. – 687 с.
- 21 **Чобиток, В. А.** Теория движения танков и БМП / **В. А. Чобиток**. – Москва: Военное издательство. – 1984. – 264 с.
- 22 **Шишанов, С. М.** Выбор рациональных параметров системы поддресоривания быстроходных гусеничных машин : дис. канд. техн. наук : 05.05.03 / **Шишанов Сергей Маркович** – Москва. – 2015. – 185 с.
7. **Aleksandrov, E. E., Khaustov, D. E.** Imitatsionnoe modelirovaniye vozmuschennogo dvizheniya gusenichnoj mashiny s gidroob'yemnym mekhanizmom povorota [Simulation of the tracked vehicle perturbed motion with hydrostatic turning mechanism], *Visnyk NTU «KhPI» «Transportne mashynobuduvannia»*, 2005, **37**, 19-28.
8. **Beletskyj, A. V., Rekunov, S. S.** Matematicheskoe i imitatsionnoe modelirovaniye profilya dorozhnogo pokrytiya [Mathematical modeling and simulation of road surface profile]. *Internet-journal "NAUKOVEDENYE"*, 2014, **5(24)**, [web] <http://naukovedenie.ru>.
9. **Brovtsin, V. M.** Modelirovaniye mikroprofilya poverkhnosti polej i dorog [Modeling of surface microprofile of fields and roads]. *Sbornyk nauchnykh trudov YAEF*, 2015, **86**, 59-68.
10. **Vysotskyj, M. S., Kochetov, S. Y., Kharytonchyk, S. V.** Osnovy proektirovaniya modul'nykh magistral'nykh avtopoyezdov [Basics of modular mainline trains design]. Minsk: "Belarusskaya navuka", 2011, 392 p.
11. **Aleksandrov, E. E., Volontsevich, D. O., Samorodov, V. B. etc.** Dinamika transportno-tyagovykh kolesnykh i gusenichnykh mashin. [Dynamics of transport-hauling wheeled and caterpillar machines]. *Khar'kov: KhNADU*, 2001, 640 p.
12. **Isakov, P. P.** Teoriya i konstruktziya tankov [Theory and design of tanks]. Moscow: "Mashinostroyeniye", 1987, 196 p.
13. **Lelyovskyj, K. Ya., Makarov, V. S.** Issledovaniye vibratsij transmissii pri dvizhenii avtomobilya po dorogam razlichnoho mikroprofilya [Studying the transmission vibration during the vehicle motion upon the roads of various microprofile]. *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R. E. Alekseyeva*, 2013, **4**, 98-103.
14. **Mazmanyshvyly, A. S., Aleksandrova, T. E.** Postroyeniye sluchajnykh poverkhnostej dvizheniya ob'yektov bronetankovoj tekhniki [Construction of casual surfaces of objects motion of armoured technique]. *Systemy ozbroyennya i vijs'kova tekhnika*, 2012, **1**, 68-71.
15. **Marchenko, N. A.** Imytatsionnoye modelirovaniye dvizheniya transportnogo sredstva po peresechennoj mestnosti [Simulation of the vehicle on rough terrain]. *Dvigateli vnutrennego sgoraniyya*, 2004, **1**, 87-89.
16. **Serhyenko, A. N., Medvedev, N. H., Liubarskyj, B. H. etc.** Metodika opisaniya nerovnostej profilya dorogi pri modelirovanii podveski avtomobilya s rekuperatorom energii kolebanij [Method of road roughness description in the simulation car suspension with heat recovery energy vibrations]. *Visnyk NTU "KhPI"*, 2013, **37**, 185-192.
17. **Ndikumana, E.** Razrabotka metoda registratsii mikroprofilya dorogi s tsel'yu issledovaniya plavnosti khoda avtomobilya: Dissert. kand. tekhn. nauk: 05.05.03 [Development of a method of road microprofile registration

#### Bibliography (transliterated)

1. **Al-Milli, S., Seneviratne, L. D., Althoefer, K.** Track-terrain modelling and traversability prediction for tracked vehicles on soft terrain. *Journal of Terramechanics*, 2010, **47(3)**, 151-160, doi:10.1016/j.jterra.2010.02.001.
2. **Dawkins, J., Bevly, D., Jackson, R.** Evaluation of fractal terrain model for vehicle dynamic simulations. *Journal of Terramechanics*, 2012, **6**, 299-307, doi:10.1016/j.jterra.2012.10.003.
3. **Wong, J. Y., Senatore, C., Jayakumar, P., Iagnemma, K.** Predicting mobility performance of a small, lightweight track system using the computer-aided method NTVPM. *Journal of Terramechanics*, 2015, **61**, 23-32, doi:10.1016/0022-4898(94)90010-8.
4. **Monga, M., Roggow, D., Karkee, M. and etc.** Real-time simulation of dynamic vehicle models using a high-performance reconfigurable platform. *Microprocessors and Microsystems*, 2015, **8**, 720-740. doi:10.1016/j.micpro.2015.08.014
5. **Rubinstein, D., R. Hitron.** A detailed multi-body model for dynamic simulation of off-road tracked vehicles. *Journal of Terramechanics*, 2004, **2**, 163-173, doi:10.1016/j.jterra.2004.02.004
6. **Rabbani, M. Takeoka, S. Mitsuoka M. and etc.** Simulation for Vertical Dynamic Loading Forces on Track

- to explore the smooth course of the car]. Moskva, 2000, 150 p.
18. **Rudyy, A. V., Rudavs'kyj, D. V.** Matematychna model' rukhu husenychnoi mashyny na osnovi rivnian' Hibbsa-Appelia [Mathematical model of tracked vehicles motion based on Gibbs-Appell equation]. *Suchasni informatsijni tekhnologii u sferi bezpeky ta oborony*, 2015, 3, 113-117.
19. **Korolyuk, V. S., Portenko, N. I., Skorokhod, A. V., Turbin, A. F.** Spravochnik po teorii veroyatnostej i matematicheskoj statistike [Handbook of probability theory and mathematical statistics], Moscow: "Nauka", 1985, 640 p.
20. **Frolov, K. V.** Koliosnyye i gusenichnyye mashyny [Wheel and caterpillar machines]. Moscow: "Mashynostroenye", 1997, 687 p.
21. **Chobytok, V. A.** Teoriya dvizheniya tankov i BMP [Theory movement of tanks and combat infantry machine]. Moscow: Voennoe izdatel'stvo, 1984, 264 p.
22. **Shyshanov, S. M.** Vybory ratsional'nykh parametrov sistemy podressorivaniya bystrokhodnykh gusenichnykh mashin: Dissert. kand. tekhn. nauk: 05.05.03 [The choice of rational parameters of the suspension system of high-speed tracked vehicles]. Moscow, 2015, 185 p.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Рудий Андрій Володимирович** – Національна академія сухопутних військ ім. Гетьмана П.Сагайдачного, ад'юнкт; м. Львів, Україна; e-mail: rasty82@ukr.net

**Andriy Rudiy** – Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, adjunct; Lviv, Ukraine; e-mail: rasty82@ukr.net

**Васильєв Антон Юрійович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Теорія і системи автоматизованого проектування механізмів і машин»; м. Харків, Україна; e-mail: avasiliev@tmm-sapr.org

**Anton Vasiliev** – Ph.D., Theory and Systems of Mechanisms and Machines Automated Design Department, National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", assistant professor; Kharkov, Ukraine; e-mail: avasiliev@tmm-sapr.org.

**Бистрицький Максим Євгенович** – кандидат фізико-математичних наук, Національна академія сухопутних військ ім. Гетьмана П.Сагайдачного, курсовий офіцер курсів перепідготовки та підвищення кваліфікації; м. Львів, Україна; e-mail: bystrytsky@gmail.com.

**Maksym Bystrytsky** – Ph.D., Hetman Petro Sahaidachnyi National Army Academy, course officer of retraining and advanced training courses; Lviv, Ukraine; e-mail: bystrytsky@gmail.com

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Рудий, А. В.** Моделирование внешних возмущений опорной поверхности под час руху військової гусеничної машини / **А. В. Рудий, А. Ю. Васильєв, М. Є. Бистрицький** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 113-122. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.17.

*Please cite this article as:*

**Rudiy, A., Vasiliev, A., Bystrytsky, M.** Modeling of the external disturbances of the ground surface during military tracking vehicles movement. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 18 (1190), 113-122, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.17.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Рудой, А. В.** Моделирование внешних возмущений опорной поверхности во время движения военной гусеничной машины / **А. В. Рудой, А. Ю. Васильєв, М. Е. Бистрицький** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 113-122. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.17.

**АННОТАЦИЯ** В статье рассмотрен вопрос имитационного моделирования влияния случайных внешних возмущений на движение военной гусеничной машины, в частности случайное изменение характеристик опорной поверхности по которой совершается движение. С использованием метода обратного преобразования построен алгоритм получения массива случайных значений коэффициентов сопротивления прямолинейному движению и повороту. Предложенный алгоритм позволяет уточнить имитационную модель возмущенного движения военной гусеничной машины и может быть использован во время исследований, направленных на усовершенствование элементов трансмиссий и силовых установок военных гусеничных машин

**Ключевые слова:** военная гусеничная машина; имитационное моделирование; функция распределения; алгоритм; метод обратного преобразования.

Надійшла (received) 16.05.2016

УДК 621.314: 621.316.7

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.18

## CONTEXT APPROACH FOR ELECTRIC GRID CONTROL

I. V. VERBUTSKYI<sup>1\*</sup>, A. G. KYSELOVA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> The department of Industrial Electronics, Faculty of Electronics, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup> The department of System Design, Educational Scientific Complex "IASA", National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

\*email: verbitskiy@bigmir.net

**ABSTRACT** The necessity of using the parallel connection of renewable energy sources (RES) at an electric grid which leads to a complicated control is shown. The control improvement on basis additional data about the environment and the grid infrastructure is described. The data formalizing to a context for decreasing calculation complexity and using expert knowledge is proposed. The example of context using is shown. A hierarchical control system on basis variety of data representation is shown. A flexible structure of control unit is proposed.

**Keywords:** context, hierarchical control system, expert knowledge, rules, renewable energy sources

## КОНТЕКСТНИЙ ПІДХІД КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ

Є. В. ВЕРБИЦЬКИЙ<sup>1\*</sup>, А. Г. КИСЕЛЬОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра промислової електроніки, факультет електроніки, НТУУ «КПІ», Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup> Кафедра системного проектування, ННК «Інститут прикладного системного аналізу», НТУУ «КПІ», Київ, УКРАЇНА

\*email: verbitskiy@bigmir.net

**АНОТАЦІЯ** Використання відновлювальних джерел енергії (ВДЕ) має ряд особливостей, які пов'язані з їх малою та нестабільною в часі вихідною потужністю. Тому виникає необхідність їх паралельного під'єднання для забезпечення необхідної вихідної потужності та встановлення акумулятора для перерозподілу енергії, відібраної від ВДЕ, в часі. Можливість паралельної роботи різноманітних ВДЕ в системі електроживлення забезпечується встановленням на їх виході перетворювачів електричної енергії, які виконують функцію узгоджувального пристрою і можуть працювати в режимі джерела струму, напруги або потужності. Керування перетворювачами електроенергії здійснюється з використанням гетерогенних даних про навколишнє середовище (потужність сонячного випромінювання, швидкість і напрям вітру, температура, вологість тощо), режими роботи силового обладнання (просторовий розподіл джерел енергії і їх вихідна потужність, рівень заряду акумуляторів, обсяг втрат енергії в системі) і потужності споживачів. Покращення ефективності керування перетворювачами системи електроживлення можливе за умови накопичення, обробки та інтеграції даних від усіх доступних давачів системи. Однак при збільшенні кількості ВДЕ, які входять до складу системи електроживлення, з одного боку експоненційно зростає обсяг оброблюваних і транспортваних даних між вузлами системи, з іншого боку – через зростання кількості параметрів, які входять до закону керування, його загальний вигляд значно ускладнюється і не може бути виведений автоматично. Тому для керування також використовують знання експертів, які переважно представлені у вигляді правил, що дозволить забезпечити: зменшення обсягу транспортваних і оброблюваних даних; збільшення гнучкості керування системою електроживлення; можливість вибору стратегії керування залежно від наявної інформації про систему і обсягом вимірюваних даних.

**Ключові слова:** контекст, ієрархічний принцип керування, експертні знання, правила керування, відновлювальні джерела енергії

### Introduction

The RES have nonstable output power, therefore they are connected in parallel to an electric grid to ensure the required output power. Redistribution RES energy in time is provided by a battery installing. The RES parallel work are achieved by using matched devices on basis power converters which work in voltage, current or power source modes [1,2]. Heterogeneous data of environment (solar radiation, wind speed, and direction, temperature, humidity), power equipment modes (the RES spatial arrangement, its output power, the battery power level, power loss level), load's power are used for converters control.

The grid's sensors data accumulation, processing, and integration allow improving the control effectiveness. But increasing the RES number causes to an exponential increase of the transmitted and processing data. The electric grid control law also complicated due to increasing of control parameters. In this case, for the control may be used rules on basis expert knowledge [3]. Such control system has a hierarchical structure and consists of autonomous units. The top-level hierarchy control system unit's deal with general processes of the overall grid. The expert rules used by reason of control complexity on this level. The low-level control units subordinate to top-level units and manage of the separate equipment use a PID controller law or more advanced laws on basis time series (TS). Interaction

formalization between a two type units is an urgent problem for such control systems of the electric grid.

**Goal**

The TS processing sequence consist of several procedures: fixing the values of control parameters by the sensors and obtaining the TS, the analysis of the reliability of the obtaining the TS data, determining the preferable TS length, the TS filtration, approximation, and prediction [4].

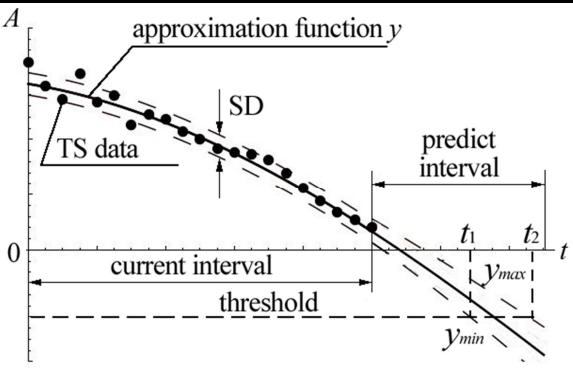
The low-level control units may use the TS but for the top-level units is necessary data formalizing because it allows reduce the amount of the processing data, increase intelligent of the control, use expert knowledge. For instance, it is possible to transmit a signal integral indicators

(average value, RMS, trend) instead its TS. The subsequent generalization may be performed by the signal extrapolation with a predetermined reliability. This information allows determining the signal changing over time more accurately and additionally decrease of the transmitted information between units.

**The statement of the base material**

The data reliability is an important aspect for the electric grids with high-level electromagnetic noise. A preliminary data processing is desirable in this case. Static methods may use here, especially a least square method (LSM) [5]. The LSM allows defining a predict parameters with the minimal standard deviation (SD). The sequence of data processing is shown in Table 1.

Table 1. the sequence of data processing

<p><b>Step 1</b> Approximation the TS by polynomial function <math>y = f(t, c_0, c_1, \dots, c_n)</math>, where <math>c_k</math> is constant coefficients, for instance <math>y = c_2 t^2 + c_1 t + c_0</math></p>	<p><b>Step 2</b> A standard deviation calculation for the TS values <math>\sigma_y</math>, and the parameters estimation of approximation function <math>\sigma_{ck}</math></p>
	$\sigma_y = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n (y(k\Delta t) - y_k)^2};$ $\sigma_{ck} = \frac{\sigma_y}{\sqrt{n}},$ <p>where <math>n</math> is the TS length</p>
<p><b>Step 3</b> The function values prediction in a some predict interval with <math>3\sigma</math> reliability</p>	<p><b>Step 4</b> The information formalization</p>
<p><math>y_{min} = (c_{2+3}\sigma_{ck})t^2 + (c_{1+3}\sigma_{ck})t + (c_{0+3}\sigma_{ck});</math> <math>y_{max} = (c_{2+3}\sigma_{ck})t^2 + (c_{1+3}\sigma_{ck})t + (c_{0+3}\sigma_{ck});</math></p>	<p>TS value := «Decrease» The rate of increase of the signal in the current interval := «-2.5..-3.2» The signal will cross threshold in time interval := «<math>t_1..t_2</math>» Average signal value := «<math>A_d</math>» SD = «<math>\sigma</math>»</p>

The TS approximation allows predict and uses signal values for control in the analytical form which minimizes storage space and transmitted rate for data. Also, the analytical form of the data helps us to use new control methods, for instance adaptive, robust or predict methods [6]. The obtained analytical functions may be formalized to a context [7, 8] for subsequent using to rules creation by the experts. The formalizing procedure of context deriving is shown in step 4 of Table 1.

The formalized control method on the context basis supplements the numerical TS data by knowledge about their physical meaning and relations, environment state etc. All these context data is stored in a graph which is called a grid ontology [9, 10]. For instance, we consider P-Q diagram (diagram of active P and reactive power Q) of a reactive power compensator which is shown on fig. 1.

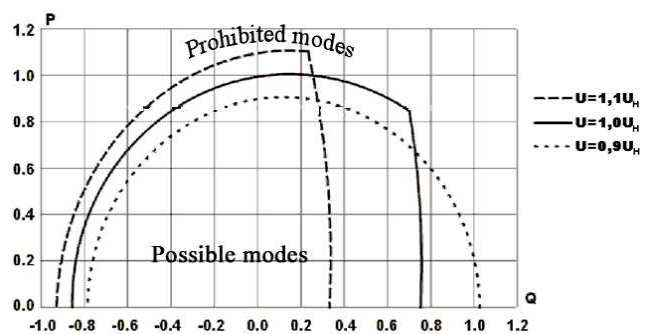


Fig. 1. – P-Q diagram of a reactive power compensator

The family of curves P-Q is threshold values for the compensator control system. If the compensator operating point is above of threshold value which corresponds to the



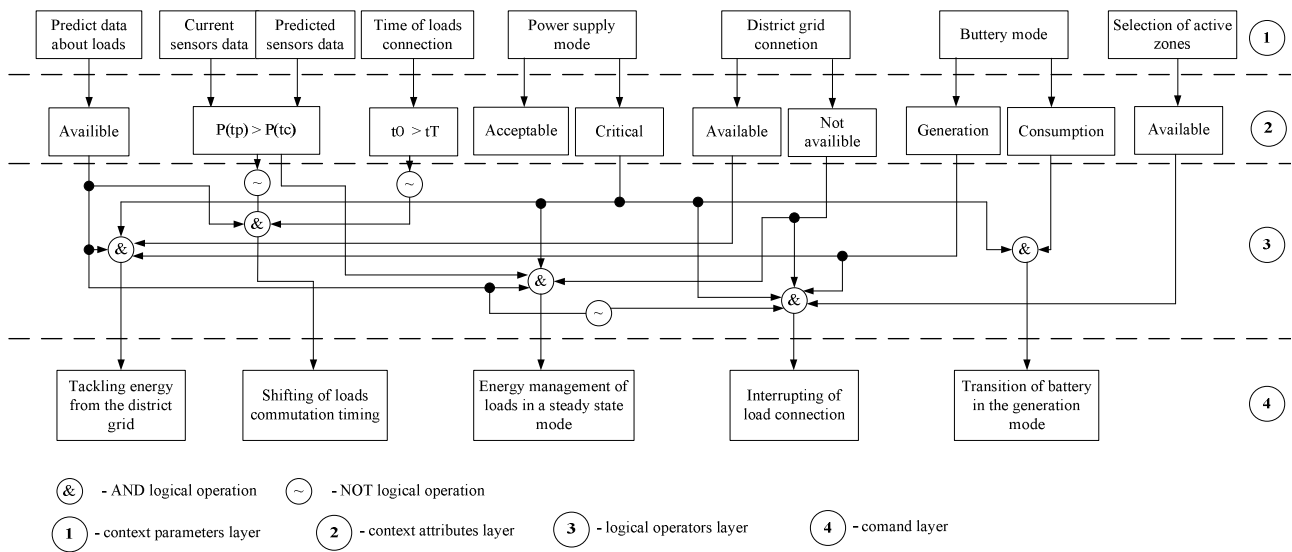


Fig. 2 – The expert rule example

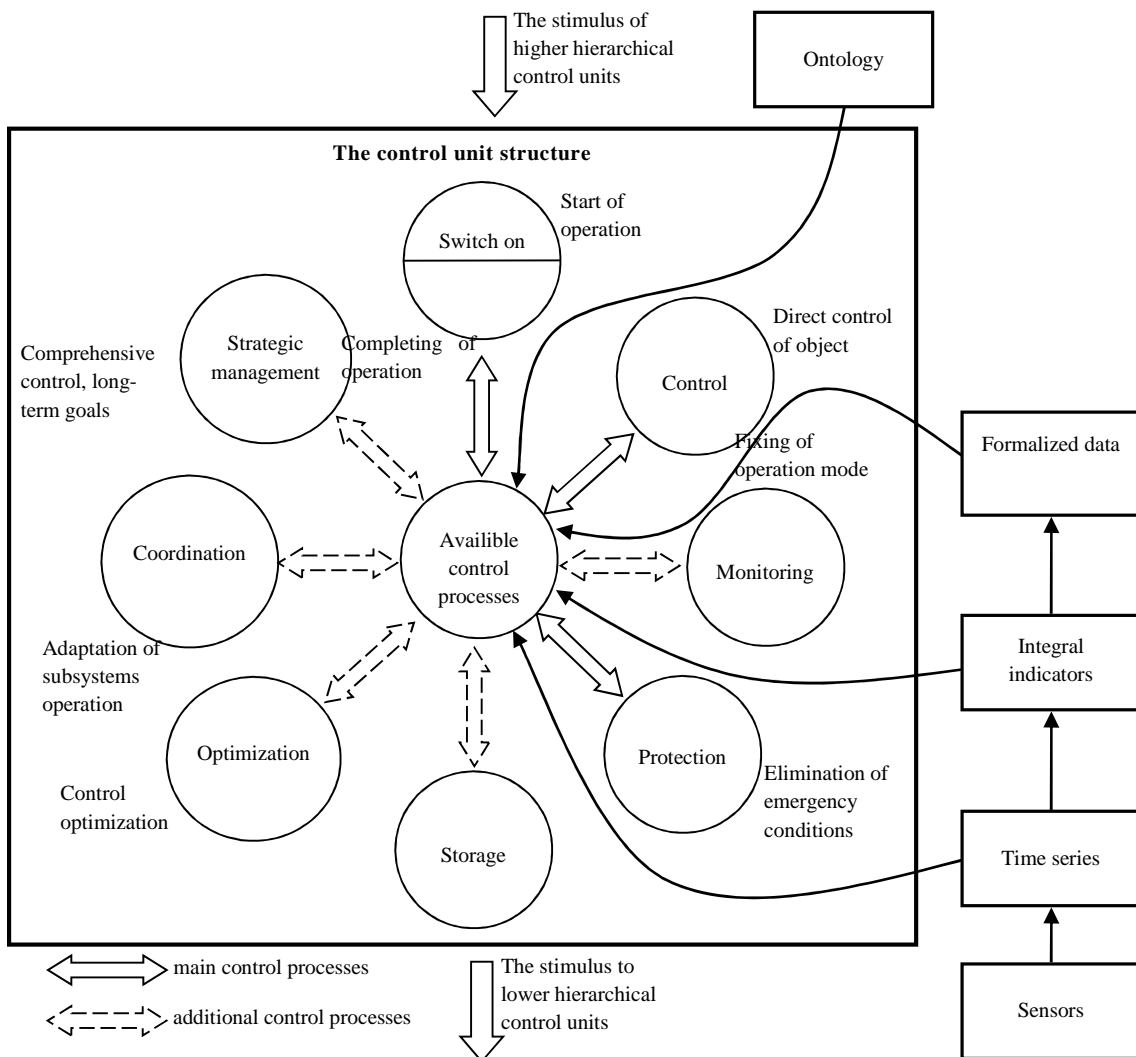


Fig. 3. – Structure of the control unit of electric grid

compensator DC link voltage  $U$ , the context of the current mode is «Compensator DC link voltage is:= Not enough». In another case the context has value «Compensator DC link voltage is:= Enough». If the compensator mode is unsatisfactory, a control command has to generate, for instance, «Increase DC link voltage by 10 %». The prediction data make control more flexible.

They help define a time of some event «After ten seconds DC link voltage will := Not enough». The described examples of context may be used like input data for rules developing. The rule example is shown on the fourth layer structure of rule is shown on fig. 2. The context parameters are on the first layer. They are “Predict data about loads”, “Current sensors data” and “Predicted sensors data” etc. Some context attributes used for rules design shown on the second level, for instance, “Critical”, “Available”. The context attributes combined using logical operators on the third level. Control commands obtained on the fourth level. The control commands are stimulus for control units of the lower level of the hierarchy. Numerical values of stimulus may calculate directly or only set the direction of change.

### The discussion of the results

Plenty of options for data formats allows choose the appropriate control method. It depends on completeness and format of the accessible information the control object, its complexity. Also additional information helps divide control on separate processes and use it depending on the context. Part of the processes are necessary, the other processes may be linked if needed. A structure of the control unit is shown on fig. 3.

### Conclusions

The variety of data representation forms, additional information about the electric grid system contained in the ontology allows to use the intelligent control methods to provide such benefits:

- reducing the amount of processed and transmitted data;
- flexible control of the electric grid;
- control strategy selection depends on available information.

### Список літератури

1. Кириленко, А. В. Преобразователи параметров электроэнергии в smart системах энергетики / А. В. Кириленко, Ю. И. Якименко, В. Я. Жуйков, С. П. Денесюк // *Праці інституту електродинаміки*. Спец. випуск. – Київ. – 2010. – С. 17-23.
2. Жуйков, В. Я. Формирование синусоидального напряжения разнотипными источниками энергии / В. Я. Жуйков, Е. В. Вербицкий, Е. С. Осипенко // *Энергосбережение энергетика энергоаудит*. – 2013. – №8 (114). – С. 104-106.
3. Firat, A. Information Integration Using Contextual Knowledge and Ontology Merging [Web]: PhD Thesis: 27.08.03: defended Sep. 2003. MIT, 2003. 151p. URL: <http://www.mit.edu/~bgrosf/paps/phd-thesis-aykut-firat.pdf> (access date: 29.05.2009).

4. Box, G. Time Series Analysis: Forecasting and Control / G. Box, G. Jenkins, G. Reinsel // Wiley. – 2008. – 784 p.
5. Swerling, P. Modern state estimation methods from the viewpoint of the method of least squares. *Automatic Control / P. Swerling // IEEE Transactions*. – 1971. – Volume 16, Issue 6. – P. 707-719. – doi:10.1109/TAC.1971.1099815.
6. Rolf Issermann. Digital control systems. Fundamentals, deterministic control. – Springer-Verlag. – 1989. – Volume 1. – 334 p.
7. Hong, J. Context-aware Systems: A Literature Review and Classification / J. Hong, E. Suh, S. Kim // *Expert Systems with Applications*. – 2008. – 36(4). – 8509-8522. – doi:10.1016/j.eswa.2008.10.071.
8. Вербицкий, Е. В. Использование контекстных данных при управлении распределенной сетью электропитания / Е. В. Вербицкий, А. Г. Кисельова // *Технічна електродинаміка*. – 2016. – № 1. – С. 55-59.
9. Zhuikov, V. Integration of context-aware control system in microgrid / V. Zhuikov, A. Kyselova // in *Electronics and Nanotechnology (ELNANO), IEEE XXXIII International Scientific Conference*. – 2013. – P. 386-390. – doi:10.1109/ELNANO.2013.6552029.
10. Кисельова, А. Г. Регуляризація контекстних даних при керуванні автономними системами електроживлення/ А. Г. Кисельова, Г. Д. Кисельов // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях*. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 125-130. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.18

### Bibliography (transliterated)

1. Kirilenko, A. V., Yakimenko, U. I., Zhuykov, V. Ya., Denesnyuk, S. P. Preobrazovateli parametrov elektroenergii v smart sistemakh energetiki [Converters parameters in smart electricity system]. *Pratsi institutu elektrodinamiki. Spets. випуск [Pratsi Instytutu Elektrodinamiki. Spetsialnyi випуск]*, 2010, 17-23.
2. Zhuykov, V. Ya., Verbiskiy, Ye. V., Osipenko, Ye. S. Sinusoidal voltage generation by energy sources of different type. *Energoberezhnie energetica energoaudit*, 2013, 8(114), 104-106.
3. Firat A. Information Integration Using Contextual Knowledge and Ontology Merging [Web]: PhD Thesis: 27.08.03: defended Sep. 2003. MIT, 2003. 151p. URL: <http://www.mit.edu/~bgrosf/paps/phd-thesis-aykut-firat.pdf> (access date: 29.05.2009).
4. Box, G., Jenkins, G., Reinsel, G. Time Series Analysis: Forecasting and Control, Wiley, 2008, 784 p.
5. Swerling, P. Modern state estimation methods from the viewpoint of the method of least squares. *Automatic Control, IEEE Transactions*, 1971, 6(16), 707-719, doi:10.1109/TAC.1971.1099815.
6. Rolf Issermann. Digital control systems. Volume 1: Fundamentals, deterministic control. Springer-Verlag, 1989, 334 p.
7. Hong, J., Suh, E., Kim, S. Context-aware Systems: A Literature Review and Classification. *Expert Systems with Applications*, 2008, 36(4), 8509-8522, doi:10.1016/j.eswa.2008.10.071.
8. Verbytskyi, I. V., Kyselova, A. G. Application of contextual data for control of distributed power grid. *Tekhnichna elektrodinamika*, 2016, 1, 55-59.
9. Zhuikov, V., Kyselova, A. Integration of context-aware control system in microgrid. in *Electronics and Nanotechnology (ELNANO), 2013 IEEE XXXIII*

*International Scientific Conference*, 2013, 386-390,  
doi:10.1109/ELNANO.2013.6552029.

10. **Kyselova, A., Kyselov, G.** Regularization of context data of autonomous power supply systems. *Bulletin of NTU "KhPI"*.

*Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **12(1184)**, 125-130, doi: 10.20998/2413-4295.2016.12.18.

#### About authors (Відомості про авторів)

**Verbitskiy Ievgen** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Assoc. Prof., National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prospect Peremohy, 03056, Kyiv-56, Ukraine; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

**Вербицький Євген Володимирович** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», доцент кафедри системного проектування; м.Київ, Україна; e-mail: verbitskiy@bigmir.net.

**Kyselova Anna** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Assoc. Prof., National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", 37, Prospect Peremohy, 03056, Kyiv-56, Ukraine; e-mail: a.g.kyselova@gmail.com.

**Кисельова Анна Геннадіївна** – кандидат технічних наук, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», доцент кафедри системного проектування; м.Київ, Україна; e-mail: a.g.kyselova@gmail.com.

*Please cite this article as:*

**Verbitskiy, I. V., Kyselova, A. G.** Context approach for electric grid control. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 123-127, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.18.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Вербицький, Є. В.** Контекстний підхід керування системою електроживлення / **Є. В. Вербицький, А. Г. Кисельова** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 123-127. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.18.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Вербицкий, Е. В.** Контекстный подход управления системой электропитания / **Е. В. Вербицкий, А. Г. Киселева** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 123-127. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.18.

**АННОТАЦІЯ** *Повышение эффективности управления преобразователями системы электропитания возможно при условии накопления, обработки и интеграции данных от всех доступных датчиков системы. Однако при увеличении количества возобновляемых источников электроэнергии, которые входят в состав системы электропитания, с одной стороны растет экспоненциально объем обрабатываемых и транспортируемых данных между узлами системы, а с другой - из-за роста количества параметров, входящих в закон управления, чей общий вид значительно усложняется и не может быть выведен автоматически. Поэтому для управления необходимо использовать знания экспертов.*

**Ключевые слова:** *контекст, иерархический принцип управления, экспертные знания, правила управления, возобновляемых источников энергии*

Надійшла (received) 14.05.2016

УДК 004.932

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.19

**МЕТОД АВАРИЙНОГО ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ЦИФРОВЫХ КАДРОВ С СУЩЕСТВЕННОЙ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ ИХ ПАРАМЕТРОВ****Н. Ю. ДИХТЯР<sup>1\*</sup>, Я. С. МОВСЕСЯН<sup>1</sup>, В. Е. САВАНЕВИЧ<sup>2</sup>, С. В. ХЛАМОВ<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков, УКРАИНА<sup>2</sup> Ужгородский национальный университет, Ужгород, УКРАИНА

\*email: movsesian.iana@gmail.com

**АННОТАЦИЯ** В статье разработан вычислительный метод аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров. Разработанный вычислительный метод предназначен для определения начального приближения параметров отождествления формуляров звездного каталога и измерений кадра с существенной неопределенностью их параметров, которая связана с большими ошибками в задании масштаба изображения (фокусного расстояния используемого телескопа) и координат наведения телескопа. Разработанный вычислительный метод апробирован в программном обеспечении автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec. Результаты ПО CoLiTec подтверждают достоверность и надежность работы предложенного в статье вычислительного метода.

**Ключевые слова:** цифровой кадр, аварийное отождествление, постоянные пластинки, первичное отождествление, измерение кадра, формуляр каталога.

**THE METHOD OF EMERGENCY IDENTIFICATION OF THE DIGITAL FRAME WITH SUBSTANTIAL UNCERTAINTY OF THEIR PARAMETERS****M. DIKHTYAR<sup>1\*</sup>, IA. MOVSESIAN<sup>1</sup>, V. SAVANEVYCH<sup>2</sup>, S. KHLAMOV<sup>1</sup>**<sup>1</sup> Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE<sup>2</sup> Uzhhorod National University, Uzhhorod, UKRAINE

**ABSTRACT** The article developed a computational method of emergency identification of the digital frames with significant uncertainty of their parameters. Computational method of emergency identification of the digital frames with significant uncertainty of their parameters it is designed to determine for initial approximation of parameters identification forms of the star catalog and measurements of the frame with significant uncertainty of parameters is associated with large errors in setting the image zoom (focal length of the telescope is used), and the coordinates of the telescope pointing. Many years of practical experience in the identification of digital frames with significant uncertainty of their parameters with the use of this method proves its reliability and efficiency. The article by the method of statistical modeling to determine maximum permissible deviation values corresponding angles of triangles (from the side of the frame and stars of the catalog) of the primary identification. Analysis of these data shows the validity of the calculation method chosen constants. Developed a computational method of emergency identification of the digital frames with significant uncertainty of their parameters was implemented in the software automatically search for asteroids and comets on a series of the CCD frames CoLiTec. Software CoLiTec results confirm the accuracy and reliability of the computational method of emergency identification of the digital frames with significant uncertainty of their parameters proposed in the article.

**Keywords:** digital frame, emergency identification, constant plates, primary identification, measurement of the frame, stars of the catalog.

**Введение**

Разработка вычислительных методов автоматической обработки серий астрономических изображений является одной из быстро развивающихся предметных областей компьютерной обработки данных [1, 2]. К основным операциям автоматической обработки данных относятся, в том числе, операции отождествления кадров [3, 4, 5, 6]. Отождествление со звездным каталогом кадров, данные о которых содержат существенную неопределенность, является достаточно сложной задачей.

**Цель работы**

Целью статьи является разработка метода аварийного отождествления, предназначенного для определения начального приближения параметров отождествления формуляров звездного каталога и измерений кадров, данные о которых содержат существенную неопределенность, связанную с большими ошибками в задании масштаба изображения (фокусного расстояния телескопа) и координат наведения телескопа.

### Постановка задачі

По некоторой программе телескоп наводится на заданные участки небесной сферы. По результатам наблюдения формируются кадры. По результатам внутрикадровой обработки формируются измерения положения небесных объектов в системе координат сформированных кадров [7, 8]. Для формирования измерений, которые могут быть использованы астрономами, необходимо отождествить измерения кадра с формулярами используемых звездных каталогов.

В большинстве случаев достаточно точно известно положение участка небесной сферы, соответствующее исследуемому кадру. В данных условиях задача отождествления кадров не является сложной. Трудности возникают при существенных ошибках в масштабе (фокусном расстоянии телескопа) и координатах наведения телескопа на заданную точку небесной сферы.

Необходимо найти начальное приближение параметров попарного соответствия (паросочетания) между множествами формуляров используемого каталога и измерений кадра, данные о которых содержат указанную выше существенную неопределенность.

### Анализ литературы

В работе [3] проведен подробный анализ существующих методов отождествления цифровых изображений. Это, прежде всего, стробовые методы и методы, основанные на переборе гипотез о сочетании измерений кадра и формуляров каталога с учетом их пропуска и наличия ложных.

Кроме того, в работе [3] разработан оригинальный вычислительный метод отождествления измерений кадра с формулярами каталога. Данный метод отождествления позволяет найти попарное соответствие между совокупностью сформированных на кадры измерений и множеством объектов звездного каталога, принадлежащих той же области небесной сферы, что и сформированный кадр.

Используемая в методе отождествления [3] целевая функция является полимодальной. А данный метод, основанный на решении задачи о назначениях венгерским методом, находит экстремум целевой функции, ближайший к используемому начальному приближению. Чтобы отождествление обладало средними минимальными ошибками отождествления необходимо, чтобы используемое начальное приближение было в окрестности глобального максимума используемой целевой функции.

Одним из значимых для практики случаев отождествления является случай взаимного отождествления кадров серии, сформированных примерно в одно и то же время на одном телескопе одной ПЗС – камерой без изменения угла ее поворота.

Положение небесных объектов на кадрах, сформированных таким образом, отличается только параметрами сдвига (параметры поворота околонулевые, а масштаб является неизменным от кадра к кадру). Параметры сдвига общие для всех измерений двух кадров и характеризуют взаимное расположение кадров относительно друг друга на небесной сфере, являясь искомыми параметрами паросочетания между двумя множествами измерений. Для данных условий в работе [9] разработан метод предварительного отождествления, позволяющий определить начальные приближения параметров отождествления измерений кадров и формуляров звездного каталога.

При необходимости отождествления со звездным каталогом кадра, данные о котором содержат существенную неопределенность, метод [9] предварительного отождествления измерений кадров одной серии использовать не представляется возможным.

### Изложение основного материала

**Конечный статистический метод получения линейных постоянных пластинки.** Для предварительного отождествления кадра со звездным каталогом достаточно получить 6 параметров линейных постоянных пластинки [10, 11, 12]. В свою очередь для решения этой задачи достаточно иметь три точки (звезды) на кадры и соответствующие им пары в звездном каталоге. Координаты трех точек (звезд) так же составляют 6 параметров. В этой связи, расчет постоянных пластинки по трем точкам является конечным статистическим методом. Он не использует избыточные данные. С помощью конечного статистического метода нельзя исключить или уменьшить ошибки, содержащиеся в оценках положений звезд каталога и кадра. Однако, конечный метод позволяет получить начальное приближение при минимальных вычислительных затратах.

Исходными данными для получения линейных постоянных пластинки конечным статистическим методом являются, с одной стороны, положения трех звезд на отождествляемом кадры в системе координат (СК) этого ПЗС-кадра (Рис. 1). С другой стороны, идеальные координаты соответствующих звезд каталога. Для получения идеальных координат звезд каталога из их экваториальных координат достаточно иметь в своем распоряжении некое приближение экваториальных координат оптического центра кадра.

На Рис. 1 точки, соответствующие трем используемым звездам, и их координаты обозначены как  $A(x_1, y_1)$ ,  $B(x_2, y_2)$ ,  $C(x_3, y_3)$ . Каталогным экваториальным координатам этих звезд соответствуют идеальные координаты  $A(\xi_1, \eta_1)$ ,  $B(\xi_2, \eta_2)$ ,  $C(\xi_3, \eta_3)$  соответственно.

Идеальные координаты объекта с его координатами в СК ПЗС-кадра связываются

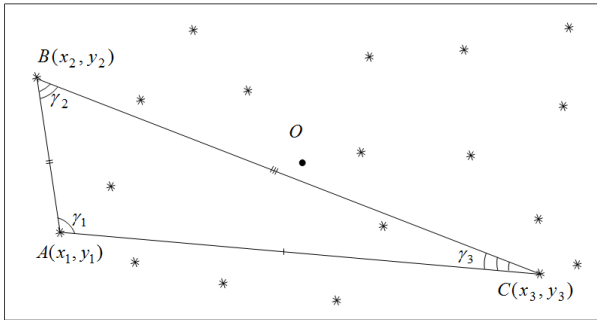


Рис. 1 – Формирование троек первичного отождествления

уравнением редукции [10, 11]:

$$\begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \xi_1 \\ \xi_2 \\ \xi_3 \end{bmatrix}; \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & y_1 \\ 1 & x_2 & y_2 \\ 1 & x_3 & y_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \eta_1 \\ \eta_2 \\ \eta_3 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

Возможно и обратное уравнение редукции, которое связывает координаты объекта в СК ПЗС-кадра  $x, y$  с его идеальными координатами  $\xi, \eta$  [10, 11]:

$$\begin{bmatrix} a'_0 \\ a'_1 \\ a'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 & \eta_1 \\ 1 & \xi_2 & \eta_2 \\ 1 & \xi_3 & \eta_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} b'_0 \\ b'_1 \\ b'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_1 & \eta_1 \\ 1 & \xi_2 & \eta_2 \\ 1 & \xi_3 & \eta_3 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

**Сущность метода аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров.** Для получения линейных постоянных пластинки необходимо наличие трех звезд на кадре (трех измерений) и соответствующие им пары – звезды в каталоге (формуляры каталога). Данное паросочетание может быть названо тройкой первичного отождествления. Очевидно, что данная тройка не единственна, но ни одна из них изначально неизвестна. Каждой тройке соответствует гипотеза «первичного отождествления» о соответствии троек кадра и каталога. В рамках предлагаемого метода искомая тройка (верная гипотеза о соответствии троек кадра и каталога) может быть найдена перебором. Количество вариантов перебора огромно. При верно отобранных представителях каталога и кадра, и их одинаковом количестве равном  $N$  количество вариантов выбора

трех представителей кадра будет равно количеству вариантов выбора трех представителей каталога и будет равно количеству сочетаний  $C_N^3$ . В свою очередь количество вариантов выбора троек (по три представителя кадра и каталога) будет равно  $(C_N^3)^2$ .

При этом, только  $C_N^3$  вариантов будут верными. При отборе  $N = 100$  измерений кадра и звезд каталога количество троек, которые надо будет проверить, будет примерно равно  $10^{11} \div 10^{12}$ , в свою очередь при  $N = 1000$  данное число увеличится примерно до  $10^{17} \div 10^{18}$ . Такое количество вариантов отбора измерений кадра и звезд каталога может быть перебрано при современном уровне развития вычислительной техники. Однако такая возможность не означает целесообразности реализации указанной операции.

**Исходные предпосылки для метода перебора троек для получения линейных постоянных пластинки.** Количество вариантов отбора измерений кадра и звезд каталога может быть сокращено при использовании двух следующих предпосылок, вытекающих из изучения закономерностей формирования измерений кадров и формуляров каталогов.

1. Количество пропусков измерений положений звезд на кадре ограничено. При этом, вероятность пропуска измерения зависит от оценки блеска объекта на кадре. Чем выше оценка блеска, тем данная вероятность меньше. Исходя из этой предпосылки для перебора претендентов в члены тройки отбираются самые яркие звезды кадра (измерения с наибольшей оценкой яркости) и каталожные звезды (формуляры каталога с наибольшей оценкой блеска) исследуемого участка звездного неба.

2. Количество ложных измерений и ложных формуляров каталога ограничено, однако не равно 0. Под истинными объектами при отождествлении понимаются звезды – объекты, являющиеся с точки зрения наблюдателя, неподвижными на серии кадров. При этом, ложными считаются измерения, связанные с такими объектами с ненулевым видимым движением, как ИСЗ, астероиды и т.д., а также измерения, связанные с ложными пикселями, другими артефактами изображения. Также к ложным измерениям следует относить измерения с аномально большими отклонениями. Кроме того, с использованием таких измерений достоверную гипотезу о параметрах отождествления все равно построить невозможно.

**Формирование множества измерений кадра как троек первичного отождествления со стороны кадра.** Для использования в качестве точек (элементов) троек первичного отождествления, используется множество  $\Omega_{bl50}$  претендентов из  $N_{bl50}$  измерений кадра с наибольшей яркостью. Дополнительно вводится множество  $\Omega_{bl100}$

измерений кадра с наибольшей яркостью, которые используются для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии троек кадра и каталога). Количество элементов данного множества  $N_{bl100}$  в  $k_{blob}$  раз больше количества элементов множества  $\Omega_{bl50}$ :

$$N_{bl100} = k_{blob} \cdot N_{bl50}. \quad (5)$$

Для обеспечения устойчивости отождествления к различным стрессовым факторам необходимо равномерное распределение отождествляемых измерений на кадре. К указанным стрессовым факторам в первую очередь следует отнести наличие на кадрах ярких треков искусственных спутников Земли, эффект перетекания заряда или какие-либо другие особенности, которые могут возникнуть при формировании изображения цифрового кадра. Исходя из этого при отборе претендентов множества  $\Omega_{bl100}$  измерений кадра, используемых для подтверждения гипотез первичного отождествления, для минимизации ошибок отождествления целесообразно измерения распределить равномерно на кадре.

Для обеспечения равномерного распределения используемых измерений на кадре производится фрагментация кадра. Кадр делится на  $M_{reg} \times M_{reg} = M_{reg}^2$  областей. Заданное количество  $N_{bl50}, N_{bl100}$  измерений кадра делится на количество фрагментов кадра, и в каждом таком фрагменте отбираются свои  $N_{bl50}/M_{reg}^2, N_{bl100}/M_{reg}^2$  самых ярких измерений кадра.

Для этого измерения, принадлежащие каждому фрагменту кадра, сортируются по интегральной яркости (используется строб 5x5 пикселей с центром в пикселе, соответствующем положению объекта, согласно оценке его положения) [6]. Самые яркие  $N_{bl50}/M_{reg}^2$  и  $N_{bl100}/M_{reg}^2$  измерения включаются в множества  $\Omega_{bl50}$  и  $\Omega_{bl100}$  соответственно. Использование интегральной яркости в фиксированном стробе позволяет избежать включения ложных измерений в множества  $\Omega_{bl50}$  и  $\Omega_{bl100}$  или минимизировать вероятность такого включения.

Если,  $N_{bl50}$  или  $N_{bl100}$  не делятся без остатка на  $M_{reg}^2$  то в каждом фрагменте кадра остается количество звезд, соответствующее целой части соответствующей дроби.

**Формирование множества формуляров каталога как троек первичного отождествления со стороны каталога.** Формирование множества звезд астрометрического каталога производится согласно тем же принципам, что и формирование множества измерений кадра. Создается два множества звезд астрометрического каталога. Первое множество

$\Omega_{star100}$  – множество, звезды которого принимают участие в переборе троек первичного отождествления со стороны каталога. Размер множества задается следующим образом:

$$|\Omega_{star100}| = k_{star} \cdot N_{bl50}. \quad (6)$$

Второе множество  $\Omega_{star200}$  используются для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии тройки кадра тройке астрометрического каталога). Количество элементов данного множества  $N_{st200}$  в  $k_{star}$  раз больше количества элементов множества  $\Omega_{star100}$ :

$$N_{st200} = k_{star} \cdot N_{st100}. \quad (7)$$

Как и при формировании множества измерений кадра исследуемая часть звездного неба (соответствующая отождествляемому кадру) фрагментируется на  $M_{reg} \times M_{reg}$  областей. Отобранные звезды каждого фрагмента сортируются по значению блеска. При этом в множества  $\Omega_{star100}$  и  $\Omega_{star200}$  включаются первые самые яркие  $N_{star100}/M_{reg}^2$  и  $N_{star200}/M_{reg}^2$  звезд исследуемых фрагментов звездного неба.

**Перебор измерений множества  $\Omega_{bl50}$  как элементов троек первичного отождествления со стороны кадра.** Выбор первого измерения любой тройки производится без условий. В качестве такового поочередно используются все элементы множества измерений  $\Omega_{bl50}$ . Для того, чтобы тройка измерений с координатами  $(x_{1(k)}; y_{1(k)}), (x_{2(k)}; y_{2(k)}), (x_{3(k)}; y_{3(k)})$  в СК ПЗС-кадра образовывала треугольник, покрывающий значительную часть кадра, для двух других элементов тройки вводятся условия, полученные в процессе использования данного метода экспериментальным путем. Вторая точка тройки должна находиться не ближе чем  $k_n$  углового размера  $R_{CCD}$  кадра от первой:

$$r_{(1)(2)} = \sqrt{(y_{2(k)} - y_{1(k)})^2 + (x_{1(k)} - x_{2(k)})^2} \geq 0.5 k_n (R_{CCDx} + R_{CCDy}) \quad (8)$$

Условием для выбора третьей точки тройки является выбор такого измерения на кадре, которому соответствует точка, из которой может быть опущен перпендикуляр  $r_{trian}$  на прямую, проходящую через первую и вторую точки тройки первичного отождествления.

Выражение для нахождения длины перпендикуляра  $r_{trian}$  выводится на основе определения модуля векторного произведения двух векторов [13]. С помощью свойства векторного

произведения двух векторов можно определить перпендикулярен ли вектор, проведённый через третью точку тройки, этим векторам. А модуль векторного произведения двух соответствующих векторов будет равен длине перпендикуляра  $r_{trian}$ :

$$r_{trian} = |x_{1(k)}y_{2(k)} - x_{2(k)}y_{1(k)}|. \quad (9)$$

Длина перпендикуляра  $r_{trian}$  может быть найдена с помощью уравнения прямой, проходящей через первую и вторую точки тройки, и уравнения перпендикуляра к этой прямой из третьей точки тройки [13].

Уравнение прямой, проходящей через первую и вторую точки тройки первичного отождествления, имеет вид [13]:

$$\frac{x - x_{1(k)}}{x_{2(k)} - x_{1(k)}} = \frac{y - y_{1(k)}}{y_{2(k)} - y_{1(k)}}. \quad (10)$$

После подстановки координат третьей точки тройки  $(x_{3(k)}; y_{3(k)})$  в выражение (10) и некоторых преобразований уравнение прямой, проходящей через первую и вторую точки тройки первичного отождествления, имеет вид:

$$Ax_{3(k)} + By_{3(k)} + C = 0, \quad (11)$$

Где

$$\begin{aligned} A &= (y_{2(k)} - y_{1(k)}); \\ B &= (x_{1(k)} - x_{2(k)}); \\ C &= y_{1(k)} \cdot x_{2(k)} - x_{1(k)} \cdot y_{2(k)}. \end{aligned}$$

Известна формула для нахождения расстояния  $d$  от точки до прямой на плоскости, что соответствует длине перпендикуляра, опущенного из данной точки на прямую [13]:

$$d = \frac{|Ax + By + C|}{\sqrt{A^2 + B^2}}. \quad (12)$$

После подстановки уравнения прямой (11) и коэффициентов  $A$  и  $B$  в выражение (12) длина перпендикуляра  $r_{trian}$  как расстояния от третьей точки тройки первичного отождествления до прямой, проходящей через первую и вторую точки данной тройки, будет иметь вид [13]:

$$r_{trian} = \frac{|(y_{2(k)} - y_{1(k)}) \cdot x_{3(k)} + (x_{1(k)} - x_{2(k)}) \cdot y_{3(k)} + y_{1(k)} \cdot x_{2(k)} - x_{1(k)} \cdot y_{2(k)}|}{\sqrt{(y_{2(k)} - y_{1(k)})^2 + (x_{1(k)} - x_{2(k)})^2}}. \quad (13)$$

Третья точка тройки выбирается так, чтобы длина перпендикуляра  $r_{trian}$  из выражения (13) была не меньше наперед заданной константы:

$$r_{trian} \geq h_{trian}. \quad (14)$$

При этом константа  $h_{trian}$  рассчитывается как  $k_{\Delta 12}$  расстояния между 1-й и 2-й точками «тройки»:

$$h_{trian} = k_{\Delta 12} \sqrt{(x_{2(k)} - x_{1(k)})^2 + (y_{2(k)} - y_{1(k)})^2} \quad (15)$$

Предположение об ограниченности количества ложных измерений (или измерений с аномально большими отклонениями) реализуется следующим образом:  $(i+1)$ -е ( $i=1,2$ ) измерение тройки не используется более трех раз при одном и том же  $i$ -ом измерении. Например,  $k$ -е измерение будет использовано в переборе как третье измерение тройки три раза при использовании  $j$ -го измерения в качестве второго измерения тройки. А  $j$ -е измерение будет использовано в переборе (как второе измерение тройки) три раза относительно  $i$ -го, используемого в переборе как первое измерение тройки. Это сделано исходя из предположения, что если отождествление не осуществляется при данной тройке, то значит одно, два или даже три рассматриваемые измерения не соответствуют звезде. Реализация такого подхода повышает и надежность вычислительного метода и снижает вычислительные затраты на реализацию надежного вычислительного метода.

Указанным выше образом формируется тройка измерений кадра. В качестве ее параметров, используемых при отождествлении, используются три угла соответствующего треугольника. Данные углы могут быть вычислены следующим образом.

Для определения угла  $\gamma_1$  с вершиной в точке  $A(x_1, y_1)$  между прямыми  $AB$  и  $AC$  составляются два вектора. Это вектор  $\vec{b}$  из точки  $A(x_1, y_1)$  в точку  $C(x_3, y_3)$  и вектор  $\vec{c}$  из точки  $A(x_1, y_1)$  в точку  $B(x_2, y_2)$ .

Синус угла  $\gamma_1$  может быть определён на основе выражения для модуля векторного произведения  $|\vec{b} \times \vec{c}|$  [13]:

$$|\vec{b} \times \vec{c}| = |\vec{b}| |\vec{c}| \cdot \sin \gamma_1. \quad (16)$$

Где  $|\vec{b}| = \sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2}$  – длина вектора  $\vec{b}$ ;

$|\vec{c}| = \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}$  – длина вектора  $\vec{c}$ .

При чем, значение модуля векторного произведения векторов  $|\vec{b} \times \vec{c}|$  определяется соотношением [13]:

$$|\vec{b} \times \vec{c}| = |x_{2(k)}y_{3(k)} - y_{2(k)}x_{3(k)}| \quad (17)$$



Косинус угла  $\gamma_1$  может быть определен из скалярного произведения указанных векторов  $\vec{b}\vec{c}$ , значение которого определяется соотношением [13]:

$$\vec{b}\vec{c} = |\vec{b}| |\vec{c}| \cos \gamma_1, \quad (18)$$

$$\text{где } \vec{b}\vec{c} = x_{2(k)}x_{3(k)} + y_{2(k)}y_{3(k)}.$$

Таким образом, согласно выражениям (16) ÷ (18) синус и косинус угла  $\gamma_1$  может быть найден следующим образом:

$$\sin \gamma_1 = \left( \frac{x_{2(k)}y_{3(k)} - y_{2(k)}x_{3(k)}}{\sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right). \quad (19)$$

$$\cos \gamma_1 = \left( \frac{x_{2(k)}x_{3(k)} + y_{2(k)}y_{3(k)}}{\sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right); \quad (20)$$

При известных синусе и косинусе угла однозначное его нахождение тривиально.

Аналогично выражениям (19) и (20) могут быть найдены и значения синусов и косинусов углов  $\gamma_2$  и  $\gamma_3$  с помощью следующих выражений соответственно:

$$\sin \gamma_2 = \left( \frac{x_{1(k)}y_{3(k)} - y_{1(k)}x_{3(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right); \quad (21)$$

$$\cos \gamma_2 = \left( \frac{x_{1(k)}x_{3(k)} + y_{1(k)}y_{3(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{3(k)}^2 + y_{3(k)}^2}} \right); \quad (22)$$

$$\sin \gamma_3 = \left( \frac{x_{1(k)}y_{2(k)} - y_{1(k)}x_{2(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2}} \right); \quad (23)$$

$$\cos \gamma_3 = \left( \frac{x_{1(k)}x_{2(k)} + y_{1(k)}y_{2(k)}}{\sqrt{x_{1(k)}^2 + y_{1(k)}^2} \cdot \sqrt{x_{2(k)}^2 + y_{2(k)}^2}} \right). \quad (24)$$

**Перебор формуляров каталога множества  $\Omega_{star100}$  как элементов троек первичного отождествления со стороны каталога.** Для каждой сформированной тройки первичного отождествления со стороны кадра организовывается перебор троек первичного отождествления со стороны каталога. В качестве формуляров (точек) троек используются элементы ранее введенного множества  $\Omega_{star100}$  формуляров каталога как троек первичного отождествления со стороны каталога. Никаких требований к звездам, входящим в тройки, не предъявляется кроме того, что в тройку должно войти три разные звезды из множества  $\Omega_{star100}$ .

Как и тройка измерений кадра, тройка звезд

каталога характеризуется значениями углов соответствующих вершин треугольника. Координаты положения звезд каталога представлены в сферической системе координат, а именно во второй экваториальной системе координат [10, 11].

Согласно [11] СК ПЗС-кадра параллельна плоскости идеальной астрофотографии. Поэтому можно использовать плоскость идеальной астрофотографии для расчета углов вершин тройки первичного отождествления со стороны каталога. Для этого определяются тангенциальные координаты звезд используемого каталога в плоскости идеальной астрофотографии с заданными экваториальными координатами ( $\alpha_0, \delta_0$ ) оптического центра [11], согласно выражениям:

$$\xi_{j(k)} = \frac{\cos \delta_{j(k)} \cdot \sin(\alpha_{j(k)} - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta_{j(k)} \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta_{j(k)}}; \quad (25)$$

$$\eta_{j(k)} = \frac{\cos \delta_0 \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0)}{\cos \delta_0 \cdot \cos \delta_{j(k)} \cdot \cos(\alpha_{j(k)} - \alpha_0) + \sin \delta_0 \cdot \sin \delta_{j(k)}}. \quad (26)$$

где  $\alpha_{j(k)}, \delta_{j(k)}$  – угловые координаты  $j(k)$ -го объекта, содержащиеся в используемом звездном каталоге.

На основе полученных тангенциальных (идеальных) координат по аналогии с выражениями (19) ÷ (24) определяются углы очередного треугольника, соответствующего тройке первичного отождествления со стороны каталога.

**Сопоставление троек первичного отождествления со стороны кадра и со стороны каталога.** Прежде всего, две исследуемые тройки первичного отождествления проверяются на идентичность углов (каждый с каждым) соответствующих им треугольников. Звезды двух (кадра и каталога) троек считаются предварительно тождественными, если отклонения в значениях соответствующих углов в этих треугольниках не превышают наперед заданной константы  $\Delta\gamma$ :

$$|\gamma_{1fr} - \gamma_{1cat}| < \Delta\gamma; \quad (27)$$

$$|\gamma_{2fr} - \gamma_{2cat}| < \Delta\gamma; \quad (28)$$

$$|\gamma_{3fr} - \gamma_{3cat}| < \Delta\gamma. \quad (29)$$

где  $\gamma_{i fr}, \gamma_{i cat}$  – углы треугольников, соответствующих тройке первичного отождествления со стороны кадра и каталога соответственно;

$\Delta\gamma$  – предельно допустимое значение отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления.

Константа  $\Delta\gamma$  определяет вычислительные затраты метода аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью

их параметров. Чем больше ее значение, тем большее количество троек измерений могут рассматриваться в качестве треугольников первичного отождествления, тем для большего количества наборов значений вычисляются линейные постоянные пластинок и проводятся все остальные операции проверки истинности очередной гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога, соответствующей рассматриваемым тройкам первичного отождествления. Детальные исследования проводились в интересах обсерватории ISON-NM [14]. Обсерватория находится на горе Джой (Мейхилл), Нью-Мексико, США и использует 40-см телескоп САНТЕЛ-400АН и ПЗС-матрицу FLI ML09000-65 (3056×3056 пикселей, размер пикселя 12 мкм). Всего было использовано 19 серий по 4 кадра каждая. Время экспозиции составляло 150 с. Кадры были получены в период с 04.03.2014 по 30.03.14. Для рассмотренной в работе обсерватории ISON-NM разница во времени счета программы, реализующей предложенный в статье метод, при  $\Delta\gamma = 1^0$  и  $\Delta\gamma = 7^0$  составляет в зависимости от рассматриваемого кадра от 10 до 100 раз.

На основании пар троек, признанных предварительно тождественными, производится расчет линейных постоянных пластинки согласно выражений (1), (2) [10, 11]. В дальнейшем, по линейным постоянным пластинки определяются координаты звезд из множества  $\Omega_{star\ 200}$  формуляров каталога в СК ПЗС-кадра.

Следующим шагом с использованием венгерского метода отождествляются [3] элементы множества измерений кадра  $\Omega_{bl100}$  и множества формуляров каталога  $\Omega_{star\ 200}$ . При отождествлении пара считается допустимой, если расстояние между ее элементами в СК ПЗС-кадра не превышает наперед заданной константы  $\Delta r_{ident}$ .

Гипотеза о параметрах отождествления кадра и каталога, соответствующая рассматриваемым тройкам первичного отождествления (со стороны каталога и кадра) признается истинной, если в процессе отождествления множеств  $\Omega_{bl100}$  и  $\Omega_{star\ 200}$  часть сформированных допустимых пар превышает наперед заданную константу  $V_{min\ ident}$ . Константа  $V_{min\ ident}$  представляет собой минимальное допустимое отношение количества допустимых пар к размеру множества  $\Omega_{bl100}$ . Опыт практического использования вычислительного метода, говорит о том, что указанное отношение в среднем случае для истинной гипотезы о параметрах отождествления составляет  $0.8 \div 0.9$ .

При нахождении гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога, признанной истинной, дальнейшие переборы приостанавливаются. Параметры отождествления, найденные в рамках гипотезы признанной истинной,

считаются искомыми параметрами метода аварийного отождествления. В дальнейшем они используются и уточняются.

### Вычислительный метод формирования троек первичного отождествления.

1. Для множества измерений кадра при формировании троек первичного отождествления производится следующая последовательность операций.

1.1. Формирование множества  $\Omega_{bl50}$  самых ярких измерений кадра состоящее из  $N_{bl50}$  претендентов при выборе троек первичного отождествления. С целью обеспечения устойчивости результатов отождествления, кадр делится на  $M_{reg} \times M_{reg}$  ( $M_{reg}^2$ ) частей. Заданное количество измерений кадра  $N_{bl50}$  делится на количество фрагментов кадра, и в каждом таком фрагменте отбираются  $N_{bl50}/M_{reg}^2$ , самых ярких измерений кадра.

1.2. Формирование дополнительного множества  $\Omega_{bl100}$  самых ярких измерений кадра, состоящее из  $N_{bl100}$  элементов, равномерно распределенных на кадре (по аналогии с п. 1.1). Множество измерений  $\Omega_{bl100}$  используется для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии троек кадра и каталога).

2. Для множества формуляров каталога при формировании троек первичного отождествления производится следующая последовательность операций.

2.1. Формирование множества  $\Omega_{star100}$  формуляров каталога с учетом равномерного распределения формуляров звезд на исследуемом участке звездного неба.

2.2. Формирование дополнительного множества  $\Omega_{star\ 200}$  формуляров каталога состоящее из  $N_{st200}$  элементов (с учетом равномерного распределения используемых формуляров звезд на исследуемом участке звездного неба.), которое используется для подтверждения гипотез первичного отождествления (формирования веса очередной гипотезы о соответствии тройки кадра и каталога).

3. Перебор и подтверждение гипотез первичного отождествления.

3.1 Перебор измерений множества  $\Omega_{bl50}$  как элементов троек первичного отождествления. Измерения, составляющие тройки первичного отождествления должны удовлетворять условиям (8), (9), (14).

3.2 Перебор множества  $\Omega_{star100}$  формуляров каталога как элементов троек первичного отождествления со стороны каталога.

3.3. Сопоставление троек первичного отождествления со стороны измерений кадра и со стороны формуляров каталога на основании

соответствующих углов треугольников, значения которых вычислены согласно выражений (19)÷(24).

3.4. Подтверждение гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога, которая соответствует рассматриваемым тройкам первичного отождествления (со стороны каталога и кадра). Гипотеза признается истинной, если в процессе отождествления множеств  $\Omega_{bl100}$  и  $\Omega_{star200}$  часть сформированных допустимых пар превышает наперед заданную константу  $v_{min\ ident}$ . При подтверждении гипотезы отождествления дальнейший перебор прекращается.

**Константы вычислительного метода.** При проведении исследований предполагались следующие значения констант вычислительного метода. Количество измерений кадра (претендентов) на роль элементов троек (вершин треугольников) первичного отождествления  $N_{bl50} = 50$ . Количество элементов множества  $\Omega_{bl100}$  измерений кадра, используемых для подтверждения гипотез первичного отождествления  $N_{bl100} = 100$ . Соотношение количества элементов множеств измерений кадра  $\Omega_{bl100}$  и  $\Omega_{bl50}$  предполагалось равным  $k_{bl\ obj} = N_{bl100} / N_{bl50} = 2$ . Количество фрагментов, на которое делится кадр  $M_{reg} = 4$ . Количество звезд (претендентов) на роль элементов троек (вершин треугольников) первичного отождествления со стороны астрометрического каталога  $N_{star100} = 100$ . Количество элементов множества звезд  $\Omega_{star200}$ , используемых для подтверждения гипотез первичного отождествления  $N_{star200} = 200$  со стороны астрометрического каталога. Соотношение количества элементов множеств  $\Omega_{star200}$  и  $\Omega_{star100}$  предполагалось равным  $k_{star} = N_{star200} / N_{star100} = 2$ . Предельно допустимое минимальное расстояние между второй и первой точками тройки первичного отождествления, выраженное в угловых размерах кадра  $k_h = 0.1$ . При условии прямоугольного (не квадратного) кадра для определения минимального расстояния между второй и первой точками тройки значение  $k_h$  умножается на среднее значение размера кадра по обоим координатам. Минимальная длина  $k_{\Delta 12} = 0.3$  перпендикуляра, опущенного от третьей точки тройки первичного отождествления на сторону, проходящую через первую и вторую точки указанной тройки, выраженная в расстояниях между 1-й и 2-й точками тройки.

Предельно допустимое отклонение значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления  $\Delta\gamma = 60'$ . Предельное максимальное значение расстояния между элементами отождествляемой пары, при которой отождествляемая пара считается допустимой  $\Delta r_{ident} = 10$  пикселей. Предельное

минимальное отношение количества допустимых пар к размеру множества  $\Omega_{bl100}$  составляет  $v_{min\ ident} = 0.7$

**Определение предельно допустимого отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления  $\Delta\gamma$  методом статистического моделирования.**

Ошибки определения значений углов треугольников первичного отождествления определяются ошибками оценки координат положения звезд, используемых в качестве точек-вершин данных треугольников.

Значение среднеквадратических отклонений (СКО) позиционных измерений как правило известны для заданной совокупности условий наблюдения и используемых оборудования и программного обеспечения. Так например, для метода оценки положения объекта на ПЗС кадре, изложенного в работе [7], указанное СКО составляет  $1/4$  пикселя.

Два указанных утверждения позволяют использовать метод статистического моделирования [15, 16, 17] для определения такой константы вычислительного метода как предельно допустимое отклонение  $\Delta\gamma$  значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления.

При использовании метода статистического моделирования моделируются переменные исследуемой функции (координаты вершин треугольника первичного отождествления) согласно заданным законам распределения (используется нормальное распределение ошибок с нулевым средним и заданной СКО), а значения функции (углы треугольника) вычисляются согласно её определению. Далее вычисляются необходимые статистические характеристики значений функции [18].

В работе для проведения статистического моделирования при моделировании измерений, используемых как вершины треугольников первичного отождествления, применялись метод нормальной аппроксимации [18] и метод Ziggurat [19], генерирующие случайные величины  $N_x(0, 1)$ , распределенные по нормальному закону с нулевым средним и единичной дисперсией. Для моделирования случайной величины, распределенной по нормальному закону  $N_x(m, \sigma^2)$  с математическим ожиданием  $m$  и среднеквадратическим отклонением  $\sigma$ , указанный выше результат моделирования случайной величины умножается на значение среднеквадратического отклонения  $\sigma$ , а затем к нему прибавляется значение математического ожидания  $m$ :

$$N_x(m, \sigma^2) = \sigma \cdot N_x(0, 1) + m. \quad (30)$$

После моделирования координат вершин треугольников первичного отождествления

определяются значения их углов, согласно выражений (19)÷(24). В качестве предельно допустимого отклонения значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления использовался квантиль на уровне 0.99 модуля ошибки определения значения угла. Выбор такой статистической характеристики случайной величины значения угла треугольника первичного отождествления в качестве предельно допустимого отклонения его значений обосновано предположением, что в качестве точек треугольников первичного отождествления не могут быть использованы измерения с аномально большими отклонениями.

Для моделирования использовались несколько модельных треугольников, все вершины которых отображены на рис. 2. В качестве основания всегда использовались точки, лежащие на оси абсцисс. При этом длина основания составляла 200, 600 и 1000 пикселей. Возможной третьей вершине треугольника соответствуют точки, лежащие на рис. 2 вне оси абсцисс. Возможная длина высоты, соответствующей третьей вершине соответствовала значению 100, 300, 500, 1000 пикселей. Таким образом, основаниями исследуемых треугольников являлись отрезки:  $C_1B_1$ ,  $C_2B_2$ ,  $C_3B_3$ . В качестве третьих точек (вершин) треугольников использовались точки  $A_1, A_2, A_3, A_4, D_1, D_2, D_3, D_4$ . Всего в исследовании были использованы 24 треугольника:  $C_1A_1B_1, C_1A_2B_1, C_1A_3B_1, C_1A_4B_1, C_1D_1B_1, C_1D_2B_1, C_1D_3B_1, C_1D_4B_1, C_2A_1B_2, C_2A_2B_2, C_2A_3B_2, C_2A_4B_2, C_2D_1B_2, C_2D_2B_2, C_2D_3B_2, C_2D_4B_2, C_3A_1B_3, C_3A_2B_3, C_3A_3B_3, C_3A_4B_3, C_3D_1B_3, C_3D_2B_3, C_3D_3B_3, C_3D_4B_3$ .

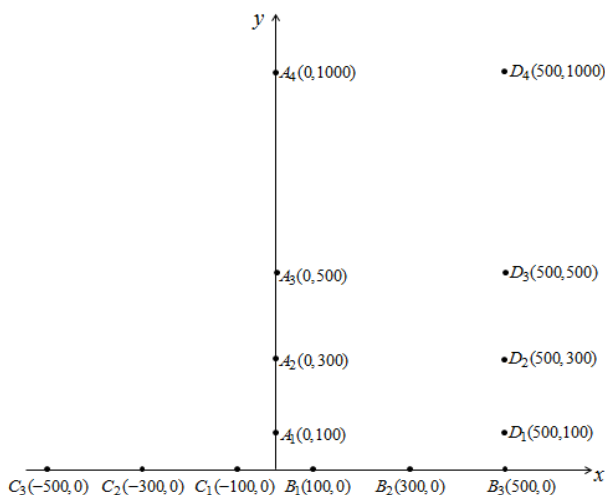


Рис. 2 – Модельные треугольники первичного отождествления

Значения квантилей на уровне 0.99 модуля ошибки определения значения угла, полученные в

результате статистического моделирования, приведены в таблице 1. Анализ указанных данных свидетельствует об обоснованности выбранной константы вычислительного метода  $\Delta\gamma = 60'$ .

Таблица 1 – Значения квантилей на уровне 0.99 модуля ошибки определения значения угла

№	Треугольник	Длина основания, пиксели	Длина высоты, пиксели	Квантили ошибок определения углов треугольника, угловые минуты		
				$\Delta\gamma_1$	$\Delta\gamma_2$	$\Delta\gamma_3$
1.	$C_1A_1B_1$	200	100	35.04	34.74	31.62
2.	$C_1A_2B_1$	200	300	25.50	35.16	23.88
3.	$C_1A_3B_1$	200	500	24.30	34.74	23.40
4.	$C_1A_4B_1$	200	1000	23.76	35.34	23.16
5.	$C_1D_1B_1$	200	100	23.64	34.68	24.18
6.	$C_1D_2B_1$	200	300	23.70	34.98	23.82
7.	$C_1D_3B_1$	200	500	23.58	34.98	23.70
8.	$C_1D_4B_1$	200	1000	23.64	34.92	23.28
9.	$C_2A_1B_2$	600	100	25.56	11.64	23.94
10.	$C_2A_2B_2$	600	300	11.58	11.70	10.56
11.	$C_2A_3B_2$	600	500	9.48	11.70	8.76
12.	$C_2A_4B_2$	600	1000	8.34	11.64	7.98
13.	$C_2D_1B_2$	600	100	8.70	11.64	9.42
14.	$C_2D_2B_2$	600	300	8.64	11.64	8.94
15.	$C_2D_3B_2$	600	500	8.52	11.70	8.46
16.	$C_2D_4B_2$	600	1000	8.16	11.64	8.04
17.	$C_3A_1B_3$	1000	100	24.35	7.02	23.52
18.	$C_3A_2B_3$	1000	300	9.54	6.96	8.76
19.	$C_3A_3B_3$	1000	500	7.02	6.96	6.36
20.	$C_3A_4B_3$	1000	1000	5.46	6.96	5.04
21.	$C_3D_1B_3$	1000	100	6.30	6.96	6.78
22.	$C_3D_2B_3$	1000	300	5.94	6.96	6.18
23.	$C_3D_3B_3$	1000	500	5.70	7.02	5.70
24.	$C_3D_4B_3$	1000	1000	5.22	7.02	5.04

### Выводы

В статье разработан метод аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров. Разработанный вычислительный метод предназначен для определения начального приближения параметров отождествления формуляров звездного каталога и измерений кадра с существенной неопределенностью их параметров, связанную с большими ошибками в задании масштаба изображения (фокусного расстояния используемого телескопа) и координат наведения телескопа. Метод включает формирование множества  $\Omega_{bl50}$  самых ярких измерений кадра и множества  $\Omega_{star100}$  формуляров каталога с учетом их равномерного распределения на исследуемом участке звездного неба; формирование дополнительных множеств  $\Omega_{bl100}$  измерений кадра и  $\Omega_{star200}$  формуляров каталога для подтверждения гипотез отождествления; перебор измерений множеств  $\Omega_{bl50}$  и  $\Omega_{star100}$  как элементов троек первичного отождествления от кадра и каталога; сопоставление троек первичного отождествления от кадра и каталога на основании соответствующих значений углов

треугольников, вычисленных согласно выражениям  $(19) \div (24)$ ; подтверждение гипотезы о параметрах отождествления кадра и каталога.

В статье с использованием метода статистического моделирования определено предельно допустимое отклонение значений соответствующих углов треугольников (со стороны кадра и каталога) первичного отождествления  $\Delta\gamma$ . Анализ указанных данных свидетельствует об обоснованности выбранной константы вычислительного метода  $\Delta\gamma = 60'$ .

Вычислительный метод аварийного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров апробирован в программном обеспечении автоматического поиска астероидов и комет на серии ПЗС-кадров CoLiTec [7, 8]. Всего с помощью программы CoLiTec открыто 4 кометы, более 1560 астероидов, среди которых 4 объекта сближающихся с Землей, 21 троянский астероид Юпитера и 1 кентавр. Результаты ПО CoLiTec подтверждают достоверность и надежность работы предложенного в статье вычислительного метода.

Дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на оптимизации параметров разработанного метода.

#### Список литературы

1. **Angryk, R. A.** Special Section: Management, Search and Analysis of Solar Astronomy Big Data / **R. A. Angryk, A. Csillaghy, P. C. Martens** // *Astronomy and Computing* – 2015. – Vol. 13. – P. 85-85. – doi:10.1016/j.ascom.2015.11.001.
2. **Singh, N.** Parallel astronomical data processing with Python: Recipes for multicore machines / **N. Singh, L. Browne, R. Butler** // *Astronomy and Computing* – 2013. – Vol. 2. – P. 1-10. – doi:10.1016/j.ascom.2013.04.002.
3. **Дихтяр, Н. Ю.** Метод отождествления астрономических измерений CCD-кадра с формулярами звездного каталога / **Н. Ю. Дихтяр, Я. С. Мовсесян, В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий** // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии: сб. науч. тр. Нац. аэрокосм. ун-та им. Н. Е. Жуковского «Харьк. авиац. ин-т»*. – 2015. – Вып. 67. – С. 197-215.
4. **Hogg, D. W.** Automated Astrometry / **D. W. Hogg, M. Blanton, D. Lang et al.** // *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII* – 2008. – 394. – P. 27-34
5. **Lang, D.** Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images / **D. Lang, D. W. Hogg, K. Mierle et al.** // *Astrometry.net*. – 2010. – 46 p.
6. **Lang, D.** Measuring the undetectable: Proper motions and parallaxes of very faint sources / **D. Lang, D. W. Hogg, S. Jester et al.** // *The Astronomical Journal*. – 2009. – Volume 137, Issue 5. – P. 4400-4411.
7. **Savanevych, V. E.** A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates / **V. E. Savanevych, O. B. Briukhovetskyi, N. S. Sokovikova, M. M. Bezkrivny, I. B. Vavilova, Yu. M. Ivashchenko, L. V. Elenin, S. V. Khlamov, Ia. S. Movsesian, A. M. Dashkova, A. V. Pogorelov** // *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, – 2015. – Т. 451 (3). – С. 3287-3298.
8. **Savanevych, V. E.** Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica / **V. E. Savanevych, A. B. Briukhovetskyi, Yu. N. Ivashchenko, I. B. Vavilova, M. M. Bezkrivny, E. N. Dikov, V. P. Vlasenko, N. S. Sokovikova, Ia. S. Movsesian, N. Yu. Dikhtyar, L. V. Elenin, A. V. Pohorelov, S. V. Khlamov** // *Kinematics and Physics of Celestial Bodies* – 2015. – Т. 31 (6). – P. 302-313
9. **Дихтяр, Н. Ю.** Метод предварительного отождествления измерений цифровых кадров одной серии / **Н. Ю. Дихтяр, Я. С. Мовсесян, В. Е. Саваневич** // *Збірник наукових праць. Вісник НТУ «ХПІ», Серія «Нові рішення в сучасних технологіях»* – 2015. – №62 (1171) – С. 58 - 63.
10. **Дума, Д. П.** Загальна астрометрія. Навчальний посібник / **Д. П. Дума**. – Київ: Наукова думка. – 2007. – 600 с.
11. **Киселев, А. А.** Теоретические основания фотографической астрометрии / **А. А. Киселев**. – М.: Наука. – 1989. – 264 с.
12. **Саваневич, В. Е.** Оценка экваториальных координат астероида по оценкам его координат на ПЗС-кадре / **В. Е. Саваневич, А. Б. Брюховецкий, А. М. Кожухов, Е. Н. Диков** // *Системы обработки информации: Зб. наук. пр.* – Харків: ХУПС. – 2010. – Вип. 6(87). – С. 172 - 179.
13. **Бортаковский, А. С.** Аналитическая геометрия в примерах и задачах: Учеб. Пособие / **А. С. Бортаковский, А. В. Пантелеев**. – М.: Высш. шк. – 2005. – 496 с.
14. **Молотов, И. Е.** Научная сеть оптических инструментов для астрометрических и фотометрических наблюдений. // **И. Е. Молотов, В. М. Агапов, В. В. Куприянов и др.** // *Известия Главной астрономической обсерватории в Пулкове*. – 2009. – № 219, вып. 1. – С. 233-248.
15. **Лемешко, Б. Ю.** Статистический анализ данных, моделирование и исследование вероятностных закономерностей. Компьютерный подход: монография / **Б. Ю. Лемешко, С. Б. Лемешко, С. Н. Постовалов, Е. В. Чимитова** // Новосибирск: Изд-во НГТУ. – 2011. – 888 с.
16. **Воробьев, С. Н.** Статистическое моделирование информационных систем / **С. Н. Воробьев, Н. В. Гирина, И. В. Лазарев, Л. А. Осипов** // Изд-во ГУАП. – 2010. – 151 с.
17. **Kroese, D. P.** Statistical Modeling and Computation / **D. P. Kroese, J. C. S. Chan** // Springer. – 2014. – doi:10.1007/978-1-4614-8775-3.
18. **Кобзарь, А. И.** Прикладная математическая статистика. Для инженеров и научных работников / **А. И. Кобзарь**. – М.: ФИЗМАТЛИТ. – 2006. – 816 с.
19. **Marsaglia, G.** Ziggurat Method for Generating Random Variables / **G. Marsaglia, W. W. Tsang** // *Journal of Statistical Software*. – 2000. – Т. 5 (8). – P. 1-7.

#### Bibliography (transliterated)

1. **Angryk, R. A., Csillaghy, A., Martens, P. C.** Special Section: Management, Search and Analysis of Solar Astronomy Big Data. *Astronomy and Computing*, 2015, **13**, 85-85, doi:10.1016/j.ascom.2015.11.001.
2. **Singh, N., Browne, L., Butler, R.** Parallel astronomical data processing with Python: Recipes for multicore machines, *Astronomy and Computing*, 2013, **2**, 1-10, doi:10.1016/j.ascom.2013.04.002.

3. **Dikhtyar, N. Yu., Movsesyan, Ia. S., Savanevich, V. E., Bryukhovetskiy, A. B.** Metod otzhdstvleniya astronomicheskikh izmereniy CCD-kadra s formulyarami zvezdnogo kataloga [The method of identification of astronomical measurements CCD-frame to form the star catalog]. *Otkrytye informatsionnye i komp'yuternye integrirovannye tekhnologii: sb. nauch. tr. Nats. aerokosm. un-ta im. N. E. Zhukovskogo «Khar'k. aviats. in-t» [Public information and computer integrated technologies: Sat. scientific. tr. Nat. aerokosm. Zap them. NE Zhukovsky "Kharkiv. aviation. Inst "]*, 2015, **67**, 197-215.
4. **Hogg, D. W., Blanton, M., Lang, D. et al.** Automated Astrometry. *Astronomical Data Analysis Software and Systems XVII*, 2008, **394**, 27-34
5. **Lang, D., Hogg, D. W., Mierle, K. et al.** Blind astrometric calibration of arbitrary astronomical images. *Astrometry.net*, 2010, 46 p.
6. **Lang, D., Hogg, D. W., Jester, S. et al.** Measuring the undetectable: Proper motions and parallaxes of very faint sources. *The Astronomical Journal*, 2009, **5**(137), 4400-4411.
7. **Savanevych, V. E Briukhovetskiy, O. B. Sokovikova et al.** A new method based on the subpixel Gaussian model for accurate estimation of asteroid coordinates. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 2015, **451**(3), 3287-3298.
8. **Savanevych, V. E., Briukhovetskiy, A. B., Ivashchenko, Yu. N. et al.** Comparative analysis of the positional accuracy of CCD measurements of small bodies in the solar system software CoLiTec and Astrometrica. *Kinematics and Physics of Celestial Bodies*, 2015, **31** (6), 302-313.
9. **Dikhtyar, M., Movsesian, Ia., Savanevych, V.** Method for identification a preliminary measurements of digital frames of the one series. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015, **62** (1171), 58- 63.
10. **Duma, D. P.** Zagal'na astrometriya. Navchal'niy posibnik [Total astrometry. Tutorial]. Kiiv: Naukova dumka, 2007, 600 p.
11. **Kiselev, A. A.** Teoreticheskie osnovaniya fotograficheskoy astrometrii [The theoretical foundation of photographic astrometry]. Moskva: Nauka, 1989, 264 p.
12. **Savanevich, V. E., Bryukhovetskiy, A. B., Kozhukhov, A. M., Dikov, E. N.** Otsenka ekvatorial'nykh koordinat asteroida po otsenkam ego koordinat na PZS-kadre [Evaluation of the equatorial coordinates of asteroid on its estimates of coordinates on the CCD frame] *Sistemi obrobki informatsii: Zb. nauk. pr. [Sistemi obrobki Informácie]* – Kharkiv: KhUPS, 2010, **6**(87), 172 - 179.
13. **Bortakovskiy, A. S., Pantelev, A. V.** Analiticheskaya geometriya v primerakh i zadachakh: Ucheb. Posobie. [Analytic geometry in examples and problems: Textbook. benefit]. Moskva: Vyssh. shk., 2005, 496 p.
14. **Molotov, I. E., Agapov, V. M., Kupriyanov, V. V. et al.** Nauchnaya set' opticheskikh instrumentov dlya astrometricheskikh i fotometricheskikh nablyudeniy [The scientific network of optical instruments for astrometric and photometric observations]. *Izvestiya Glavnoy astronomicheskoy observatorii v Pulkove [Proceedings of the Main Astronomical Observatory at Pulkovo]*, 2009, **1**(219), 233-248.
15. **Lemeshko, B. Yu., Lemeshko, S. B., Postovalov, S. N., Chimitova, E. V.** Statisticheskii analiz dannykh, modelirovanie i issledovanie veroyatnostnykh zakonemernostey. Komp'yuternyy podkhod: monografiya [Statistical data analysis, modeling and study of the laws of probability. Computer approach: Monograph]. Novosibirsk: Izd-vo NGTU, 2011, 888 p.
16. **Vorob'yev, S. N., Girina, N. V., Lazarev, I. V., Osipov, L. A.** Statisticheskoe modelirovanie informatsionnykh sistem [Statistical modeling of information systems] Izd-vo GUAP, 2010, 151 p.
17. **Kroese, D. P., Chan, J. C. C.** Statistical Modeling and Computation. Springer, 2014, doi:10.1007/978-1-4614-8775-3.
18. **Kobzar', A. I.** Prikladnaya matematicheskaya statistika. Dlya inzhenerov i nauchnykh rabotnikov [Applied mathematical statistics. For engineers and scientists]. Moskva: FIZMATLIT, 2006, 816 p.
19. **Marsaglia, G., Tsang, W. W.** Ziggurat Method for Generating Random Variables. *Journal of Statistical Software*, 2000, **5**(8), 1-7.

## Сведения об авторах (About authors)

**Диктяр Николай Юрьевич** – аспирант кафедры Электронных вычислительных машин, Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; e-mail: mdihtyar@gmail.com

**Dikhtyar Mykola** – graduate student of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE, e-mail: mdihtyar@gmail.com

**Мовсесян Яна Самвеловна** – аспирант кафедры Электронных вычислительных машин, Харьковского национального университета радиоэлектроники, г. Харьков, Украина; e-mail: movsesian.iana@gmail.com

**Movsesian Iana** – graduate student of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE, e-mail: e-mail: movsesian.iana@gmail.com

**Саваневич Вадим Евгеньевич** – д.т.н., профессор, кафедра информационных управляющих систем и технологий, Ужгородский национальный университет, Ужгород; e-mail: vadyam@savanevych.com

**Savanevych Vadym** – Doctor of Technical Sciences Professor, Department of information management systems and technologies, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine; e-mail: vadyam@savanevych.com

**Хламовец Сергей Васильевич** – ученая степень, ученое звание, отдел/кафедра, место работы, город; e-mail: movsesian.iana@gmail.com

**Khlamov Sergii** – graduate student of Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv, UKRAINE, e-mail: e-mail: movsesian.iana@gmail.com

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Дихтяр Н. Ю.** Метод аварійного отождествления цифровых кадров с существенной неопределенностью их параметров / **Н. Ю. Дихтяр, Я. С. Мовсесян, В. Е. Саваневич, С.В. Хламов** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 128-139. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.19.

*Please cite this article as:*

**Dikhtyar, M. Movsesian, Ia. Savanevych, V. Khlamov, S.** The method of emergency identification of the digital frame with substantial uncertainty of their parameters the method of emergency identification of the digital frame with substantial uncertainty of their parameters. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 128-139. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.19.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Діхтяр, М. Ю.** Метод аварійного ототожнення цифрових кадрів з істотною невизначеністю їх параметрів / **М. Ю. Діхтяр, Я. С. Мовсесян, В. Є. Саваневич, С. В. Хламов** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 128-139. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.19.

**АНОТАЦІЯ** У статті розроблено обчислювальний метод аварійного ототожнення цифрових кадрів з істотною невизначеністю їх параметрів. Розроблений обчислювальний метод призначений для визначення початкового наближення параметрів ототожнення формулярів зоряного каталогу і вимірювань кадру з істотною невизначеністю їх параметрів, яка пов'язана з великими помилками в завданні масштабу зображення (фокусної відстані використовуваного телескопа) і координат наведення телескопа .. Розроблений обчислювальний метод апробований в програмному забезпеченні автоматичного пошуку астероїдів і комет на серії ПЗЗ-кадрів CoLiTec. Результати ПО CoLiTec підтверджують достовірність і надійність роботи запропонованого в статті обчислювального методу.

**Ключові слова:** цифровий кадр, аварійне ототожнення, постійні пластинки, первинне ототожнення, вимір кадру, формуляр каталогу.

*Поступила (received) 18.05.2016*

УДК 81.95.53

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.20

## ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ДЕЯТЕЛЬНОСТИ ОПЕРАТОРОВ В СИСТЕМАХ ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ДОСТУПА К РЕСУРСАМ КОМПЬЮТЕРНЫХ СЕТЕЙ

А. С. КРИВОДУБ\*

*Кафедра компьютерных наук, Сумский государственный университет, г. Сумы, УКРАИНА**\*email: annakrivodub@gmail.com*

**АННОТАЦИЯ.** Рассматриваются телекоммуникационные системы, специализирующиеся на предоставлении ИТ-услуг населению и организациям. Описывается деятельность операторов технической поддержки, направленная на устранение возможных проблемных ситуаций. Обоснована целесообразность использования для формализации деятельности функционально-структурной теории эрготехнических систем профессора Анатолия Ильича Губинского. Приведены примеры формализованных описаний деятельности операторов по устранению некоторых проблем предоставления ИТ-услуг. Приведен пример расчета вероятности своевременного и безошибочного выполнения алгоритма деятельности по устранению одной из возможных проблемных ситуаций.

**Ключевые слова:** Компьютерная сеть, эргономика, человек-оператор, алгоритм деятельности, надежность, безошибочность, своевременность, рабочее место, условия труда.

## THE APPROACH TO THE EVALUATION OF OPTIONS OF THE ACTIVITIES OF THE OPERATORS TECHNICAL SUPPORT INFORMATION SERVICES TELECOMMUNICATION SYSTEMS

А. KRIVODUB\*

*Department of computer science, Sumy State University, Sumy, UKRAINE*

**ABSTRACT.** The purpose of the article is the development of formalized models and algorithms for estimating the activity of operators working in telecommunication systems, specializing in providing IT services to the population and companies. The generalized structural method of the functional and structural theory of ergonomic and technical systems of professor A. I. Gubinsky is chosen as a basic solving method. The method is based on the use of standard functional units to describe the algorithms of activity. These units are presented in the form of functional networks. A number of formalized descriptions of algorithms of the operators' activities for elimination of some problems of IT services providing is developed. The calculations of probability of timely and faultless execution of the activities algorithm for the elimination of one of possible problem situations are performed. The technology of the account at an assessment of reliability of activities for elimination of problems is shown. This technology considers such parameters as activity algorithms, operators' qualification and working conditions at the workplaces. The advantage of the method consists in a possibility of receiving the unambiguous computer focused models and numerical estimation of various options of operators' activities, who have different qualification. Using the proposed approach allows to develop the actions related to the search of ergonomic reserves of systems efficiency increase of providing access to resources of computer networks. The developed models can be the basis for decision support system for the optimization of operators' activities. The difficulties of the method include the complexity of formation of initial data for the calculation and the necessity of supporting special statistical databases, also the need of systematic assessment of working conditions at the workplace of people working in the system.

**Keywords:** Computer network, ergonomics, human operator, activity algorithm, reliability, faultlessness, timeliness, workplace, working conditions.

### Введение

Прогресс и высокая конкуренция в сфере предоставления юридическим и физическим лицам информационно-компьютерных услуг в локальных и глобальных сетях обостряют проблему качества и оперативности обслуживания. Огромные резервы эффективности находятся в области использования современного арсенала методов эргономики [1-6].

### Цель работы

На основе анализа реальных систем предоставления доступа к ресурсам компьютерных сетей:

- исследовать возможные варианты организации деятельности операторов, обслуживающих заявки, связанные с устранением нарушений в качестве предоставления услуг и формированием новых информационных сервисов,
- обосновать метод описания и оценивания вариантов структур деятельности операторов,



- продемонстрировать возможности применения разработанных моделей в практике систем предоставления доступа к ресурсам компьютерных сетей.

### Изложение основного материала

#### 1. Исходные предпосылки.

Проведенные исследования систем предоставления услуг по доступу к Интернет, а также различных телекоммуникационных систем (PortaOne, NetCracker, Efsol [7 - 9]) позволили выявить:

- алгоритмический характер деятельности операторов;
- наличие некоторого множества альтернативных алгоритмов выполнения заявок;
- существенное влияние квалификации и условий труда операторов на качество их деятельности.

При этом, как правило, отсутствует система "подсказки оператору" о целесообразных стратегиях поведения, основанная на просчетах времени и безошибочности различных вариантов организации деятельности.

На современных фирмах, как правило, ведется учет времени и безошибочности выполнения операторами отдельных действий и операций.

Если проанализировать возможные структуры деятельности, описать их и использовать имеющиеся статистические данные о качестве, можно оценить время и безошибочность реализации поступающих заявок.

#### 2. Моделирование деятельности операторов

**2.1. Выбор математического аппарата для моделирования.** Наиболее удобным способом моделирования алгоритмизированной деятельности является функционально-структурная теория (ФСТ) эрготехнических систем (ЭТС) проф. А.И. Губинского [10]. Стимулом к использованию метода является наличие моделирующего квалитетического комплекса [11-13].

**2.2. Примеры описания альтернативных вариантов реализации функционального элемента обработки заявок клиентов.**

##### 2.2.1. Содержательный анализ деятельности.

Рассмотрим как организована деятельность оператора, который работает в системе предоставления Интернет-услуг населению и реализует заявку "восстановления предоставления услуги".

Укрупненно деятельность можно представить состоящей из нескольких групп операций, среди них:

- прием заявки на обслуживание,
- анализ проблемы клиента,
- решение проблемы,
- информирование клиента о результатах выполнения заявки.

##### 2.2.2. Примеры формальных моделей деятельности по устранению проблем.

Содержательный анализ инструктивной подсистемы реальных процессов позволил выявить базовые алгоритмы деятельности, используемые операторами при поступлении заявок на устранение проблем в предоставлении ИТ-услуг, некоторые из них приведены в таблице 1.

Проблема 1 – ограничение доступа к услуге сети Интернет в связи отсутствием уведомления об оплате за услугу.

Проблема 2 – отсутствие доступа к сети Интернет (проблемы с клиентским оборудованием).

Проблема 3 - отсутствие доступа к сети Интернет (проблемы с оборудованием компании).

Проблема 4 - ограничение доступа к услуге цифрового телевидения в связи отсутствием оплаты за услугу.

Содержательное описание отдельных операций, из которых состоят алгоритмы деятельности по устранению проблем приведено в таблице 2.

##### 2.2.3. Пример оценивания надежности реализации алгоритма деятельности (для проблемы 4).

Рассмотрим пример процедуры оценивания. Алгоритм деятельности считаем заданным (табл. 1. столбец 4). В качестве влияющих факторов рассмотрим квалификацию операторов и условия труда на рабочем месте.

##### 2.2.3. Формирование исходных данных для моделирования.

Исходные данные формируются из статистических баз данных системы предоставления доступа к ресурсам компьютерных сетей. Данные необходимые для расчетов, приведены в табл. 3. Здесь:

$V^1$  – вероятность безошибочного выполнения рабочей операции;

$K^{11}$  - вероятность признания правильно выполненных операций правильными;

$K^{00}$  - вероятность обнаружения ошибки при ее наличии;

$M$  - математическое ожидание времени выполнения операции;

$D$  - дисперсия времени выполнения операции.

Поскольку условия труда (шум, вибрация, освещение, сложность заданий, степень загруженности, работа в условиях очереди и др.) существенно влияют на качество деятельности [1-4, 10], используем метод поправочных коэффициентов [10,14,15], позволяющий вычислить прогнозируемое значения надежности и времени выполнения операций для категорий тяжести труда, выше 1 (всего выделяют 6 категорий, чем выше категория, тем хуже условия труда [10]). В таблице 3 в демонстрационных целях показаны значения надежности только для 1, 3 и 6 категорий (соответствующие интегральные балльные оценки тяжести труда - 18,3; 43,3; 60). Для определения этих значений на рабочих местах используем программный комплекс [16].

**2.2.4. Автоматизированное оценивание вариантов деятельности**

Для оценивания вариантов использован программный комплекс [11-13], основанный на технологии выделения типовых функциональных структур и сворачивании функциональной сети.

Видеограмма результатов редукции функциональной сети приведена на рис. 1.

Фрагмент результатов расчета приведен в табл.6.

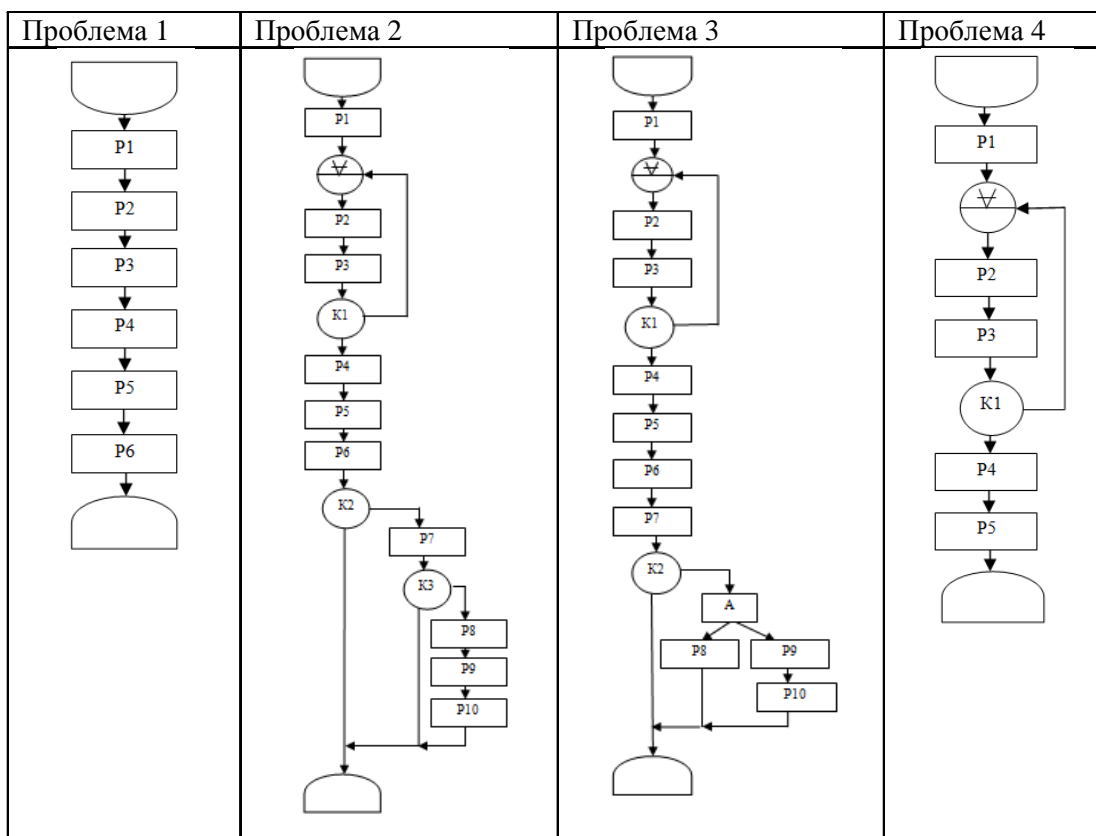
Примеры зависимостей вероятности своевременного и безошибочного выполнения алгоритма деятельности от директивного времени для операторов различной квалификации, работающих в разных условиях труда приведены на рис. 2 - 5.

**Обсуждение результатов**

Разработанный подход позволяет формально описывать алгоритмизированную деятельность и оценивать случайную величину времени и вероятность безошибочного выполнения алгоритмов деятельности операторов в системах предоставления доступа к ресурсам компьютерных сетей.

Достоинство метода состоит в возможности получения однозначных компьютерно-ориентированных моделей и численного оценивания различных вариантов деятельности операторов. К сложностям метода можно отнести трудоемкость формирования исходных данных для расчетов и необходимость ведения специальных статистических баз данных.

Таблица 1 – Примеры формализованного описания алгоритмов деятельности (в терминах [10])



**Выводы**

Эффективность деятельности операторов технической поддержки телекоммуникационных систем существенно зависит от организации деятельности. Оценивание вариантов удобно проводить с помощью аппарата функциональных

структур проф. А.И. Губинского и моделирующего квалиметрического комплекса ЭТС.

Направление дальнейших исследований – «встраивание» моделей алгоритмической деятельности операторов в комплексную модель контакт-центра по обработке заявок, построенную на основе теории систем массового обслуживания.

Таблица 2 – Содержательное описание операций для алгоритмов деятельности операторов по устранению некоторых проблем

Название операции	Описание			
	Проблема 1	Проблема 2	Проблема 3	Проблема 4
P1	Получение заявки об ограничении доступа к сети Интернет	Получение заявки об ограничении доступа к сети Интернет	Получение заявки об ограничении доступа к сети Интернет	Получение заявки об ограничении доступа к услугам цифрового телевидения
P2	Оформление заявки	Оформление заявки	Оформление заявки	Оформление заявки
P3	Анализ проблемы	Анализ проблемы	Анализ проблемы	Анализ проблемы
P4	Поиск в базе данных информации о проплате услуги	Анализ подключения клиента к услугам сети Интернет	Анализ подключения клиента к услугам сети Интернет	Анализ подключения клиента к услугам цифрового телевидения
P5	Подключение доступа к услугам сети Интернет	Информирование клиента о проблемах с абонентским оборудованием	Информирование клиента о проблемах с оборудованием компании	Информирование клиента о необходимости оплаты за услуги компании
P6	Информирование клиента о решении проблемы	Предложение перезапустить ПК	Уточнение дополнительных данных о проблеме	
P7		Предложение перезапустить роутер	Решение проблемы	
P8		В случае нерешения проблемы оператором, информирование клиента в необходимости вызова мастера	Дополнительная операция по устранению неполадок	
P9		Оформление заявки на вызов мастера	В случае не решения проблемы оператором удаленно, вызов мастера по работе с оборудованием	
P10		Информирование клиента о принятой заявке	Информирование клиента о принятой заявке	
K1		Проверка в базе данных информации о клиенте	Проверка в базе данных информации о клиенте	Проверка в базе данных информации о клиенте
K2		Проверка решения проблемы после перезапуска ПК	Контроль работы телекоммуникационной системы	
K3		Проверка решения проблемы после перезапуска роутера		

Таблица 3 – Значения показателей качества выполнения отдельных операций алгоритма деятельности по устранению проблемной ситуации 4 операторами разной квалификации, с учетом возможности различных категорий тяжести условий труда

Операция		Оператор 1 (низкая квалификация)			Оператор 2 (средняя квалификация)			Оператор 3 (высокая квалификация)		
		1 кат.тяж	3 кат.тяж	6 кат.тяж	1 кат.тяж	3 кат.тяж	6 кат.тяж	1 кат.тяж	3 кат.тяж	6 кат.тяж
P1	V	0,94	0,89	0,65	0,95	0,89	0,65	0,96	0,9	0,66
	M, мин	2,2	2,6	5,5	2,1	2,47	5,25	2	2,35	5
	D, мин <sup>2</sup>	0,49	0,52	0,64	0,47	0,52	0,61	0,45	0,5	0,58
P2	V	0,97	0,91	0,67	0,98	0,92	0,67	0,99	0,93	0,68
	M, мин	3,3	3,89	8,25	3,15	3,71	7,87	3	3,5	7,5
	D, мин <sup>2</sup>	0,11	0,12	0,14	0,1	0,11	0,13	0,1	0,11	0,13
P3	V	0,95	0,89	0,66	0,96	0,9	0,66	0,97	0,91	0,67
	M, мин	5,5	6,5	13,75	5,25	6,18	13,1	5	5,9	12,5
	D, мин <sup>2</sup>	0,55	0,62	0,72	0,52	0,59	0,68	0,5	0,56	0,65
P4	V	0,967	0,91	0,67	0,977	0,92	0,67	0,987	0,93	0,68
	M, мин	2,75	3,2	6,87	2,63	3,1	6,6	2,5	2,95	6,25
	D, мин <sup>2</sup>	0,33	0,35	0,4	0,3	0,34	0,39	0,3	0,34	0,39
P5	V	0,96	0,9	0,67	0,97	0,91	0,67	0,98	0,92	0,67
	M, мин	2,2	2,6	5,5	2,1	2,5	5,25	2	2,35	5
	D, мин <sup>2</sup>	0,44	0,48	0,57	0,42	0,49	0,55	0,4	0,43	0,52
K1	K <sup>11</sup>	0,975	0,95	0,9	0,985	0,96	0,91	0,995	0,992	0,99
	K <sup>00</sup>	0,978	0,961	0,95	0,988	0,975	0,96	0,998	0,99	0,975
	M, мин	3,3	3,45	3,7	3,15	3,25	3,5	3	3,2	4
	D, мин <sup>2</sup>	0,22	0,4	0,68	0,21	0,3	0,67	0,2	0,4	0,7

ПРОТОКОЛ РЕДУКЦИИ						
Номер шага редукции	Сворачиваемые ТФЕ	Эквивалентная ТФЕ	Вероятность выполнения эквивалентной операции без ошибки	Мат.ожидание времени выполнения операции эквивалентной операции	Дисперсия времени выполнения эквивалентной операции	Тип сворачиваемой ТФС
1	P1,P2	Pэ1	0,95	3,50	0,55	RR
2	P4,P5	Pэ2	0,97	5,50	0,70	RR
3	P3,K1	Pэ3	1,00	6,21	2,05	RK
4	Pэ1,Pэ3,Pэ2	Pэ4	0,93	15,21	3,30	RR
Шаг редукции:	1 - RR: P1,P2=Pэ1	2 - RR: P4,P5=Pэ2	3 - RK: P3,K1=Pэ3	4 - RR: Pэ1,Pэ3,Pэ2=Pэ4		

Рис. 1 – Пример протокола редукции функциональной сети для алгоритма типа 4 (оператор высокой квалификации, категория тяжести труда -1)

Таблица 5 - Результаты оценки деятельности операторов технической поддержки

Показатель	Директивное время, мин	Оператор 1			Оператор 2			Оператор 3		
		1 кат.тяж.	3 кат.тяж.	6 кат.тяж.	1 кат.тяж.	3 кат.тяж.	6 кат.тяж.	1 кат.тяж.	3 кат.тяж.	6 кат.тяж.
Вероятность безошибочности выполнения алгоритма В		0,872	0,72	0,25	0,9	0,74	0,26	0,93	0,79	0,35
Математическое ожидание времени выполнения алгоритма М(т), мин		20,57	26,2	58,2	19,3	24,5	50,7	15,2	20,6	45,1
Дисперсия времени выполнения алгоритма D(т), мин		10,09	15,1	30,1	8,95	14	29,4	3,3	11,7	20,5
Вероятность своевременного выполнения алгоритма Pсв(То)	15	0,29	0,13	0,08	0,32	0,25	0,11	0,48	0,32	0,07
	21	0,52	0,30	0,11	0,58	0,40	0,16	0,96	0,51	0,12
	25	0,67	0,45	0,14	0,74	0,51	0,19	1,00	0,65	0,16
	29	0,80	0,61	0,17	0,86	0,63	0,23	1,00	0,76	0,22
	32	0,87	0,72	0,19	0,92	0,70	0,26	1,00	0,84	0,26
Вероятность безошибочного и своевременного выполнения алгоритма В*Pсв(То)	15	0,25	0,16	0,02	0,28	0,18	0,03	0,44	0,25	0,03
	21	0,45	0,26	0,03	0,52	0,30	0,04	0,89	0,41	0,05
	25	0,58	0,34	0,03	0,66	0,38	0,05	0,93	0,51	0,07
	29	0,70	0,41	0,04	0,77	0,46	0,06	0,95	0,60	0,09
	32	0,76	0,47	0,05	0,83	0,52	0,07	0,96	0,66	0,10
40	0,85	0,59	0,07	0,89	0,64	0,09	0,99	0,75	0,15	

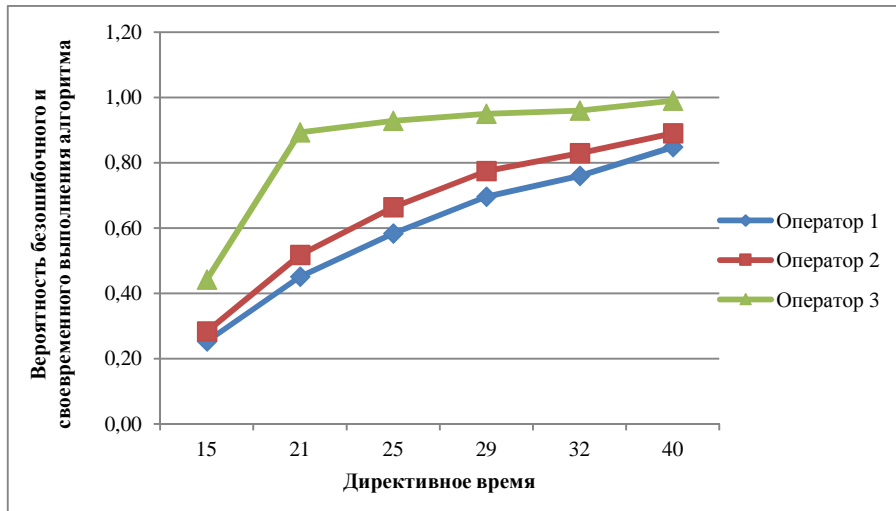


Рис. 2 – Зависимость вероятности своевременного и безошибочного выполнения алгоритма деятельности (решение проблемы 4) от директивного времени (для нормальных условий труда)

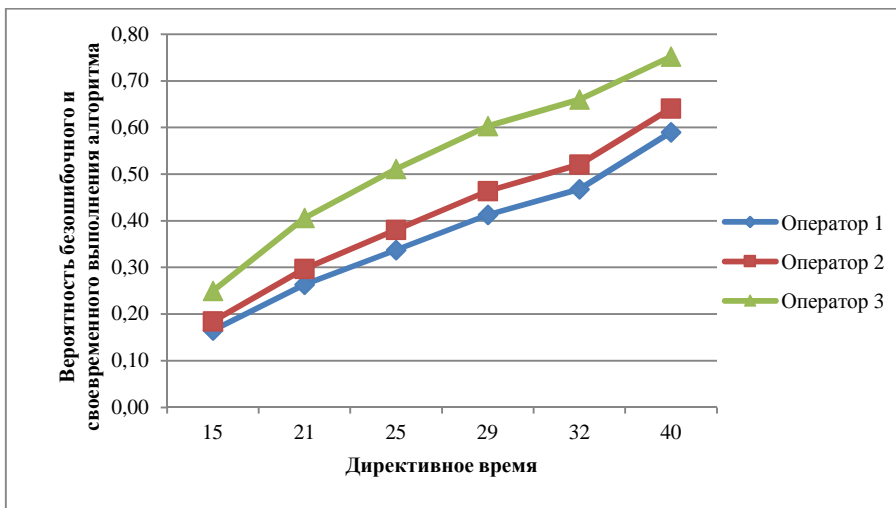


Рис. 3 – Зависимость вероятности своевременного и безошибочного выполнения алгоритма деятельности (решение проблемы 4) от директивного времени (для третьей категории тяжести труда)

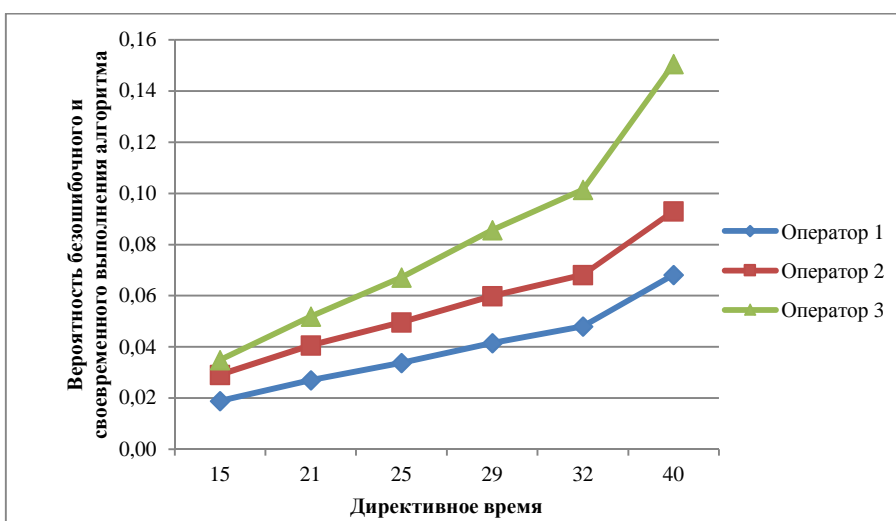


Рис. 4 – Зависимость вероятности своевременного и безошибочного выполнения алгоритма деятельности (решение проблемы 4) от директивного времени (для шестой категории тяжести труда)

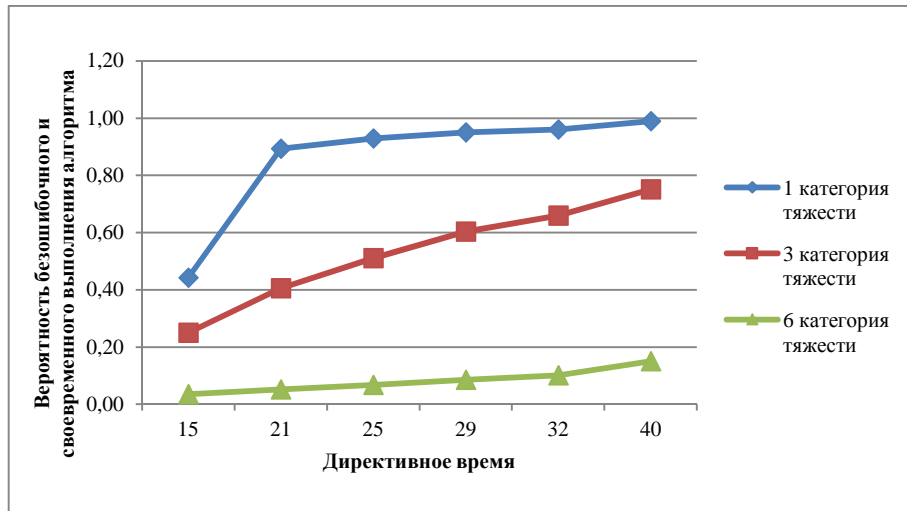


Рис. 5 – Зависимость вероятности своевременного и безошибочного выполнения алгоритма деятельности (решение проблемы 4) от директивного времени при различных условиях труда (для оператора 3 – высокая квалификация)

#### Список литературы

- Rothmorea, P. The implementation of ergonomics advice and the stage of change approach / P. Rothmorea, P. Aylwardb, J. Karnona // *Applied Ergonomics*. – 2015. – № 51. – P. 370-376. – doi:10.1016/j.apergo.2015.06.013.
- Bentley, T. A. The role of organisational support in teleworker wellbeing: A socio-technical systems approach / T. A. Bentley, S. T. T. Teo, L. McLeod, F. Tana, R. Bosua, M. Gloet // *Applied Ergonomics*. – 2016. – № 52. – P. 207-215. – doi:10.1016/j.apergo.2015.07.019.
- Wang, Y. Stress, burnout and job satisfaction: case of police force in China / Y. Wang, L. Zheng, T. Hiu // *Public Pers. Manag.* – 2014. – №43. – P. 325-339. – doi:10.1177/0091026014535179.
- De Felice, F. Methodological Approach for Performing Human Reliability and Error Analysis in Railway Transportation System / F. De Felice, A. Petrillo // *International Journal of Engineering and Technology*. – 2011. – N. 3 (5) – P. 341-353.
- Lyubchak V. Ergonomic support of man-machine interaction. Approach to designing of operators' group activities / V. Lyubchak, E. Lavrov, N. Pasko // *International Journal of Bio-medical Soft Computing and Human Sciences, Japan, Tokyo*. – 2011. – Vol. 17, №2 – P. 53-58.
- Lavrov, E. Organizational Approach to the Ergonomic Examination of E-Learning Modules / E. Lavrov, O. Kuppenko, T. Lavryk, N. Barchenko // *Informatics in education*. – 2013. – Vol. 12, No. 1. – P. 105-123.
- Лавров, Е. А. Подход к оценке вариантов деятельности операторов технической поддержки информационных сервисов телекоммуникационных систем / Е. А. Лавров, А. С. Криводуб // *Доклады БГУИР*. – Минск. – 2015. – №2 (88). – С. 123-126.
- [web] www.portaone.com.
- [web] www.netcracker.com.
- Информационно-управляющие человеко-машинные системы: исследование, проектирование, испытания: Справочник / Под общ. ред. А.И. Губинского и В.Г. Еврафова. – М.: Машиностроение. – 1993. – 528с.
- Лавров, Е. А. Excel-технология эргономического моделирования дискретных человеко-машинных систем / Е. А. Лавров, Н. Б. Пасько // *Вісник Сумського національного аграрного університету. Серія «Механізація та автоматизація виробничих процесів»*. – 2008. – Випуск 1(17). – С. 82-94.
- Лавров, Е. А. Компьютерная технология моделирования дискретного человеко-машинного взаимодействия / Е. А. Лавров, Н. Б. Пасько, Б. В. Панов // *Научная мысль*. – 2014. – №1. – С. 48 - 60.
- Лавров, С. А. Свідотство про реєстрацію авторського права на твір «Комп'ютерна програма «Комп'ютерна технологія моделювання дискретної людино-машинної взаємодії» / С. А. Лавров, Н. Б. Пасько // № 45262, 21.08.2012.
- Криводуб, А. С. Подход к выбору мероприятий для системы обеспечения эргономического качества АСУТП / А. С. Криводуб, Е. А. Лавров // *Научная мысль*. – Череповец. – 2015. – № 3(17). – С. 45-56.
- Лавров, Е. А. Автоматизированный анализ эффективности эргономических мероприятий в дискретных системах управления / Е. А. Лавров, Н. Б. Пасько, А. С. Криводуб // *Восточно-Европейский журнал передовых технологий. Сер. Процессы управления*. – Харьков. – 2015. – № 4/3 (76). – С.16-22. – doi:10.15587/1729-4061.2015.480501.
- Лавров, Е. А. Автоматизация оценки условий труда на рабочем месте человека-оператора / Е. А. Лавров, Н. Б. Пасько // *Вісник Одеської державної академії будівництва та архітектури*. – Одеса: ОДАБА. – 2009. – Вип. 36. – С. 250-256.

#### Bibliography (transliterated)

- Rothmorea, P., Aylwardb, P., Karnona J. The implementation of ergonomics advice and the stage of change approach. *Applied Ergonomics*, 2015, **51**, 370-376, doi:10.1016/j.apergo.2015.06.013.
- Bentley, T. A., Teo, S. T. T., McLeod, L., Tana, F., Bosua, R., Gloet, M. The role of organisational support in teleworker wellbeing: A socio-technical systems approach. *Applied Ergonomics*, 2016, **52**, 207-215, doi:10.1016/j.apergo.2015.07.019.

3. Wang, Y., Zheng, L., Hiu, T., Zheng, Q. Stress, burnout and job satisfaction: case of police force in China. *Public Pers. Manag.*, 2014, **43**, 325-339.
4. De Felice, F., Petrillo, A. Methodological Approach for Performing Human Reliability and Error Analysis in Railway Transportation System. *International Journal of Engineering and Technology*, 2011, **3**(5), 341-353.
5. Lyubchak, V., Lavrov, E., Pasko, N. Ergonomic support of man-machine interaction. Approach to designing of operators' group activities. *International Journal of Bio-medical Soft Computing and Human Sciences*. Japan, Tokyo, 2011, **2** (17), 53-58.
6. Lavrov, E., Kupenko, O., Lavryk, T., Barchenko, N. Organizational Approach to the Ergonomic Examination of E-Learning Modules. *Informatics in education*, 2013, **12**(1), 105-123.
7. Lavrov, E., Krivodub, A. Podhod k oцenke variantov dejatelnosti operatorov tehniцeskoj podderzhki informacionnyh servisov telekommunikacionnyh system. *Doklady BGUIR*, Minsk, 2015, **2**(88), 123-126.
8. [Web] www.portaone.com.
9. [Web] www.netcracker.com.
10. Adamenko, A., Asherov, A.T., Berdnikov, I.L. i dr. Informacionno-upravljajushhie cheloveko-mashinnye sistemy: Issledovanie, proektirovanie, ispytaniya: spravochnik [Information and upravlyayuschyje man, machine-systems Investigation, Designing, trials: Directory], Moscow: Mashinostroenie, 1993, 528 p.
11. Lavrov, E., Pasko, N. Excel-tehnologija ergonomiцeskoгo modelirovaniya diskretnyh cheloveko-mashinnyh system [The Excel-technology economic modeling discrete human-machine systems]. *Visnik Sumskogo nacionalnogo agrarnogo universitetu. Serija «Mehanizacija ta avtomatizacija virobniцhих procesiv» [Bulletin of Sumy National Agrarian University. Series "Mechanization and automation of production processes"]*, 2008, **1**(17), 82-94.
12. Lavrov, E., Pasko, N., Panov, B. Kompjuternaja tehnologija modelirovaniya diskretnogo cheloveko-mashinnoгo vzaimodejstvija [Computer technology of digital human-computer interaction modeling]. *Nauchnaja mysl [Scientific thought]*, 2014, **1**, 48-60.
13. Lavrov E. A., Pasko N. B. Svidotstvo pro reestraciju avtorskogo prava na tvir «Kompjuterna programa «Kompjuterna tehnologija modeljuvannja diskretnoji ludino- mashinnoji vzaemodiji», № 45262, 21.08.2012.
14. Krivodub A. S., Lavrov E. A. Podhod k vyboru meroprijatij dlja sistemy obespeчeniya jergonomiцeskoгo kachestva ASUTP [The approach to the choice of measures to ensure the ergonomic quality process control systems]. *Nauchnaja mysl. Cherepovec*, 2015, **3**(17), 45-56.
15. Lavrov, E., Pasko, N., Krivodub, A. Automated analysis of ergonomic measures in discrete control systems // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. Kharkov, 2015, **4/3**(76), 16-22, doi:10.15587/1729-4061.2015.480501.
16. Lavrov, E., Pasko, N. Avtomatizacija oцenki uslovij truda na rabochem meste cheloveka-operatora [Automate assessment of working conditions at the workplace human operator] *Visnik Odeskoi derzhavnoi akademiji budivnictva ta arhitekturi [Bulletin of Odessa State Academy of Construction and Architecture]*. Odesa: ODABA, 2009, **36**, 250-256.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Криводуб Анна Сергеевна** – аспирант, Сумский государственный университет, аспирант кафедры компьютерных наук, г. Сумы, Украина; email: annakrivodub@gmail.com.

**Anna Krivodub** – PhD student, Sumy State University, PhD student of department of computer science, Sumy, Ukraine; email: annakrivodub@gmail.com

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Криводуб, А. С.** Оцeнка надежности деятельности операторов в системах предоставления доступа к ресурсам компьютерных сетей / **А. С. Криводуб** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 140-147. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.20.

*Please cite this article as:*

**Krivodub, A.** The approach to the evaluation of options of the activities of the operators technical support information services telecommunication systems. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 140-147, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.20.

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Криводуб, А. С.** Оцiнка надiйностi дiяльностi операторiв в системах надання доступу до ресурсiв комп'ютерних мереж / **А. С. Криводуб** // *Вiсник НТУ «ХПІ», Серiя: Новi рiшення в сучасних технологiях.* – Харкiв: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18(1190). – С. 140-147. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.20.

**АНОТАЦІЯ.** Розглядаються телекомунікаційні системи, що спеціалізуються на наданні ІТ-послуг населенню і організаціям. Описується діяльність операторів технічної підтримки, направлена на усунення можливих проблемних ситуацій. Обґрунтовано доцільність використання для формалізації діяльності функціонально-структурної теорії ергономічних систем професора Анатолія Ілліча Губінського. Наведені приклади формалізованих описів діяльності операторів щодо усунення деяких проблем надання ІТ-послуг. Наведено приклад розрахунку ймовірності своєчасного та безпомилкового виконання алгоритму діяльності щодо усунення однієї з можливих проблемних ситуацій.

**Ключові слова:** Комп'ютерна мережа, ергономіка, людина-оператор, алгоритм діяльності, надійність, безпомилковість, своєчасність, робоче місце, умови праці.

*Поступила (received) 18.05.2016*



## ПЕРСПЕКТИВНОСТЬ FDM ТЕХНОЛОГИЙ В 3D ПЕЧАТИ

Р. П. МИГУЩЕНКО, М. И. ОПРЫШКИНА, К. Ю. КУШТЫМ\*

НТУ «ХПИ», г. Харьков, УКРАИНА  
\*email: zlobnih@bigmir.net

**АННОТАЦИЯ** В статье рассмотрены вопросы, посвященные технологиям быстрого прототипирования: технологии 3D печати, устройство 3D принтера, преимущества и недостатки использования 3D принтера. Проанализированы области применения 3D технологий.

**Ключевые слова:** 3D принтер, экструдер, технологии (SLA, SLS, FDM, STL, LOM) быстрого прототипирования, прототипирование, рабочая платформа, 3D Studio Max, MicroStation, 3DStudio Viz, Mimics, Alias, Pro/ENGINEER, AutoCAD, Raindrop GeoMagic, SolidWorks, Rapidform, бабина, воксель.

## THE PERSPECTIVE OF FDM-TECHNOLOGIES IN 3D PRINTING

R. P. MIGUSHENKO, M. I. OPRICHKINA, K. Y. KUSTYM

NTU "KhPI", Kharkov, UKRAINE

**ABSTRACT** To date, actively developing modern technologies of rapid prototyping. This made it possible to model 3D representation of the object. 3D printers using rapid prototyping technology to reproduce solid-state features. Design details, various mechanisms, food and more for a given program with a minimum expenditure of physical human labor. The printing process is a series of repeating cycles associated with the creation of three dimensional models by drawing on the Desk (Elevator) of layer printer consumables, by moving the desktop down to the level of the finished layer and removing from the surface of the table waste. The printing process is a series of repeating cycles associated with the creation of three dimensional models by drawing on the Desk (Elevator) of layer printer consumables, by moving the desktop down to the level of the finished layer and removing from the surface of the table waste.

In the article the questions devoted to the technology of rapid prototyping: 3D printing technology, the device 3D printer, advantages and disadvantages of using a 3D printer. Describes how to use 3D printers in production. Analyzed applications of 3D technologies. The most common problem with 3D printer ways to address them. In article it was told about the prototyping process and what stages a product passes the design process. Narrated step by step as a printing technology FDM. Constructed the block diagram and detailed description of its components and a complete description of her work, painted the algorithm works 3D printer with FDM technology, and were considered fields of application of 3D printers.

**Keywords:** 3D printer, extruder technology (SLA, SLS, FDM, STL, LOM) rapid prototyping, prototyping, working platform, 3D Studio Max, MicroStation, 3DStudio Viz, Mimics, Alias, Pro/ENGINEER, AutoCAD or Raindrop GeoMagic, SolidWorks, Rapidform, Babin, voxel.

## Введение

Благодаря активному развитию современных технологий стало возможным моделирование 3D-представления объекта. 3D-принтеры с помощью технологии быстрого прототипирования воспроизводят твердотельные пространственные объекты. Конструкторские детали, различные механизмы, продукты питания и даже целые жилые дома выращиваются по заданной программе с минимальными затратами физического труда человека. Это явный качественный скачок промышленной цифровой программируемой технологии трехмерного твердотельного компьютерного моделирования [1].

Процесс печати представляет собой ряд повторяющихся циклов, связанных с созданием трёхмерных моделей, нанесением на рабочий стол (элеватор) принтера слоя расходных материалов, перемещением рабочего стола вниз на уровень готового слоя и удалением с поверхности стола отходов (рис.1).

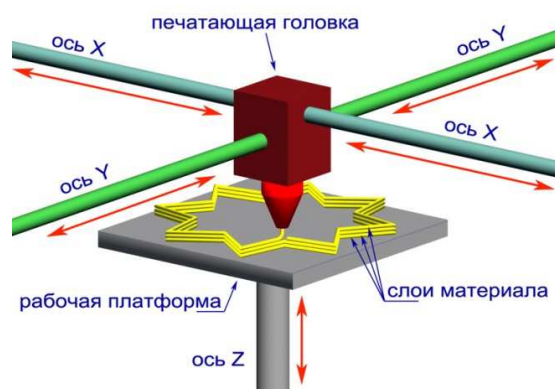


Рис.1 – Схематическое устройство механизма

Печатающая головка формирует слой материала, постепенно выращивая из них объект. Она движется только в горизонтальной плоскости (вдоль осей X и Y).

Рабочая платформа служит для размещения объекта при печати. Она передвигается по оси Z.



Вначале рабочая платформа находится в верхнем положении, а печатающая головка накладывает на нее нижний слой объекта. После того, как первый слой сформирован, рабочая платформа опускается на толщину слоя, и печатающая головка накладывает новый слой материала на предыдущий. Этот цикл повторяется до тех пор, пока не будет построен весь объект.

Одна из основных характеристик 3D-принтера – «разрешение печати» (рис.2). Под этим параметром понимают минимально допустимую высоту (т.к. ограничителя хода на оси z нет, а так же от этого зависит на сколько высокий объект 3D принтер может создать) слоя материала, с которой может печатать 3D-принтер.

На данный момент оборудование данного класса может работать с фотополимерными смолами, различными видами пластиковой нити, керамическим порошком и металлоглиной, а также с различными пищевыми продуктами.

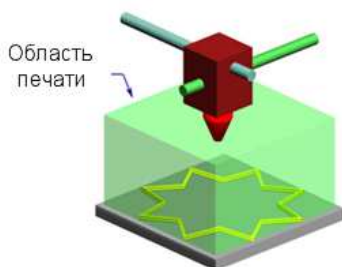


Рис. 2 – Область печати

Существуют различные технологии трехмерной печати. Разница между ними заключается в способе наложения слоев изделия.

Применяются две принципиально разные технологии трехмерной печати: лазерная и струйная [2 - 4].

В рамках лазерной технологии печати различают стереолитографию (StereoLithography или SLA), технологию лазерного спекания порошковых материалов (Selective Laser Sintering – SLS) и ламинирование (Laminated Object Manufacturing – LOM).

Струйная печать включает в себя следующие технологии:

1. Послойное наложение расплавленной полиномиальной нити (Fused Deposition Modeling – FDM).

2. Полимеризация фотополимерного пластика под действием ультрафиолетовой лампы.

Существует три разновидности технологии, запатентованные различными фирмами: Multi-Jet Modeling (MJM, компания 3D Systems), PolyJet (photopolymer jetting, компания Objet Geometries), и DODJet (Drop-On- Demand-Jet, компания Solidscape).

3. Склеивание или спекание порошкообразного материала (SLS).

В свою очередь, принтер требует для работы входные данные, представленные в формате STL

(STereoLithography), представляющем список треугольных граней, описывающих его поверхность. STL – это «мозаичный» формат, в котором для представления формы цифровой 3D-модели используется последовательность треугольников (фасетов). Трехмерная геометрия в ведущих 3D CAD-системах описывается поверхностями высокого порядка, а при триангуляции поверхность модели разбивается на маленькие треугольники. Каждый фасет описывается четырьмя наборами данных: координаты XYZ каждой из трех вершин и нормальный вектор, который описывает ориентацию фасета. Наиболее широкое распространение, благодаря высокой скорости построения объектов, получила технология стереолитографии [5, 6].

### Технология быстрого прототипирования

Трехмерная печать позволяет создавать твердотельные объекты из различных материалов (пластик, порошки металла, керамики, фотополимерные и биоматериалы и др.). В настоящее время производители 3D-принтеров работают над возможностью печати одновременно формы и содержания, например, корпуса и электронной «начинки» различных электронных устройств [7, 8].

При создании прототипа изделие проходит следующие этапы:

1. Разработка твердотельной модели или модели с замкнутыми поверхностными контурами.

2. Экспорт 3D-модели в стандартные форматы для 3D-печати (STL, WRL (VRML), PLY, 3DS и ZPR) при помощи программного обеспечения: 3D Studio Max, MicroStation, 3DStudio Viz, Mimics, Alias, Pro/ENGINEER, AutoCAD или Raindrop GeoMagic, SolidWorks, Rapidform и другие.

3. Подготовка к печати:

а) разбиение на тонкие слои в поперечном сечении (при этом толщина каждого слоя соответствует разрешающей способности оборудования по z-координате);

б) построение системы поддержки на элементы, крепление которых происходит в верхних слоях.

4. Вывод подготовленных данных на печать.

5. Послойная печать физического прототипа.

### Описание функциональной схемы

Функциональная схема работы FDM 3D принтера представлена на рис. 3.

После включения 3D принтера, происходит синхронизация с ПК. Сначала устанавливают переключики на плате управления шаговыми двигателями для выбора драйвера (это нужно для установки шага печати: шагом, микрошагом или полушагом). Когда 3D принтер и ПК синхронизировались, пользователь может отправлять файл на печать, через специальную среду для 3D

моделирования. Далее микроконтроллер ждет G-код. Это несложный набор команд, с помощью которых можно задавать действия принтера. Чтобы конвертировать в него модели применяют «Слайсер» – специальную компьютерную программу, которая транслирует контроллеру G-код, который в свою очередь его выполняет. Далее происходит печать, но до начала печати происходит опрос концевиков на случай, если какой вышел из строя или произошел сбой программного

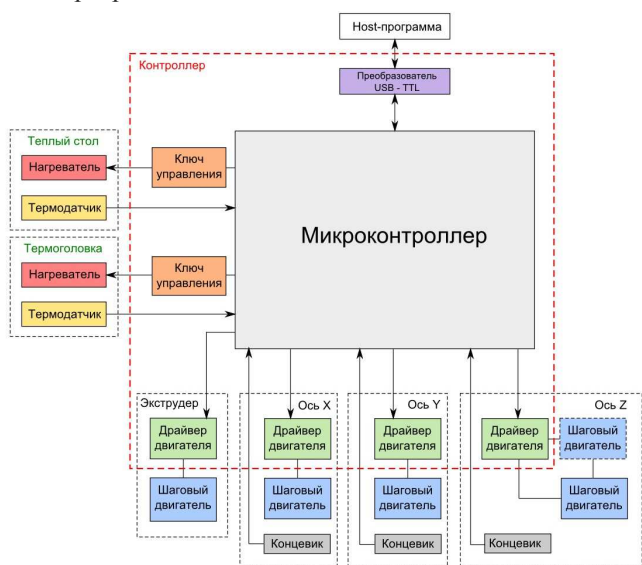


Рис. 3 – Функциональная схема FDM 3D принтера

обеспечения. Если все в порядке, устанавливаются нулевые координаты. Далее происходит подогрев рабочей поверхности и экструдера до установления рабочей температуры. Далее выдается сигнал на плату управления шаговыми двигателями [9, 10].

Работа контроллеров шаговых двигателей происходит следующим образом: сначала питание идет на шаговые двигатели, далее на логическую часть, после чего дается команда «шаг» управляющим контактам. Во время команды «шаг» на мотор подается напряжение, которого достаточно для передвижения ротора на один микрошаг, полушаг или шаг (это зависит от показателей, заданных перемычками). После этого идет печать до окончания или до соприкосновения с концевиком, если произошло касание экструдера и концевика по любой оси X, Y или Z, то печать моментально заканчивается.

#### Назначение элементов функциональной схемы

**Концевик** (датчик крайнего положения) – это ограничитель хода по осям. В момент контакта с концевиком подается сигнал ограничения хода по оси (рис. 4). Это относится ко всем осям (X, Y, Z).

**Шаговые двигатели** – выполняют перемещение экструдера в зависимости от поданного питания (рис. 5).



Рис. 4 – Концевик



Рис. 5 – Шаговый двигатель

**Экструдер** – печатная головка принтера (рис. 6). Предназначен для плавки и нанесения термопластиковой нити. Первый компонент – механизм подачи нити, состоящий из валиков и шестерней, которые приводятся в движение электромотором. Механизм осуществляет подачу нити в специальную нагревательную металлическую трубку с соплом небольшого диаметра, называемую «хот-энд» или «сопло». Тот же механизм используется для извлечения нити, если необходима смена материала.

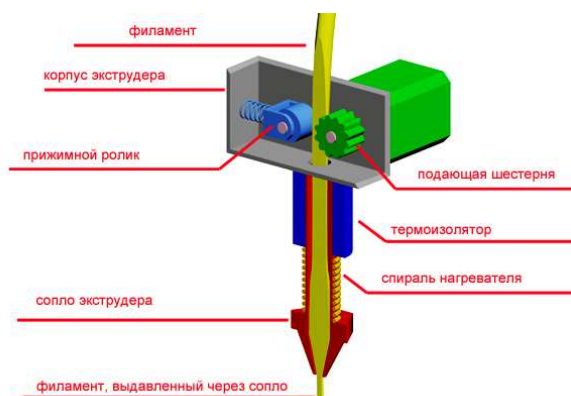


Рис. 6 – Экструдер

Сопло служит для нагревания и плавления нити, которая подается (затягивается) механизмом. Как правило, сопла производятся из латуни или алюминия, хотя возможно использование более термостойких материалов. Собственно «сопло» крепится к концу трубки при помощи резьбового соединения и может быть заменено на новое в случае износа или при необходимости изменения диаметра. Диаметр сопла обуславливает толщину расплавленной нити и, как следствие, влияет на качество печати.

**Термоголовка** – с нее поступает расплавленный пластик. Регулирование температуры на термоголовке очень важна, так как при перегревании материала может произойти пиролиз, то есть разложение пластика, что способствует как потере свойств самого материала, так и забивания сопла.

**Рабочая платформа** – на ней происходит построение моделей. Оснащается нагревательными элементами (рис. 7). Подогрев нужен для работы с целым рядом деталей, подверженных высокой степени усадки при охлаждении. Быстрая потеря объема холодными слоями в сравнении со свеженанесенным материалом может привести к деформации модели или расслоению. Подогрев платформы позволяет значительно выравнять градиент температур между верхними и нижними слоями.



Рис. 7 – Рабочая платформа

**Драйвер двигателя** – в нем записана программа, которая отвечает за работу шаговых двигателей.

**Микроконтроллер** управляет всеми устройствами в зависимости от установленной программы.

#### Преимущества использования 3D-принтеров в производстве

1. Сокращение сроков производства. На создание прототипа нового устройства с помощью 3D-принтера нужно всего несколько часов.
2. Снижение стоимости продукции. Стоимость изготовления объекта на 3D-принтере в несколько раз ниже, чем создание пресс-формы детали.
3. Сохранение коммерческой тайны. 3D-принтер в офисе позволит сохранить все подробности новых разработок внутри компании. Не нужно передавать сведения сторонним заказчикам для производства нужной детали.
4. Широкие возможности тестирования и доработки. Можно быстро и дешево изготавливать нужное количество прототипов.

#### Области применения и перспективы развития

Несмотря на наблюдаемый в данный момент повышенный интерес к технологии 3D-репликации

(основной всплеск количества публикаций по этой теме наблюдался в 2005–2007 годах), основное ее развитие идет по пути развития аппаратных средств, повышения разрешающей способности 3D-принтеров и 3D-сканеров.

При этом точности построения (восстановления) виртуального объекта уделяется меньше внимания, несмотря на то, что данный этап является связующим между получением множества вокселей (элемент объемного изображения, содержащий значение элемента раstra в трёхмерном пространстве) и формированием «твердой копии» объекта [11,12,13].

#### Выводы

Анализ современных технологий быстрого прототипирования показывает, что на сегодняшний день существуют уникальные возможности «печати» сложнейших механизмов, в том числе автомобиля. Реализация этих возможностей связана с цифровой технологией управления материальными частицами в объемной среде принтера, где и осуществляются процессы, определяющие свойства воспроизводимого объекта. Для эффективной работы необходимо согласование компьютерной модели через универсальный язык с промышленной технологией 3D-воспроизводства. По примеру развития систем трехмерного компьютерного моделирования пространственных объектов, в которых постоянно обновляется набор инструментов, для каждого направления промышленных 3D-принтеров необходимо разрабатывать программные прототипы воспроизводства типовых трехмерных материальных объектов. Задача заключается в разработке механизмов взаимодействия между компьютерным моделированием объектов и их реализацией (в рамках системы объектного когнитивного программирования).

#### Список литературы

1. **Александров, В. В.** DIGITAL AVATAR – Цифровое воплощение инфокоммуникационных систем / **В. В. Александров, В. А. Сарычев** // *Информационно-измерительные и управляющие системы* – 2010. – №7, т. 8. – С. 3-10.
2. **Татарников, О.** Атака клонов! 3D-сканирование и трехмерная печать / **О. Татарников** // *Компьютерпресс*. – 2003. – №7. – С. 9-14.
3. **Афанасьев, К.** 3D-принтеры. [Электронный ресурс]. – <<http://www.3dnews.ru/peripheral/3d-print/print/>>
4. **Boppa, V. Chowdary** Some STL File Generation Issues in Rapid Prototyping / **Chowdary, Boppa V., Sahatoo, Divesh R. and Bhatti, Raj** // *Fifth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2007) – Developing Entrepreneurial Engineers for the Sustainable Growth of Latin America and the Caribbean: Education, Innovation, Technology and Practicel*, 29 May – 1 June 2007, Tampico, México, 9 p.
5. **By Joshua M. Pearce**, PhD Posted on 18 November 2013 – 3D - Hrinting your lab equipment - it's cheaper than you think.

- [Web] < <https://www.elsevier.com> >
6. **By Brent Stephens**, PhD Posted on 26 July 2013 – 3D - Could particle emissions from desktop 3D printers reach unhealthy levels? – [Web] < <https://www.elsevier.com> >
  7. **By Zhang & Fisher & Leong**, Posted on 06 Jun 2015 – 3D Bioprinting and Nanotechnology in Tissue Engineering and Regenerative Medicine? 1st Edition – [Web] <<http://store.elsevier.com>>
  8. 3D Printing Gold Rush: How to Profit from 3D Printing – The Next Technology Revolution. – [Web] – <<http://www.solidsmack.com>>
  9. 3D Printing: Build Your Own 3D Printer and Print Your Own 3D Objects. – [Web]. – <<http://ptgmedia.pearsoncmg.com> >
  10. 3D-печать: третья индустриально-цифровая революция. Часть 1. – [Электронный ресурс]. – <<http://bloggerator.ru>>
  11. 3D-модели. ж: Blackie. – 2013. – № 17. – [Электронный ресурс]. – <<http://3dtoday.ru/3dmodels-2/soft3d/1521>>
  12. 3D-модели. ж: Blackie, Июль №24, С-П, 2013 – <<http://3dtoday.ru/3dmodels-2/soft3d/784>>
  13. Основы 3d-печати для начинающих. 3D-принтер. – [Электронный ресурс]. – <<http://partmaker.ru>>

#### Bibliography (transliterated)

1. **Alexandrov, V. V., Sarychev, V. A.** DIGITAL AVATAR – a Digital representation of the information and communication systems. *Information-measuring and control system*, 2010, **7(8)**, 3-10.
2. **Tatarnikov, O.** Attack of the clones! 3D scanning and three-dimensional printing. *Computer Press Confer*, 2003, **7**, 9-14.
3. **Afanasyev, K.** 3D printers, [Web], <<http://www.3dnews.ru>>
4. **Boppana V. Chowdary, Divesh R. Sahatoo, Raj Bhatti** Some STL File Generation Issues in Rapid Prototyping. *Fifth LACCEI International Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology (LACCEI'2007) – Developing Entrepreneurial Engineers for the Sustainable Growth of Latin America and the Caribbean: Education, Innovation, Technology and Practice*, Tampico, México, 29 May – 1 June 2007, 9 p.
5. **By Joshua M. Pearce**, PhD Posted on 18 November 2013 – 3D - Printing your lab equipment - it's cheaper than you think, [Web], < <https://www.elsevier.com> >
6. **By Brent Stephens**, PhD Posted on 26 July 2013 – 3D Could desktop particle emissions from 3D printers reach unhealthy levels? [Web], < <https://www.elsevier.com> >
7. **By Zhang & Fisher & leong**, Posted on 06 Jun 2015 – 3D Bioprinting and Nanotechnology in Tissue Engineering and Regenerative Medicine? 1st Edition, [Web], <<http://store.elsevier.com>>
8. 3D Printing Gold Rush: How to Profit from 3D Printing The Next Technology Revolution, [Web], <<http://www.solidsmack.com>>
9. 3D Printing: Build Your Own 3D Printer and Print Your Own 3D Objects, [Web], <<http://ptgmedia.pearsoncmg.com> >
10. 3D printing: the third industrial revolution is digital. Part 1, [Web], <<http://bloggerator.ru>>
11. 3D model. W: Blackie, September, 2013, **17**, [Web], <<http://3dtoday.ru/3dmodels-2/soft3d/1521>>
12. 3D model. W: Blackie, 2013, **24**, <<http://3dtoday.ru>>
13. The basics of 3d - printing – for – beginners. 3D printer, <http://partmaker.ru>

#### Сведения об авторах (About authors)

**Мигущенко Руслан Павлович** – доктор технических наук, профессор, проректор Национального Технического Университета «ХПИ», г. Харьков, Украина; e-mail: [mrp1@bk.ru](mailto:mrp1@bk.ru).

**Mygushchenko Ruslan Pavlovych** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Prorector of NTU “KPI”, Kharkov, Ukraine; e-mail: [mrp1@bk.ru](mailto:mrp1@bk.ru).

**Опрышкина Марина Игоревна** – кандидат технических наук, доцент Национального Технического Университета «ХПИ», г. Харьков, Украина; e-mail: [flaming541@yandex.ru](mailto:flaming541@yandex.ru).

**Oprichnina Marina Igorevna** – candidate of technical Sciences, associate Professor National Technical University "HP", Kharkov, Ukraine; e-mail: [flaming541@yandex.ru](mailto:flaming541@yandex.ru).

**Куштым Константин Юрьевич** – магистр Национального Технического Университета «ХПИ», г. Харьков, Украина; e-mail: [zlobnih@bigmir.net](mailto:zlobnih@bigmir.net).

**Kushtym Konstantyn Yurievich** – master of National Technical University "KHPI", Kharkov, Ukraine; e-mail: [zlobnih@bigmir.net](mailto:zlobnih@bigmir.net).

Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:

**Мигущенко, Р. П.** Перспективность FDM технологий в 3D печати / **Р. П. Мигущенко, М. И. Опрышкина, К. Ю. Куштым** // Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 148-152. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.21.

Please cite this article as:

**Mygushchenko, R. P., Oprichnina, M. I., Kushtym, K. Yu.** The perspective of fdm-technologies in 3D printing. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 148-152, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.21.

Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:

**Мігущенко, Р. П.** Перспективність FDM технологій у 3D друку / **Р. П. Мігущенко, М. І. Саприкіна, К. Ю. Куштим** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 148-152. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.21.

**АНОТАЦІЯ** У статті розглянуті питання, присвячені технологіям швидкого прототипування: технології 3D друку, пристрій 3D принтера, переваги і недоліки використання 3D принтера. Проаналізовано області застосування 3D технологій. **Ключові слова:** 3D принтер, екструдер, технології (SLA, SLS, FDM, STL, LOM) швидкого прототипування, прототипування, робоча платформа, 3D Studio Max, MicroStation, 3DStudio Viz, Mimics, Alias, Pro / ENGINEER, AutoCAD, Raindrop GeoMagic, SolidWorks, Rapidform, бабина, воксель

Поступила (received) 12.05.2016



УДК 66: 533.9+004.9

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.22

## РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ КОБАЛЬТА ПЛАЗМОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

О. В. СЕРГЕЕВА<sup>1\*</sup>, А. А. ПИВОВАРОВ<sup>2</sup>, В. В. ПИЛЯЕВ<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Кафедра специализированных компьютерных систем, ГВУЗ Украинский химико-технологический университет, г. Днепрпетровск, УКРАИНА

<sup>2</sup> Кафедра технологии неорганических веществ и экологии, ГВУЗ Украинский химико-технологический университет, г. Днепрпетровск, УКРАИНА

\*e-mail: ov.sergeeva@mail.ru

**АННОТАЦИЯ** В данной работе рассматривалась система мониторинга процесса получения обводненных кислородсодержащих соединений кобальта с использованием плазмохимического реактора. Перспективы использования подобных систем связаны с появлением тенденции к развитию мини производств, специализирующихся на производстве специальных химических веществ, а также сыпучих промежуточных веществ, пользующихся устойчивым спросом. Отмечено, что использование системы мониторинга для технологий с использованием плазмохимических процессов в условиях экспериментально-исследовательской лаборатории, совмещенной с мини производством, позволяет существенно сократить время на сокращение исследований за счет снятия комплекса показаний соотнесенных с реальным временем процесса.

**Ключевые слова:** мониторинг химико-технологических процессов, неравновесная плазма, жидкость, наноразмерные соединения.

## DEVELOPMENT OF MONITORING SYSTEM FOR PRODUCING OXYGEN-CONTAINING COMPOUNDS OF COBALT BY PLASMO-CHEMICAL METHOD

O. SERGEYEVA<sup>1</sup>, A. PIVOVAROV<sup>2</sup>, V. PILYAEV<sup>1</sup>,

<sup>1</sup>Department of specialized computer systems, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, UKRAINE

<sup>2</sup>Department of inorganic matter technology and ecology, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, UKRAINE

**ABSTRACT** This paper discusses the system of monitoring the process of obtaining oxygen-containing compounds of cobalt using plasma chemical reactor. Prospects for the use of such systems are associated with the emergence of the trend towards the development of small enterprises, specializing in the production of specialty chemicals and bulk intermediates are in steady demand. It should be noted that the use of monitoring systems for technologies using plasma-chemical processes in the conditions of experimental research laboratories, coupled with a small production, can significantly reduce the time to research by recording the readings in real-time process. The use of computer monitoring system in small industries (laboratories), combined with experimental studies is a great help to maximize the use of existing equipment. This is especially true for the development of technology-based contact using the nonequilibrium low-temperature plasma.

By reducing research time and expense of drawing up a more complete picture of the process as a result of removal of the complex characteristics, as well as reducing the consumption of materials due to incorrect operation of the equipment significantly reduces the cost of developing new technologies.

**Keywords:** monitoring of chemical-engineering processes, nonequilibrium plasma, liquid, nano-sized compounds.

### Введение

В последнее время наблюдается появление мини производств, специализирующихся на производстве малых объемов, но с достаточно высокой ценовой категорией специальных химических веществ, а также сыпучих промежуточных химических веществ пользующихся устойчивым рыночным спросом [1-5]. К таким мини производ-ствам можно отнести и лаборатории, в которых производят ультра- и наноразмерные материалы [6]. При этом возникают проблемы с разработкой систем мониторинга для контроля и управления данными химико-технологическими процессами, которые, прежде всего, связаны с построением модели процесса [7].

### Цель работы

Целью данной работы являлось рассмотрение на примере получения кислородсодержащих соединений кобальта плазмохимическим способом [8-10], особенностей разработки системы мониторинга экспериментально-лабораторных установок.

### Изложение основного материала

В общем виде система мониторинга представляет собой [11], систему, представленную на рис. 1.

Основные тенденции, касающиеся разработки систем мониторинга для мини-производств, направлены на то, чтобы получить максимально

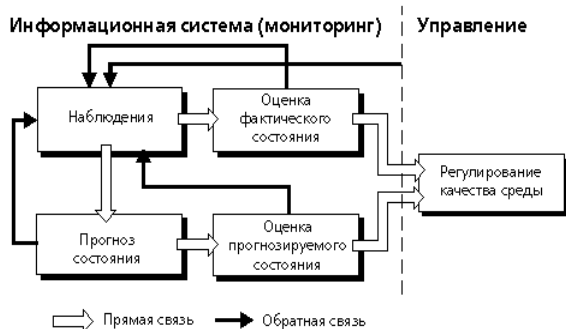


Рис. 1 – Общая блок- схема мониторинга [11]

эффективную и легко перестраиваемую под другой продукт систему [12].

Особенность лабораторных установок в том, что они используются для проведения экспериментальных исследований, но также могут быть использованы для мини производства сырья. При этом на одной установке (возможно с небольшими вариациями) могут разрабатываться и отрабатываться технологии получения различных веществ, близких по способу получения.

Отметим, что любое химическое, пищевое, фармацевтическое и т.п. производство, реализующее конкретную сложную технологию, представляет собой специфическую химико-технологическую систему, состоящую из определенного количества аппаратов и технологических связей между ними [12, 13].

Обычно при составлении моделей, используемых для мониторинга процессов, используется интегральный метод, который заключается в объединении систем уравнений, описывающих работу отдельных аппаратов, в одну большую систему уравнений с дальнейшим решением этой системы.

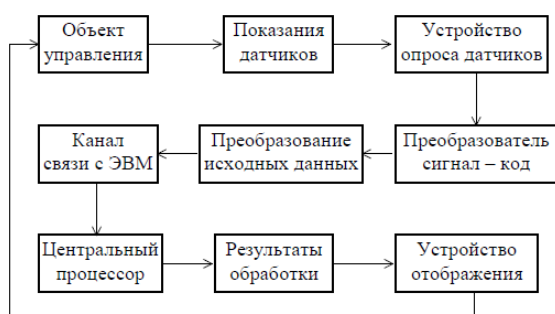


Рис. 2 – Общая схема обработки экспериментальных данных в режиме реального времени [15].

Таким образом, линейные уравнения материального и теплового балансов объединяются с нелинейными уравнениями равновесия химических реакций дифференциальными линейными и нелинейными уравнениями, уравнениями гидродинамики в частных производных и т.д. в единую «большую» систему уравнений. Однако, в данном случае сам плазмохимический реактор, в котором и происходят основные преобразования, в жидких

средах, является устройством в котором совмещается целый комплекс процессов, включая электрохимические (превращения на электродах), плазмохимические (контактное воздействие на жидкофазные системы заряженными и нейтральными частицами, радикалами, образующимися в результате газоразрядной ионизации и имеющих электронную температуру примерно 1 eV, облучение УФ - излучением, образующимся в разряде плазмы), химические (протекающие в результате появления в жидкости новых ионов, радикалов и активированных молекул), процессы кавитации пузырьков газов, образующихся в результате разложения воды вблизи металлических электродов и плазменного разряда при прохождении через слой жидкости, диффузионные, теплообменные и т.п. Представление всех процессов, протекающих в реакторе в виде единой системы уравнений, является трудной и объемной задачей, однако, это было выполнено нами в работе [14]. Здесь, на примере получения соединений меди составлена математическая модель, которая, при использовании соответствующего механизма реакций, подходит и для моделирования процессов, протекающих в плазмохимическом реакторе при работе с соединениями кобальта. При этом из-за длительности расчетов, которые на сегодняшний день значительно превышают время реального протекания процессов в реакторе, для системы мониторинга в реальном времени она малоприменяема. Указанная модель [14] хорошо подходит для проведения компьютерного эксперимента, который значительно сокращает затраты ресурсов на изыскания, но для системы мониторинга необходимо искать дополнительные варианты.

В общем случае в ходе лабораторного эксперимента должна действовать схема непрерывного мониторинга, отображенная на рис.2 [15], позволяющая получить максимальное количество информации за время проведения эксперимента.

В качестве объекта управления выступает химико-технологическая система, предназначенная для получения оксидных соединений кобальта, блок-схема и, построенная на ее основе, примерная структурная схема которой представлена на рис.3-4, соответственно. При этом, в результате обработки, полученной в ходе экспериментов информации можем использовать зависимости, полученные в виде совокупности математических уравнений, отражающих зависимость выходных величин от входных, дополненная ограничениями, накладываемыми на эти величины, условиями физической осуществимости, требованиями безопасности функционирования, уравнениями связи с другими объектами, которые представляют собой математическую модель процесса.

При этом для процесса получения продукции, модель дополняется алгоритмом управления, обеспечивающим выпуск продукции с заданными показателями.

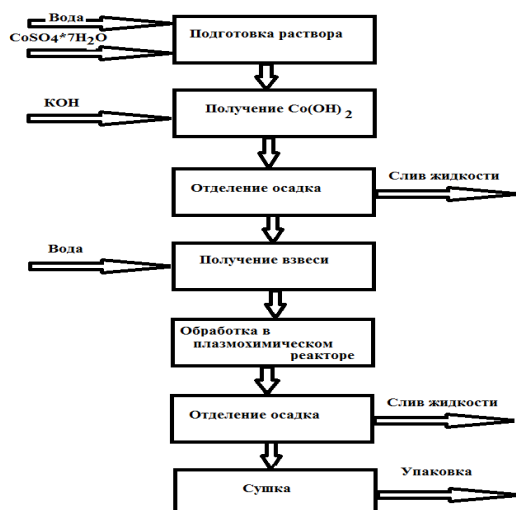


Рис. 3 – Блок-схема процесса получения кислородсодержащих соединений кобальта

В общем виде система мониторинга (рис. 5) представляет собой систему датчиков, объединенную общей шиной с контроллером и блоком наблюдения. От датчиков экспериментальной установки сигналы различной физической природы в определенные моменты времени, задаваемые устройством опроса датчика, поступают на вход преобразования сигнал-код. Далее они поступают через контроллер в блок наблюдения, а от него в блок сбора и хранения данных и блок принятия решений. В случае если показатели не соответствуют нормам, то экспертная система, входящая в блок принятия решений, определяет причину и выставляет диагноз неисправности. Кроме того, из-за интенсивного использования установки, считаем целесообразным включение в систему мониторинга возможности оценки состояния отдельных компонентов (оборудования) системы, например, мониторинг текущих значений производительности и напора компрессора по сравнению с расчетными значениями с получением оценки рабочих характеристик.

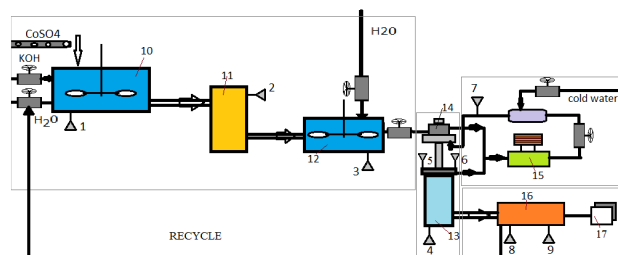
Результат передается в подсистему обработки экспериментальных данных, который передает сигналы управления по шине регулятора на управляемые компоненты. Информация о неисправности выводится на подсистему GUI, а измерительные данные заносятся в БД.

Центральным элементом системы является контроллер, который выполняет следующие функции:

- прием информации от датчиков;
- логическая обработка аналоговой и дискретной информации;
- расчет действительных значений параметров;
- проверка действительных значений параметров на соответствие регламентным нормам;
- формирование управляющих сигналов.

На интерфейсе происходит:

- отображение параметров, представленных в графическом виде;



1- датчик, 2- тахометр, 3- реакция на SO<sub>4</sub>, 4 – датчик, 5 –температурный датчик, 6 –тензометр, 7 – датчик напора, 8 – температурный датчик, 9– психрометр, 10 – чан для смешивания, 11– центрифуга , 12 – чан для промывки, 13 – плазмохимический реактор, имеющий встроенные датчики оценки состояния, 14 –компрессор, 15 – теплообменник, 16–фильтр/сушилка, 17 – пакетирование

Рис. 4 – Примерная структурная схема процесса получения соединений кобальта с использованием плазмохимического реактора.

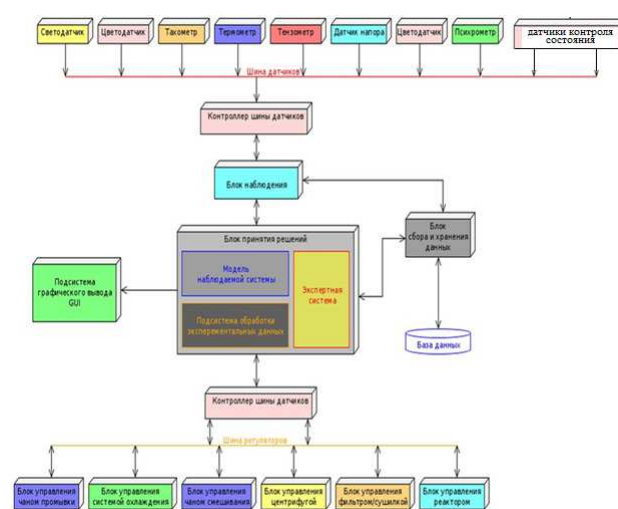


Рис. 5 – Структурная схема системы мониторинга установки для получения соединений кобальта

- формирование сообщений об отклонении параметров от норм технологического регламента;
- формирование и отображение рекомендаций по корректировке технологического процесса на основе значений измеренных параметров;
- предусмотрено архивирование получаемой информации с заданным периодом и отображение архивных данных по запросу.

### Обсуждение результатов

Отметим, что технологические процессы, получения наноразмерных соединений, в том числе порошков, которые обладают уникальными химическими и физическими свойствами, и которые отличаются от свойств материалов в макросостоянии, тем, что очень чувствительны к отступлениям от технологических режимов их получения. Это связано с тем, что именно при уменьшении размеров частиц свойства порошковых материалов существенно меняются и определяются как минимум двумя составляющими: природой материала и размером его частиц. Таким образом, действительно важным

является контроль их получения в реальном времени. Во время проведения лабораторных исследований, связанных с получением наноразмерных соединений особенно ценна возможность проведения системного мониторинга в режиме реального времени, которая позволяет значительно сократить время проведения экспериментальных исследований за счет снятия комплекса параметров. Приведенная структурная схема системы мониторинга химико-технологического оборудования позволяет по мере необходимости подключать дополнительные датчики и блоки. Например, возможно установка камеры для записи процессов, протекающих в реакторе в реальном времени, подключающаяся как автоматически при запуске установки, так и с возможностью отключения по указанию оператора.

При использовании лаборатории для производства небольших партий продукции система данная система позволяет быстро перенастраивать установку, что существенно сокращает время на подготовку и соответственно позволяет более эффективно использовать имеющееся оборудование.

### Выводы

Использование системы компьютерного мониторинга в мини производствах (лабораториях), совмещенных с экспериментальными исследованиями является серьезным подспорьем для максимально эффективного использования имеющегося оборудования. Это особенно актуально для разработок технологий, основанных использовании контактной неравновесной низкотемпературной плазмы.

За счет сокращения времени на исследования и за счет составления более полной картины процесса в результате снятия комплекса характеристик, а также сокращения расхода материалов из-за неправильного функционирования оборудования существенно снижается себестоимость разработки новых технологий.

### Список литературы

1. **Ehrfeld, W.** Microreactors: New technology for modern chemistry/ **W. Ehrfeld, V. Hessel, H. Lehr**// Weinheim: Wiley-VCH. – 2000. – 288 p.
2. **Pieters, B.** The impact of microtechnologies on chemical and pharmaceutical production processes / **B. Pieters, G. Andrieux, J. C. Eloy** // *Chemical Engineering and Technology*. – 2007. – V. 30, №3. – P. 407-409. doi:10.1002/ceat.200600315.
3. **Kano, M.** Data-based and model-based blockage diagnosis for stacked microchemical processes / **M. Kano, T. Fujioka, O. Tonomura, S. Hasebe, M. Noda** // *Chem. Eng. Sci.* – 2007. – 62(4). – P. 1073-1080. doi:10.1016/j.ces.2006.11.011.
4. **Jensen, K. F.** Silicon-based microchemical systems: Characteristics and applications / **K. F. Jensen** // *MRS Bulletin*. – 2006. – 31(2). – P. 101-107. – doi:10.1557/mrs2006.23.
5. **Herder, P. M.** Challenges for process systems engineering in infrastructure design / **P. M. Herder, A. L. Turk, E.**

6. **Subramanian, A. W. Westerberg** // *Comput. Chem. Engg.* – 2000. – №24. – P. 1775-1780. – doi:10.1016/S0098-1354(00)00463-4
7. **Klatt, K.-U.** Perspectives for process systems engineering – Personal views from academia and industry. / **K.-U. Klatt, W. Marquardt** // *Computers and Chemical Engineering*. – 2009. – №33. – P. 536-550. – doi:10.1016/j.compchemeng.2008.09.002.
8. **Fung, K. Y.** Product-centered processing: Pharmaceutical tablets and capsules / **K. Y. Fung, K. M. Ng** // *AIChE J.* – 2003. – №49. – P. 1193-1215. – doi 10.1002/aic.690490512.
9. **Сергеева, О. В.** Характеристики кислородсодержащих соединений кобальта полученных плазмой / **О. В. Сергеева, А. А. Пивоваров** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 12 (1184). – С. 176 - 180. – doi:10.20998/2413-4295.2016.12.26.
10. **Сергеева, О. В.** Получение оксидных соединений металлов в результате обработки водных сред контактной неравновесной плазмой / **О. В. Сергеева, А. А. Пивоваров** // *Технологический аудит и резервы производства.* – 2016. – №2/4(28). – С. 60-63. – doi:10.15587/2312-8372.2016.65419.
11. **Патент на корисну модель №106053 Україна**, МПК (2016.01). Спосіб отримання обводнених з'єднань кобальту. **Сергеева Ольга Вячеславівна, Пивоваров Олександр Андрійович.** (Україна), №u201510970; заявл. 09.11.2015; опубл. 11.04.2016, бюл. № 7.
12. **Пашкевич, М. А.** Экологический мониторинг: Учебное пособие / **М. А. Пашкевич, В. Ф. Шуйский** // Санкт-Петербургский государственный горный институт (ТУ). СПб. – 2002. – 89 с.
13. **Пахомов, А. Н.** Основы моделирования химико-технологических систем: учебное пособие / **А. Н. Пахомов, В. И. Коновалов, Н. Ц. Гагапова, А. Н. Колиух.** – Тамбов : Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та. – 2008. – 80 с.
14. **Olivier - Maget, N.** Model based fault diagnosis for hybrid systems: application on chemical processes/ **N. Olivier-Maget, G. Hetreux, J. M. Le Lann, M. V. Le Lann**// *Computers & Chemical Engineering*. – 2009. – Vol. 33. – №°10. – P. 1617-1630. –DOI:10.1016/j.compchemeng.2009.04.016.
15. **Сергеева, О. В.** Пример решения прямой задачи химической кинетики с использованием средств Mathcad Professional / **О. В. Сергеева, А. А. Пивоваров, О. В. Овчаренко** // *Вопросы химии и химической технологи.* –2009. – №5. – С.166-170.
16. **Гумеров, Ас. М.** Математическое моделирование химико-технологических процессов: Учебное пособие / **Ас. М. Гумеров, Н. Н. Валеев, Аз. М. Гумеров, В. М. Емельянов** // Казан. гос. технол. ун-т. – Казань. – 2006. – 216 с.

### Bibliography (transliterated)

1. **Ehrfeld, W., Hessel, V., & Lehr, H.** Microreactors: New technology for modern chemistry. *Weinheim: Wiley-VCH*, 2000, 288p., doi:10.1002/35276019532.
2. **Pieters, B., Andrieux, G., & Eloy, J. C.** The impact of microtechnologies on chemical and pharmaceutical production processes. *Chemical Engineering and Technology*, 2007, 30(3), 407-409, doi:10.1002/ceat.200600315.
3. **Kano, M., Fujioka, T., Tonomura, O., Hasebe, S., & Noda, M.** Data-based and model-based blockage diagnosis



- for stacked microchemical processes. *Chem. Eng. Sci.*, 2007, **62**(4), 1073-1080, doi:10.1016/j.ces.2006.11.011.
- Jensen, K. F. Silicon-based microchemical systems: Characteristics and applications. *MRS Bulletin*, 2006, **31**(2), 101-107, doi:10.1557/mrs2006.23.
  - Herder, P. M., Turk, A. L., Subramanian, E., Westerberg, A. W. Challenges for process systems engineering in infrastructure design. *Comput. Chem. Engg.*, 2000, **24**, 1775-1780, doi:10.1016/S0098-1354(00)00463-4.
  - Klatt, K.-U., Marquardt W. Perspectives for process systems engineering – Personal views from academia and industry. *Computers and Chemical Engineering*, 2009, **33**, 536-550, doi:10.1016/j.compchemeng.2008.09.002.
  - Fung, K. Y., Ng, K. M. Product-centered processing: Pharmaceutical tablets and capsules. *AIChE J.*, 2003, **49**, 1193-1215, doi:10.1002/aic.690490512.
  - Sergeyeva, O. V., Pivovarov, A. A. Features oxygenated cobalt compounds derived plasma chemical treatment of aqueous solutions. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI". 2016, **12**(1184), 176 - 180, doi:10.20998/2413-4295.2016.12.26.
  - Sergeyeva, O. V., Pivovarov, A. A. Production of metal oxide compounds by treatment of aqueous media contact the non-equilibrium plasmas *Technological audit and production of reserves*, 2016, **2/4**(28), 60-63, doi:10.15587/2312-8372.2016.65419.
  - The patent for utility model №106053 Ukraine, IPC (2016.01). Method flooded cobalt compounds. **Olga V. Sergeev, Alexander A. Pivovarov.** №u201510970; appl. 09/11/2015; publ. 04.11.2016, Bull. Number 7.
  - Pashkevich, M. A., Shuysky, V. F. Environmental monitoring: *Textbook*, Saint-Petersburg State Mining Institute (Technical University). St. Petersburg, 2002, 89 p.
  - Pahomov, A. N., Konovalov, V. I., Pakhomov, A. N., Gatapova N. C., Koliuh, A. N. Fundamentals of modeling of chemical-technological systems: *Textbook.* - Tambov: Publishing House of the Thumb. state. tehn. University Press, 2008, 80 p.
  - Olivier-Maget, N., Hetreux, G., Le Lann, J. M., Le Lann, M. V. (2009). Model based fault diagnosis for hybrid systems: application on chemical processes. *Computers & Chemical Engineering*, 2009, **33**(10), 1617-1630, doi:10.1016/j.compchemeng.2009.04.016.
  - Sergeeva O. V., Pivovarov, A. A., Ovcharenko, O. V. Example of solving the direct problems of chemical kinetics with the use of Mathcad Professional. *Questions of chemistry and chemical technology*, 2009, **5**, 166-170.
  - Gumerov, As. M., Valeev, V. M., Gumerov. Az. M. Yemelyanov, V. Mathematical modeling of chemical-technological processes: *Textbook.* Kasane. state. tehnol. Univ, Kazan, 2006, 216 p.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Сергеева Ольга Вячеславовна** – кандидат технических наук, доцент, Украинский государственный химико-технологический университет, доцент кафедры специализированных компьютерных систем, г. Днепропетровск, Украина; e-mail: ov.sergeeva@mail.ru.

**Sergeyeva Olga** – Candidate of Technical Sciences (Ph. D.), Docent, Associate Professor, Affiliation, Department of specialized computer systems, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, Ukraine, ov.sergeeva@mail.ru

**Пивоваров Александр Андреевич** – доктор технических наук, профессор, Украинский государственный химико-технологический университет, кафедра технологии неорганических веществ и экологии, г. Днепропетровск, Украина; e-mail: apivo@ua.fm

**Pivovarov Alexander** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Department of inorganic matter technology and ecology, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, Ukraine; e-mail: apivo@ua.fm.

**Пиляев Валентин Валентинович** – Украинский государственный химико-технологический университет, студент, кафедра специализированных компьютерных систем, г. Днепропетровск, Украина, e-mail: Superherakle@i.ua

**Pilyaev Valentin** – student, Department of specialized computer systems, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnepropetrovsk, Ukraine; e-mail: Superherakle@i.ua

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Сергеева, О. В.** Разработка системы мониторинга получения кислородсодержащих соединений кобальта плазмохимическим методом / **О. В. Сергеева, А. А. Пивоваров, В. В. Пиляев** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 153-157. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.22.

*Please cite this article as:*

**Sergeyeva, O., Pivovarov, A., Pilyaev, V.** Development of monitoring system for producing oxygen-containing compounds of cobalt by plasm-chemical method. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 153-157, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.22.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Сергеева, О. В.** Розробка системи моніторингу отримання кисневмісних сполук кобальту плазмохімічним методом / **О. В. Сергеева, О. А. Пивоваров, В. В. Пиляев** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 153-157. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.22.

**АНОТАЦІЯ** У даній роботі розглядалася система моніторингу процесу отримання обводнених кисневмісних сполук кобальту з використанням плазмохімічного реактора. Перспективи використання подібних систем пов'язані з появою тенденції до розвитку міні виробництв, що спеціалізуються на виробництві спеціальних хімічних речовин, а також ситуативних проміжних речовин, які мають сталий попит. Відзначено, що використання системи моніторингу для технологій з використанням плазмохімічних процесів в умовах експериментально-дослідної лабораторії, суміщеної з міні виробництвом, дозволяє істотно скоротити час на скорочення досліджень за рахунок зняття комплексу показань співвіднесених з реальним часом процесу.

**Ключові слова:** моніторинг хіміко-технологічних процесів, нерівноважна плазма, рідина, нанорозмірні з'єднання.

*Поступила (received) 08.05.2016*

УДК 663.143.012.44:544.723.22-0.26.71

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.23

## ІНТЕНСИФІКАЦІЯ БІОТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ АЕРОБНОЇ ОБРОБКИ РІДКИХ СУБСТРАТІВ

С. М. БОНДАР<sup>1</sup>, О. Б. ЧАБАНОВА<sup>2</sup>, А. А. ТРУБНІКОВА<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра екології та природоохоронних технологій, ОНАХТ, м.Одеса, УКРАЇНА

<sup>2</sup> Кафедра технології молока, жирів та парфумерно-косметичних засобів, ОНАХТ, м.Одеса, УКРАЇНА

\*email: sn\_bondar@list.ru

**АНОТАЦІЯ** Розглянуто пристрій на базі конічної поверхні що обертається для поліпшення масопереносу між рідиною і газом. За рахунок відцентрової сили на поверхні зануреного конуса формується тонка плівка рідини, що утворює значну площу контакту плівки і газової фази. Встановлено, що масообмін між рідиною і газом стосовно оксигену залежить від швидкості обертання конуса і глибини його занурення. Визначено питомі енерговитрати процесу. Наведено дані щодо піноутворення для даного варіанту пристрою у порівнянні із традиційним ферментером. Проведено математичний аналіз основних залежностей процесу масообміну між рідиною і газом. Запропоновано просту модель, що адекватно відображає сутність процесу.

**Ключові слова:** пристрій, аеробна ферментація, рідкі відходи, піноутворення, масообмін, математичний аналіз

## INTENSIFICATION OF BIOTECHNOLOGICAL AEROBIC PROCESS OF TREATMENT OF LIQUID SUBSTRATES

S. BONDAR<sup>\*1</sup>, O. CHABANOVA<sup>2</sup>, A. TRUBNIKOVA<sup>2</sup>,

<sup>1</sup> Department of ecology and environmental technologies, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of technology of milk, fats and perfumes and cosmetic products, Odessa national Academy of food technologies, Odessa, UKRAINE

\*email: sn\_bondar@list.ru

**ABSTRACT** Considered a device in the form of a conical surface rotating to improve the mass transfer between liquid and gas. Under the action of centrifugal force on the immersed surface of the cone forms a thin liquid pellicle, which forms a significant area of contact between the pellicle and gas phase. Found that the mass transfer between liquid and gas with addition to oxygen depends on the speed of rotation of the cone and the depth of his immersion. Were calculated the specific energy consumption of the process. Investigated the characteristics the flow of pellicle on the surface of the cone. It is established that with increasing speed the pellicle becomes continuous. The immersion depth of the cone significantly affects the angular velocity, which is necessary for the formation of a continuous film. The greater the immersion depth of the cone, the greater the angular velocity required. The obtained experimental data allow to make a good forecast of to use tapered aeration system not only in the open, but also closed fermenters. The concentric arrangement of the cones of rotation will significantly increase the aeration efficiency of various environments, including wastewater. Reported the data regarding the formation of foam for a given embodiment of the device in comparison with a traditional of the fermenter. Conducted mathematical analysis of the common dependencies of the process of mass transfer between liquid and gas. A model is proposed which adequately reflects the essence of the process.

**Keywords:** device, fermentation aerobic, liquid waste, foam formation, mass transfer, mathematical analysis

### Вступ

У аеробних біотехнологічних процесах, що пов'язані з обробкою рідких відходів спосіб аерації має головне значення. Більшість мікроорганізмів не може споживати оксиген безпосередньо з повітря, тому їх забезпечення оксигеном повинне підтримуватись різними зовнішніми засобами [1, 2, 10, 13].

Коли концентрація розчиненого у воді оксигену зменшується, ріст мікроорганізмів швидко втрачає інтенсивність. Розчинність оксигену у більшості біотехнологічних субстратів невисока і складає менше за половину тієї, що у чистій воді. Таким чином забезпечення оксигеном і його ефективне розподілення є факторами, що обмежують

ріст біомаси у рідких субстратах, який визначає ефективність процесу у цілому [2, 4, 7, 14].

Зазвичай обладнання для культивування мікроорганізмів – це ємність, що оснащена мішалкою певної конструкції, арматурою для подачі допоміжних речовин, теплообмінником і елементами для стерильного повітря, яке слугує джерелом оксигену. Витрати енергії в такому разі становлять близько 2 кВт на 1 м<sup>3</sup> рідкого субстрату [8, 9].

У окремих випадках повітря є засобом ефективного газового розподілу і перемішування середовища, наприклад, у ейр-ліфтних системах [2, 9].

Для економічної оцінки ферментації дуже важливо знати, яку частину складають витрати енергії на одиницю перенесеного оксигену, у т. ч. на перемішування. Традиційно апаратура для

перемішування породжує низку проблем, що зменшують активність росту клітин мікроорганізмів. У тому числі процеси аерації і перемішування супроводжується значним піноутворенням, що зменшує корисний об'єм ферментера. Проблема вирішується додаванням хімічних та/або механічних засобів руйнації піни [5, 11, 12].

Хімічні піногасники промислового призначення мають у складі силікони – ефективні речовини, які, однак, суттєво погіршують перенос кисню [1, 3, 4]. Механічні піногасники потребують додаткових енерговитрат, ускладнюють конструкцію ферментера і не завжди можуть бути застосовані для великих об'ємів.

### Мета роботи

Метою представлених досліджень є тестування конструкції, запатентованої свого часу у США [6], і модифікованої авторами для використання у аеробній ферментації рідких відходів у тому числі стічних вод. Представлена робота містить попередні результати випробувань конструкції.

### Виклад основного матеріалу

Потужність двигуна під час обертання вимірювали. Обертання конуса, що занурений у рідину, призводив до утворення тонкої плівки на його поверхні у результаті дії відцентрової та гравітаційної сили. Коли плівка досягала кінця конуса вона зривалася з поверхні і утворювала краплі. Вони досягали стінки зовнішньої ємності, на поверхні якої утворювалася плівка, що падала. Швидкість потоку плівки регулювали і підтримували на певному рівні завдяки підтримуванию рівня рідини у внутрішній ємності, де містився занурений конус. Останній рівень рідини підтримували шляхом подавання рідини з живильної ємності за допомогою насоса. Витрати рідини при цьому контролювали ротаметром. Показання ротаметра фіксували тоді, коли рівень рідини у внутрішній ємності ставав незмінним. Циркуляційний насос подавав рідину у живильну ємність і процес повторювався.

Принципова схема експериментальної установки наведена на рис. 1.

Отриманні експериментальні данні використовували для визначення швидкості потоку рідини при різних швидкостях обертання конуса та його глибини занурення.

У якості об'єкта дослідження використовували дистильовану воду. Визначення концентрації кисню в дослідах проводили тільки для внутрішньої ємності з метою запобігання утворенню значної помилки при визначенні коефіцієнту масопереносу  $K_L$  при контакті «газ-рідина» у зовнішній ємності.

Утворення піни досліджувалось при додаванні до води 0,02% промислової поверхнево-активної

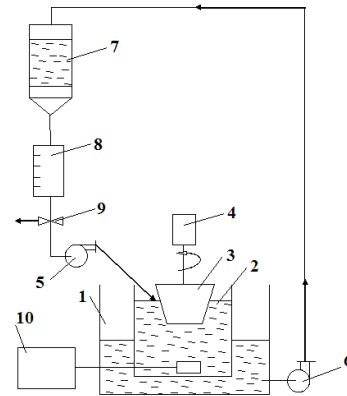


Рис. 1 – Принципова схема експериментальної установки:

1. Зовнішня ємність з рідиною; 2. Внутрішня ємність з рідиною; 3. Конус; 4. Мотор із змінною швидкістю; 5, 6 – насоси; 7. Живильна ємність; 8. Ротаметр; 9. Кран; 10.  $O_2$  метр з датчиком кисню.

речовини Neodol 91-6, що була люб'язно надана для досліджень колегами фірми Юрія-фарм (м.Київ). Досліджуваний об'єкт за піноутворенням порівнювався з традиційним ферментером, що оснащений турбінною мішалкою. При цьому глибина занурення конуса становила 5 см при швидкості обертання  $200 \text{ хв}^{-1}$ . У ферментер з мішалкою повітря надходило зі швидкістю  $1,3 \text{ л/хв}$ . Загальний об'єм рідини у двох випадках дорівнював 5 л.

### Обговорення результатів

На рис. 2 представлено швидкості потоків рідини в залежності від швидкості обертання конуса. До тих пір, поки швидкість не склала  $160 \text{ хв}^{-1}$ , плівка на поверхні конуса не була суцільною і покривала тільки частину поверхні. Діапазон швидкості  $160 \dots 280 \text{ хв}^{-1}$  дав інший ефект. При більших швидкостях виявилось, що витрати енергії зростали інтенсивніше, аніж швидкість потоку плівки, що є негативним фактом.

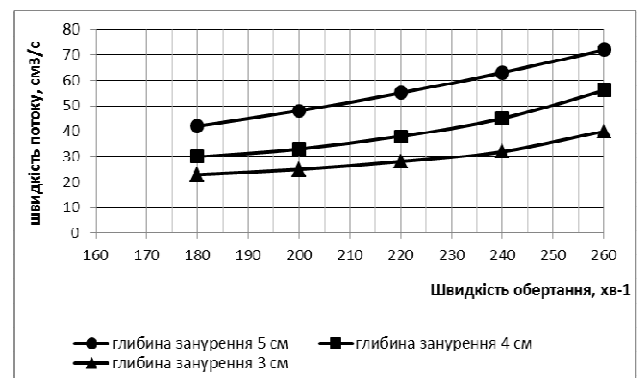


Рис. 2 – Швидкості потоку для конуса, що обертається

Кращі результати спостерігались, коли глибина занурення конуса становила 3...5 см. Глибина, менша за 3 см не давала стабільної плівки на поверхні конуса. Коли глибина занурення ставала більшою за 5 см на поверхні конуса залишалось дуже мало місця для утворення плівки. На поверхні плівки досліджувалось утворення невеликих хвиль спіральної конфігурації.

На рис. 3 представлено дані з переносу кисню при глибині занурення 5 см. Вони свідчать про зростання швидкості переносу кисню із зростанням швидкості обертання конуса.

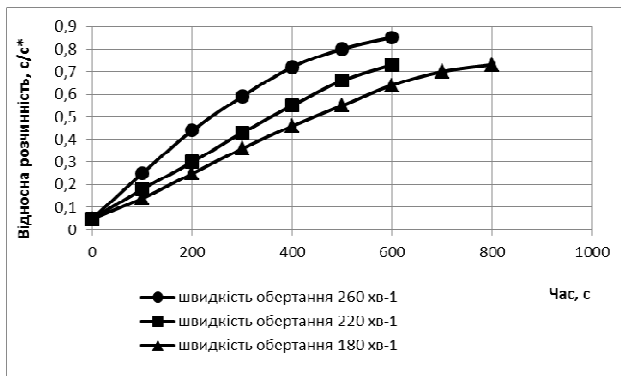


Рис. 3 – Залежність відносної розчинності кисню від часу при різних швидкостях

Отриманні результати можна оцінити за допомогою простої моделі, коли швидкість переносу кисню залежить від опору плівки рідини. Для цього випадку маємо:

$$\frac{dc}{dt} = K_i \times a \times (C^* - C), \quad (1)$$

де  $C$  – концентрація кисню у основному об'ємі рідини;

$C^*$  – рівноважна концентрація кисню на границі «газ-рідина»;

$a$  – поверхня контакту одиниці об'єму рідини;

$K_i$  – коефіцієнт швидкості переносу;

$t$  – час.

За допомогою інтегрування отримаємо наступне рівняння:

$$K_i \times a \times t = -\ln\left(1 - \frac{C}{C^*}\right). \quad (2)$$

На рис. 4 представлено залежності логарифму виразу  $\left(1 - \frac{C}{C^*}\right)$  з часом. У напівлогарифмічних координатах, як бачимо криві стають прямими лініями. Це дозволяє отримати значення  $K_i \times a$  у залежності від їх кута нахилення.

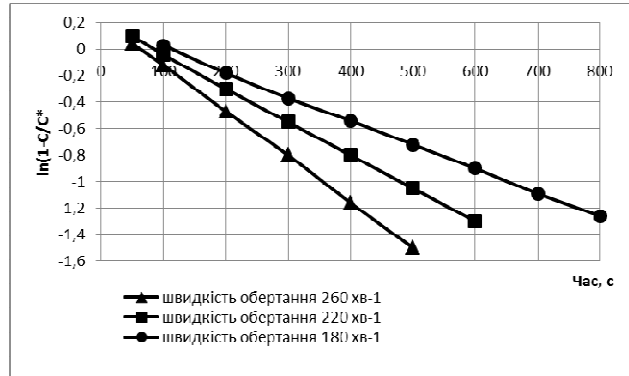


Рис. 4 – Графік для визначення коефіцієнту швидкості масопереносу. Глибина занурення 5 см

Дані енерговитрат, що пов'язані з переносом кисню представлено на рис.5. Вони визначені для трьох глибин занурення. Відносна розчинність кисню для цього випадку є функцією питомих енерговитрат. Графічні залежності доводять, що при глибині 3 см потрібно більше енерговитрат для еквівалентного значення переносу кисню, ніж при 5 см.

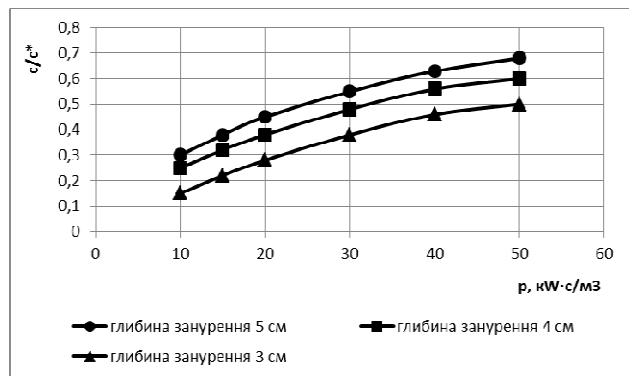


Рис. 5 – Залежність переносу кисню від енерговитрат

Динаміка зростання піни під час експерименту відображена на рис. 6. У випадку традиційного ферментера з газовою турбіною-мішалкою для аерації об'єм піни зростав дуже швидко, тоді коли для конуса це зростання є незначним.

При обертанні зануреного конуса на його поверхні під дією відцентрової сили утворюється плівка, що піднімається і переміщується до верхнього кінця конуса.

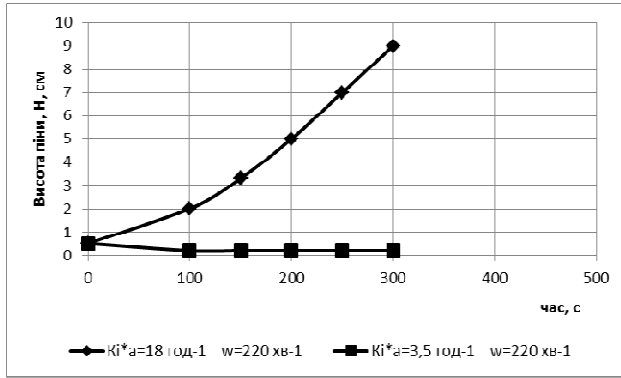


Рис.6 – Порівняльні дані піноутворення: розчин 0,02% Neodol у воді

На рис. 7. представлена принципова схема, що ілюструє дуже спрощений аналіз сил, що впливають на плівку. У стані, коли гравітаційна та відцентрова сила урівноважені, плівка не переміщується. Коли складова відцентрової сили, що паралельна поверхні конуса, перевищить таку ж складову сили гравітації, плівка почне підніматись.

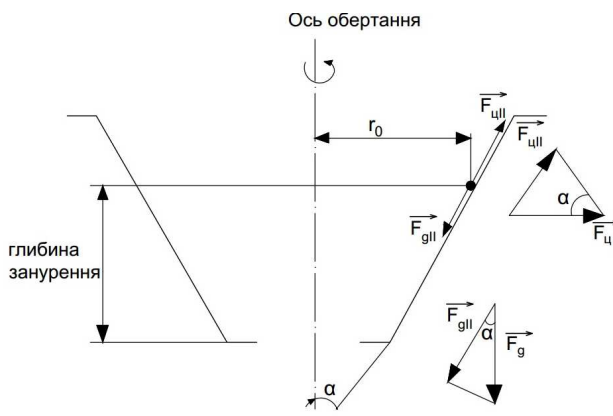


Рис.7 – Схема до аналізу сил, що діють на плівку на поверхні усіченого конуса:

$\alpha$  – напівкут;  $r_0$  – радіус при глибині занурення;

$\vec{F}_{цл}$ ,  $\vec{F}_{г}$  – складові відцентрової та гравітаційної сил, що паралельні поверхні конуса

Таким чином, можна розрахувати критичну кутову швидкість:

$$\begin{aligned} |\vec{F}_{цл}| &= \rho r_0 \times \omega^2 \times \cos(90 - \alpha) \\ |\vec{F}_{г}| &= \rho g \cos \alpha \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} |\vec{F}_{цл}| &= |\vec{F}_{г}| \\ \text{або } \omega_{кр} &= \sqrt{\frac{g \cos \alpha}{r_0 \cos(90 - \alpha)}} \end{aligned} \quad (4)$$

де  $|\vec{F}_{цл}| = \rho r_0 \omega^2$  – відцентрова сила, що впливає на одиницю об'єму;

$|\vec{F}_{г}| = \rho g$  – гравітаційна сила, що діє на одиницю об'єму;

$\vec{F}_{цл}$ ,  $\vec{F}_{г}$  – складові відцентрової та гравітаційної сил, що паралельні поверхні конуса і перпендикулярні окружності конуса у точці розгляду;

$r_0$  – радіус конуса на глибині занурення;

$\alpha$  – напівкут конуса;

$\rho$  – густина рідини;

$\omega$  – кутова швидкість.

За умови, коли відомі глибина занурення конуса і його напівкут, можна обчислити критичну кутову швидкість. Для глибини 5 см  $r_0$  складає близько 8 см. Оскільки напівкут складає  $40^\circ$ , то критичне значення кутової швидкості становитиме  $105 \text{ хв}^{-1}$ . Досліджуване значення цієї величини складає  $160 \text{ хв}^{-1}$ . Значну відмінність обчисленого і досліджуваного значення  $\omega_{кр}$  можна пояснити розподілом рідини у результаті утворення виру у зоні занурення конуса. Розрахунки числа Рейнольдса вказують на те, що плівка знаходиться у стані ламінарного режиму з хвилястою поверхнею, що добре узгоджується з досліджуваними спіральними хвилями.

Розрахунки з масопереносу доводять, що проста модель, що застосована у аналізі, дає пристойні результати. Значення  $K_i \times \alpha$  ( $10 \text{ год}^{-1}$ ) є набагато меншими у порівнянні з наведеними для ферментерів з газовою турбіною ( $400 \text{ год}^{-1}$ ) [1, 4]. Тим не менше, такі ферментери завжди потребують додавання піногасників і фактичні значення  $K_i \times \alpha$  для них є на практиці набагато меншими.

Крім того, випробування конусної конструкції показали, що є три режими масопереносу: плівка, що піднімається по поверхні конуса, плівка, що падає та краплі. Для крапельного режиму слід очікувати найбільшу поверхню контакту одиниці об'єму рідини з газом.

Таким чином, коли змінити геометрію робочого органу так, щоб подовжити крапельний режим і, відповідно, час контакту у крапельному режимі,  $K_i \times \alpha$  може бути суттєво збільшено. Ще більше, коли розмістити декілька конусів концентрично, сумарна площа на одиницю об'єму зросте і  $K_i \times \alpha$  теж збільшиться пропорційно кількості конусів, що розміщається у певному об'ємі.

## Висновки

1. Значення  $K_i \times \alpha$   $10 \text{ год}^{-1}$  було отримано для енерговитрат, менш ніж  $0,2 \text{ kW/m}^3$  для одного конуса апарату, що представлений на рис.1.
2. Загальновідома модель швидкості переносу може бути використана для аналізу переносу кисню.
3. Отримано деякі відмінності, які очікувались через припущення, що концентрація кисню у плівці щільно наближена до концентрації у основному об'ємі. Саме вона вимірювалась кількісно. Таке припущення, однак, правомірне при високій



- відносній розчинності у ємності. При низьких значеннях розчинності воно не правомірне.
- Вивчено характеристики потоку плівки рідини. Встановлено, що при швидкостях обертання до 160 хв<sup>-1</sup> безперервна плівка не утворюється. Із зростанням швидкості плівка стає безперервною.
  - Глибина занурення істотно впливає на кутову швидкість, що необхідна для утворення безперервної плівки. З глибиною це значення стає більшим.
  - Результати досліджень з піноутворення доводять, що використана конструкція практично повністю руйнує піну. Ця перевага може використовуватись і мати значний потенціал для багатьох випадків ферментації.
  - Представлені дані справедливі для конуса, що розміщений у відкритій системі. Однак, цю конфігурацію можна використати і у закритих ферментерах.
  - Розміщення декількох конусів концентрично або каскадно може значно підвищити  $K_L \times a$  і ефективність конструкції у цілому.

Подальша робота авторів спрямована на оптимізацію конструкції проти ефекту розшарування рідини і оптимізацію енерговитрат біореакторів.

#### Список літератури

- Бейли, Дж. Основы биохимической инженерии / Дж. Бейли, Д. Оллис // Пер. с англ. В 2-х част. – ч. 2. – М.: Мир. – 1983. – 550 с.
- Подводзинський, В. М. Класифікація та аналіз роботи ферментерів з пневматичним перемішуванням / В. М. Подводзинський, О. Є. Резенчук, В. Ю. Шибецький // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2011. – №3 – С.79-84.
- Hacking, A. J. Economic aspects of biotechnology / A. J. Hacking // Cambridge university press. – 1996. – 306 p.
- Бекер, М. Е. Биотехнология / М. Е. Бекер, Г. К. Лиепиньш, Е. П. Райпулис. – М.: Агропромиздат. – 1990. – 334 с.
- Кантере, В. М. Основы проектирования предприятий микробиологической промышленности / В. М. Кантере, М. С. Мосичев, М. И. Дорошенко. – М.: Агропромиздат. – 1990. – 304 с.
- Roubicek, R. V. Centrifugal film fermentor / R. V. Roubicek, V. Feres // U.S. Patent Application № 06/897350.
- Сидоренко, О. Д. Биологические технологии утилизации отходов животноводства / О. Д. Сидоренко, Е. В. Черданцев. – М.: МСХА, 2001.
- Виестур, У. Э. Системы ферментации / У. Э. Виестур, А. М. Кузнецов, В. В. Савенков. – Рига: Зинатне. – 1986. – 174 с.
- Сычев, А. Е. Импульсные аппараты и перспектива их использования в биотехнологии / А. Е. Сычев, В. А. Сычев, Г. И. Воробьева, А. И. Заикина, Р. А. Рогачева // Известия Коми научного центра УрО РАН. – Сыктывкар. – 2012. – выпуск 3(11). – С.33-37
- Войнов, Н. А. Улучшение экологичности и повышение эффективности биохимических производств / Н. А. Войнов, Р. А. Степень, С. М. Воронин, Д. В. Буйко // Химия растительного сырья. – 1998. – №1. – С.33-43.
- Сорокіна, К. Б. Технологія переробки та утилізації осадів: навч. посібник / К. Б. Сорокіна, С. Б. Козловська // Харк. нац. акад. міськ. госп-ва. – Х.: ХНАМГ. – 2012. – 226 с.
- Качан, Ю. Г. Математическое моделирование процессов в биогазовой установке / Ю. Г. Качан, Ю. В. Курис, И. Н. Левицкая // Профессиональный журнал «Новость Энергетики», г. Киев. – № 5. – 2009. – С. 24-29.
- McCarty, P. L. Environmental biotechnology: principles and applications / P. L. McCarty. – Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- Garnier, M. Integrated use of GLEAMS and GIS to prevent groundwater pollution caused by agricultural disposal of animal waste / Garnier M. Lo Porto A, Marini R and Leone A // Environmental management. – 1998. – Т. 22. – №. 5. – С. 747-756.

#### Bibliography (transliterated)

- Beili, Dj., Ollis, D. Osnovi biohimicheskoj ingenerii. Per. s angl. V 2-h chas, 1983, 2, 550 p.
- Podvozninskii, V. M., Resenchuck, O. E., Shibetskii, V. U. Klasifikacia ta analiz roboti fermenteriv z pnevmatichnim peretvorenyam [Classification and analysis of fermenters with pneumatic mixing]. Naukovi visti NTUU «KPI», 2011, 3, 79-84.
- Hacking, A. J. Economic aspects of biotechnology. Cambridge university press, 1996. – 306 p.
- Becker, M. E., Myapinsh, G. K., Raypulis, E. P. Biotechnologia, 1990, 334 p.
- Kantere, V. M., Mosichev, M. S., Doroshenko, V. I. Osnovi proektirovaniya predpriatii mikrobiologicheskoi promishlenosti [Fundamentals of microbiological industry enterprises], 1990, 304 p.
- Roubicek, R. V, Feres, V. Centrifugal film fermentor. U.S. Patent Application № 06/897350.
- Sidorenko, O. D., Cherdancev, E. V. Biologicheskie tehnologii utilizacii othodov zivotnovodstva [Biological disposal of animal waste technology], Moskow, MCHA, 2001.
- Viestur, U. E., Kuznecov, A. M., Cavenkov, V. V. Sistemi fermentacii [Fermentation System], Riga, 1986, 174 p.
- Sichev, A. E., Sichev, V. A., Vorobieva, G. I., Zaikina, A. I., Rogacheva, R. A. Impulsnie apparati I perspectiva ih ispolzovania v biotehnologii [Switching devices and the prospect of their use in biotechnology]. Izvestia Komi nauchnogo centra UrO RAN, 3(11), 2012, 33-37.
- Voinov, N. A., Stepen, R. A., Voronin, S. M., Buiko, D. V. Uluchenie ekologichnosti I povishenie effektivnosti biohimicheskikh proizvodstv [Improving the environmental performance and efficiency of chemical production]. Himia rastitelnogo siria, 1998, 1, 33-43.
- Sorokina, K. B., Kozlovskaya, S. B. Tehnologiya pererobki ta utilizacii osadiv [Technology recycling and disposal of sludge, teach. manual]. Hark. Nac. Akadem. Misk. Hosp, 2012, 226 p.
- Kachan, U. G., Kuris, U. V., Levicka, I. N. Matematicheskoe modelirovanie processov v biogazovoi ustanovke [Mathematical modeling of processes in biogas plant]. Professionalnii zurnal «Novost Energetiki» [Professional magazine "Energy News"], 5, 2009, 24 -29.
- McCarty, P. L. Environmental biotechnology: principles and applications, Tata McGraw-Hill Education, 2012.
- Garnier, M., Lo Porto, A, Marini, R., Leone, A. Integrated use of GLEAMS and GIS to prevent groundwater

pollution caused by agricultural disposal of animal waste, Environmental management, 1998, 5(22), 747-756.

**Відомості про авторів (About authors)**

**Бондар Сергій Миколайович** – кандидат технічних наук, доцент кафедри екології та природоохоронних технологій, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039; E-mail: sn\_bondar@list.ru.

**Sergey Bondar** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of ecology and environmental technologies, Odessa national Academy of food technologies, Kanatnaya, 112, Odessa, Ukraine, 65039; E-mail: sn\_bondar@list.ru

**Чабанова Оксана Борисівна** – кандидат технічних наук, доцент кафедри технології молока, жирів та парфумерно-косметичних засобів, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039; E-mail: oksana\_chabanova17@ukr.net.

**Oksana Chabanova** – Candidate of Technical Sciences, Docent, Department of technology of milk, fats and perfumes and cosmetic products, Odessa national Academy of food technologies, Kanatnaya, 112, Odessa, Ukraine, 65039; E-mail: oksana\_chabanova17@ukr.net.

**Трубнікова Анастасія Анатоліївна** – аспірант кафедри технології молока, жирів та парфумерно-косметичних засобів, Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, м. Одеса, Україна, 65039; E-mail: : sc228004@ukr.net.

**Trubnikova Anastasia** – postgraduate of department of technology of milk, fats and perfumes and cosmetic products, Odessa national Academy of food technologies, Kanatnaya, 112, Odessa, Ukraine, 65039; E-mail: sc228004@ukr.net.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Бондар, С. М.** Інтенсифікація біотехнологічного процесу аеробної обробки рідких субстратів / **С. М. Бондар, О. Б. Чабанова, А. А. Трубнікова** // Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 158-163. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.23.

*Please cite this article as:*

**Bondar, S., Chabanova, O., Trubnikova, A.** Intensification of biotechnological aerobic process of treatment of liquid substrates. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, 18 (1190), 158-163, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.23.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Бондарь, С. Н.** Интенсификация биотехнологического процесса аэробной обработки жидких субстратов / **С. Н. Бондарь, О. Б. Чабанова, А. А. Трубникова** // Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 158-163. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.23.

**АННОТАЦИЯ** Рассмотрено устройство на базе вращающейся конической поверхности для улучшения массообмена между жидкостью и газом. Под действием центробежной силы на поверхности погруженного конуса формируется тонкая пленка жидкости, которая образует значительную площадь контакта пленки и газовой фазы. Установлено, что массообмен между жидкостью и газом в отношении кислорода зависит от скорости вращения конуса и его глубины погружения. Определены удельные энергозатраты процесса. Исследованы характеристики потока пленки на поверхности конуса. Установлено, что с ростом скорости вращения пленка становится непрерывной. Глубина погружения конуса существенно влияет на угловую скорость, необходимую для образования непрерывной пленки. Чем больше погружение, тем большая угловая скорость необходима. Полученные экспериментальные данные позволяют сделать хороший прогноз для использования конической системы аэрации не только в открытых, но и закрытых ферментерах. Концентрическое расположение конусов вращения значительно повысит эффективность аэрации различных сред, в том числе сточных вод. Приведены данные по пенообразованию для данного варианта устройства по сравнению с традиционным ферментером. Проведен математический анализ основных зависимостей процесса массообмена между жидкостью и газом. Предложена модель, которая адекватно отображает сущность процесса.

**Ключевые слова:** устройство, аэробная ферментация, жидкие отходы, пенообразование, массообмен, математический анализ

*Надійшла (received) 08.05.2016*



УДК 004.942+574.51

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.24

## ПРИБЛИЖЕННАЯ МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ОБЪЕМА ЗАИЛЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩА – ПРОТОТИПА

**Д. Д. ДУБОВИК**

*Институт технической механики и государственное космическое агентство НАН Украины, Днепропетровск, УКРАИНА.  
\*email: denic3d@gmail.com*

**АННОТАЦИЯ** Анализ состояний больших водоемов важно для общей оценки состояния водоемов. Использование зональных характеристик, информационных технологий, баз данных, позволяет отобразить реальное состояние водоемов. В связи с этим при прогнозировании экологического состояния водохранилища по ограниченной группе экологических показателей можно использовать данные прототипа для исследуемого или проектируемого водохранилища (аналога), которое находится в геосистеме близкой по характерным показателям к геосистеме аналога.

**Ключевые слова:** геосистема, прототип, инфинитезимальное решение, интервал стабильности.

## APPROXIMATE METHOD ESTIMATE OF THE VOLUME OF RESERVOIR SEDIMENTATION – PROTOTYPE

**D. DUBOVYK**

*Institute of engineering mechanics and state space Agency of NAS of Ukraine, Dnepropetrovsk, UKRAINE.*

**ANNOTATION.** Model the prototype can serve as a well-studied body of water or specially created hydraulic structure, so arranged that the entrance was formed by such processes that reflect the processes in the reservoir, which requires the prediction of certain processes, e.g., processes of sedimentation. Analysis of the conditions of the big reservoirs important for an overall assessment of state water bodies. Using zonal characteristics, information technology, database data allows display real status of water bodies. On the basis of reservoir in predicting environmental status for a limited group of environmental indicators can be used for the test of the prototype data or the projected reservoir (analogue), which is in close geosystem the characteristic parameters to geosystem analog. This technique allows to carry out assessments of mol at a predetermined time interval on the basis of experimentally measured specific values of settling of suspensions in water of the reservoir from a known volume of water. The accuracy of estimates is determined by the accuracy of determining the specific amount of precipitation deposited per unit time from the volume of water used. The results will be more accurate, the more accurate will be executed zonal division of the reservoir in determining the quantities of the deposited substances from the respective zones of artificial reservoir.

**Keywords:** geosystem, prototype solution infinitesimal interval of stability.

### Введение

В природопользовании объекты исследования описываются сложными зависимостями природного и социально-экономического характера. В связи с этим при анализе экологических систем часто используют логические методы, которые устанавливают связи между объектами. При системном анализе к числу логических относят методы индукции, дедукции, экспертных оценок и аналогии.

### Постановка задачи

Метод аналогий чаще всего применяют при разработке локальных прогнозов. Так, при прогнозировании экологического состояния водохранилища по ограниченной группе экологических показателей можно использовать данные прототипа для исследуемого или проектируемого водохранилища (аналога), которое находится в геосистеме близкой по характерным показателям к геосистеме аналога.

Моделью-прототипом может служить хорошо изученный водоем или специально созданное гидротехническое сооружение, оборудованное таким образом, чтобы на входе формировались такие процессы, которые отражают процессы в водохранилище, которое нуждается в прогнозе тех или иных процессов, например, процессов заиления. Для выбора значений настраиваемых параметров должны использоваться специально разработанные критерии подобия. В качестве таких критериев могут быть использованы различные относительные характеристики, которые являются ключевыми при исследовании конкретной локальной задачи, соответствующих процессов, протекающих в водохранилище в условиях конкретной геосистемы, включающей водоем, водосборный бассейн,

Оценка процессов заиления требует проведения большого объема различных расчетов: балансовых расчетов (энергии и вещества), характеризующих структуру природных комплексов меньшего ранга (аквасистем, зон, участков, биотопов); разработку моделей (гидравлических, гидрологических); оценки степени антропогенного

воздействия на водоем (внесение вещества в водоем); оценки динамики водоема (путем сравнения результатов измерений, полученных в разные годы). Применение методики изучения седиментационного материала водохранилищ предполагает получение большого количества информации, связанной с оценкой притока наносов из вышерасположенного водохранилища, измерений мутности воды, оценку склонового смыва, вычисление продуктов эолового переноса, отступление берега водохранилища и др. Такой значительный объем работы не всегда может быть практически реализован даже для моделей прототипов.

Второй путь состоит в приближенной оценке объемов наилка в водоеме – прототипе, оседающего на дно ИВ в течение заданного интервала времени. Для этой цели осуществляется зональное разбиение территории водохранилища, которое позволяет вычислить зональные объемы воды с одной стороны и экспериментально определить количество осаждаемого вещества из удельного объема каждой зоны в единицу времени на характерном интервале времени по количеству осадков (сезон, месяц, неделя). Используя модель динамики осадения, можно определить интегральное количество осаждаемого вещества на заданном интервале времени, интегрируя по времени и суммируя объемы осадка по зонам.

При разработке модели динамики заиления в качестве исходных данных будем считать известными контур береговой линии ИВ и профили его донной поверхности. Расчеты привязаны к актуальному уровню поверхности водоема, обычно НПУ. Поэтому в качестве исходных точек отсчета используем данные, соответствующие НПУ [1-4].

Всю директивную поверхность ИВ разобьем аппроксимирующими сечениями на  $2N$  элементарных сечений, каждому из которых соответствует элементарный объем. Каждый элементарный объем  $V_i (i=1, 2N)$  определяется произведением площади  $S_i$   $i$ -го сечения на длину  $l_i$  (вдоль берегов линии вниз по течению), на которой площади сечения приближенно считается постоянной. Площади  $S(l)$  изменяются над полусегментами  $l_1, l_2, \dots, l_i, \dots, l_{2N}$  и принимают значения  $S_i(l)$ . Если

$S_i = const$  над  $l_i$ , то  $S = S_i$  при  $l \leftarrow l_i$ .  $\sum_{i=1}^{2N} l_i = L$ , где

$L$  длина береговой линии, подвергнутая разбиению аппроксимирующей дискретизации. Дискретные элементы длины  $l_i (i=1, 2, \dots, 2N)$  определены следующим образом:

$$l_1 = \{l: l_{11} \leq l \leq l_{12}\} \quad l_2 = \{l: l_{21} \leq l \leq l_{22}\} \quad \dots \quad l_{12} = l_{21} \dots$$

где  $l_{11}, l_{12}$  – границы интервалов  $l_i$ . Площадь сечений  $S_i$  – непрерывные функции длины на интервалах их определения.

С учетом этих определений приближенное выражение для объема водохранилища  $V_n$ , включающего  $n$  элементарных объемов будет иметь вид:

$$V_n = S_n(l_{n2} - l_{n1}) + \dots + S_i(l_{i2} - l_{i1}) + \dots + S_1(l_{12} - l_{11}). \quad (1)$$

Если помнить  $l_{11} = 0$ ,  $l_{(n-1)2} - l_{(n-1)1} = l_{i2} - l_{i1} = \Delta l_i$ , тогда

$$V_n = \sum_{i=1}^n S_i \Delta l_i. \quad (2)$$

Для определения площади сечения  $S_i$  используем методику, основанную на вероятностном подходе (метод Монте-Карло).

Для этой цели впишем сечение водоема в прямоугольник в соответствии с рис. 1.

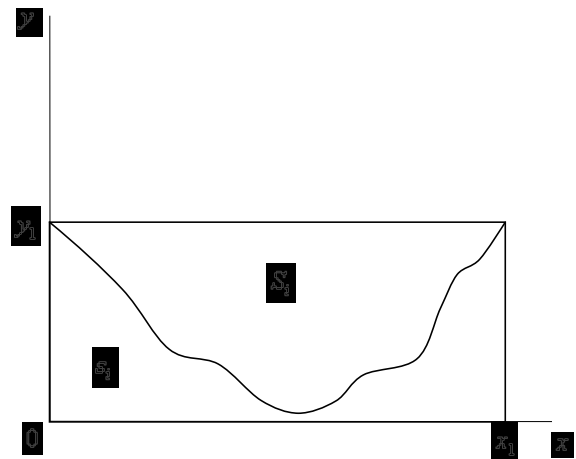


Рис.1 Определение площади сечения ИВ.

Обозначим  $S_i$  площадь описанного прямоугольника. Очевидно:

$$S_i = x_i y_i \quad (3)$$

Используем таблицу случайных чисел для генерации пар чисел  $R$  и  $G$  равномерно распределенных в интервале от 0 до 1. Число  $R$  будет имитировать координату  $x (0 \leq x \leq x_1)$ , число  $G$  будет имитировать координату  $z (0 \leq z \leq z_1)$ .

Статистически гипотеза заключается в том, что количество точек в описанном прямоугольнике  $K_i$  с площадью  $s_i$ , попавших в контур сечения  $k_i$  пропорциональны площади  $S_i$ , то есть

$$k_i / S_i = \frac{K_i}{s_i}, \quad (4)$$

Откуда следует



$\bar{V}_i(t)$  – оценка действий неучтенных факторов на соответствующие компоненты оседаемой массы.

Элементы матрицы  $A_i$  в общем случае непрерывные функции времени на интервалах их определения  $\theta_i$ . Решение этой системы можно искать методом приспособывания или его обобщением с использованием мультипликативных интегралов [9-11].

Рассмотрим случай отсутствия действий неучтенных факторов, то есть положим  $\bar{V}_i(t) = 0$ . Возьмем первые  $n$  уравнений системы (1), тогда квадратная матрица  $X_i$  – матрица системы (1), соответствующий первым  $n$  уравнениям системы ( $n$  зон на различных интервалах  $\theta_j$ ) и начальными условиями  $X_i(0) = E$ .

Разобьем полусегмент  $(t_0, t_k)$  на  $k$  элементов точкам  $t_r (r = 0, 1, \dots, k)$ . Над введенными таким образом элементами определим матрицы  $X_i^{(r)}$ .

Запишется следующим образом [12-13].

$$X_{t_0}^{t_k} = X_{t_{k-1}}^{t_k} \dots X_{t_2}^{t_3} X_{t_0}^{t_1}. \quad (9)$$

В силу малости элементов  $\Delta t_r = t_r - t_{r-1}$  матрицу коэффициентов можно считать постоянной над каждым  $r$ -ым элементом. При этом матрица  $X_{t_{r-1}}^{t_r}$  как решение системы дифференциальных уравнений с постоянными коэффициентами имеет вид

$$X_{t_{r-1}}^{t_r} = e^{A_r \Delta t_r}. \quad (10)$$

Разложив правую часть этого равенства в матричный ряд Тейлора, отбросив члены ряда, имеющие порядок малости выше первого и подставив в (2), получим:

$$X_{t_0}^{t_k} = (E + A_k \Delta t_k) \dots (E + A_2 \Delta t_2) \cdot (E + A_1 \Delta t_1). \quad (11)$$

Предел этого бесконечного произведения при  $\Delta \rightarrow 0$  по определению является мультипликативным интегралом [8]:

$$\int_{t_0}^{t_k} (E + A dt) = \lim_{\Delta t_r \rightarrow 0} (E + A_k \Delta t_k) \dots (E + A_1 \Delta t_1) \quad (12)$$

Используя обозначение начального времени  $t_{j,j-1} = t_0$ , запишем выражение, связывающее значение вектора  $\bar{X}$  в начале и конце интервала  $\Delta t$ :

$$\bar{x}^j = \left\{ \int_{t_{j-1}}^{t_j} (E + A_{j_i} dt) \right\} \bar{x}^{j-1} \quad (13)$$

здесь  $x^j = x(t = t_j)$ .

Пользуясь свойствами мультипликативного интеграла, объединим  $n$  интервалов  $\Delta t$  и получим выражение, связывающее значения вектора  $\bar{x}$  в

начале и конце  $j$ -го интервал  $T_j$  ( $j$ -го полусегмента оси времени  $\theta_j$ ):

$$\bar{x}^j = \left\{ \prod_{i=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} (E + A_{j_i} dt) \right\} \bar{x}^{j-1}, \quad (14)$$

где  $\bar{x}^{j-1}, \bar{x}^j$  – значения вектора  $\bar{x}$  соответственно в начале и конце интервала времени  $T_j$ .

Для последовательности  $m$  интервалов, пронумерованных в порядке  $j = 1, 2, \dots, m$ , получим выражение

$$\bar{x}^m = \left\{ \prod_{j=1}^m \prod_{i=1}^n \int_{t_{j-1}}^{t_j} (E + A_{j_i} dt) \right\} \bar{x}^0, \quad (15)$$

где  $\bar{x}^0$  – значение вектора  $\bar{x}$  в начале периода  $T_1$ .

Выражение (14) содержит мультипликативный интеграл, на основе которого построено инфинитезимальное исчисление. Решение (14) поэтому называют инфинитезимальным. Такое решение удобно использовать для кусочно-линейных систем, особенно для систем кусочно-постоянных, которым в периоды стабильности соответствует состояние ИВ. Использование такого решения предполагает знание постоянных матриц  $A_i$ , которые определяют распределение различных составляющих оседающей массы в соответствующих зонах (условиях) ИВ. Эти значения определяются на основе лабораторного анализа проб воды, взятых в соответствующих зонах ИВ и в соответствующие периоды времени [9].

Если  $\bar{v}(t) \neq 0$ , то значение вектора  $\bar{x}$  на  $r$ -ом интервале времени имеет вид

$$\bar{x}^r = \bar{x}(t_r) = X_r^t(A) \bar{x} \left[ t_{r-1} + \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_0, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau \right]. \quad (16)$$

Здесь  $k(t_0, \tau)$  – матрица Коши,  $(k(t_0, \tau) = X(A)_{t_0}^t [X_{t_0}^t(A)]^{-1})$ . Подставив в (10) выражение для  $\bar{x}(t_{r-1})$ , а в  $\bar{x}(t_{r-1})$  выражение  $\bar{x}(t_{r-2})$  и т.д., получим

$$\left\{ \begin{aligned} \bar{x}^r &= \prod \bar{x}(t_0) + \prod_{r-1} J^1 + \prod_{r-2} J^2 + \dots + \prod_2 J^{r-2} + \prod_1 J^{r-1} + J^r \\ &\text{где } \prod_r = X_{t_{r-1}}^{t_r} \dots X_{t_0}^{t_1}; \\ &\quad \prod_{r-1} = X_{t_{r-1}}^{t_r} \dots X_{t_1}^{t_2}; \\ &\dots\dots\dots \\ &\quad \prod_1 = X_{t_{r-1}}^{t_r}; \\ &J_1 = \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_1, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau, \dots, J^r = \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_r, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau. \end{aligned} \right. \quad (17)$$

Используя понятие мультипликативного интеграла, выражение (11) запишем в виде:

$$x = \left[ \int_{t_0}^{t_r} (E + Adt) \right] x(t_0) + \int_{t_0}^{t_r} (E + Adt) \int_{t_0}^{t_1} k(t_1, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau + \dots + \int_{t_{r-1}}^{t_r} (E + Adt) \int_{t_{r-1}}^{t_r} k(t_{r-1}, \tau) \bar{v}(\tau) d\tau. \quad (18)$$

Здесь  $k(t_r, \tau) = X_{t_{r-1}}^{t_r} [X_{t_{r-1}}^{\tau}]^{-1}$ .

Данная методика позволяет провести оценки объемов наилка на заданном интервале времени на основе экспериментально измеренных удельных значений оседающих взвесей в воде водоема из известного объема воды. Точность оценок определяется точностью определения объема удельных осадков осаждаемых в единицу времени из использованного объема воды. Результаты будут тем точнее, чем точнее будет выполнено зональное деление водоема при определении количеств осаждаемого вещества из соответствующих зон ИВ.

### Список литературы

1. Матарзин, Ю. М. Вопросы морфометрии и районирования водохранилищ / Ю. М. Матарзин, И. К. Мацкевич // *Вопросы формирования водохранилищ и их морфометрия*. Пермь: Изд-во Перм.ун-та. – 1970. – 92 с.
2. Матарзин, Ю. М. Гидрологические процессы в водохранилищах / Ю. М. Матарзин, Б. Б. Богословский, И. К. Мацкевич // Пермь: Изд-во ПГУ. – 1977. – 87 с.
3. Браславский, А. П. Расчет ветровых волн / А. П. Браславский // *Труды ГГИ*. – 1952. – вып. 35(89). – С. 94-158.
4. Браславский, А. П. Указания по расчету испарения с поверхности водоемов / А. П. Браславский / Л.: Гидрометеиздат. – 1969. – 92 с.
5. Браславский, А. П. Расчет минерализации воды в водохранилищах / А. П. Браславский // *Гидрохимические материалы*. – 1961. – Т.32.
6. Гантмахер, Ф. В. Теория матриц / Ф. Р. Гантмахер. – М.: Наука. – 1967. – 575 с.
7. Матарзин, Ю. М. Вопросы морфометрии и районирования водохранилищ / Ю. М. Матарзин, И. К. Мацкевич // *Вопросы формирования водохранилищ и их морфометрия*. Пермь: Изд-во Перм. ун-та. – 1970. – 92 с.
8. Родионов, И. В. О свойствах оценки Хилла экстремального индекса для выборок с загрязнениями / И. В. Родионов // *Сибирский журнал индустриальной математики*. – 2014. – № 1. – С. 3-6.
9. Пинигин, Д. Д. Оценка качества воды водохранилища Нерюнгринской ГРЭС / Д. Д. Пинигин, Н. А. Николаева, Т. А. Салова, М. И. Ксенофонтowa // *География и природные ресурсы*. – 2011. – № 5. – С. 37-39.
10. Потапская, Н. В. Оценка накопления отходов потребления в прибрежной зоне озера Байкал и дельте реки Селенги / О. А. Тимошкин, Е. П. Зайцева, А. В. Непокрытых, В. В. Мальник // *География и природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 62-69.
11. Селиванова, Д. А. Элементный состав почв и донных отложений водотоков восточного макросклона Приполярного Урала / Д. А. Селиванова // *География и*

*природные ресурсы*. – 2016. – № 1. – С. 87-93.

12. Дубовик, Д. Д. Об оценке стойкости русла р. Днепр в системе водохранилищ // Д. Д. Дубовик / *Международная междисциплинарная конференция молодых ученых «Шевченковская весна»: тезисы докладов*. Киев. – 2015. – С. 73.
13. Дубовик, Д. Д. Расчет заиливания каскада Днепровского водохранилища с помощью ГИС технологии (на примере устья р. Орель) / Д. Д. Дубовик // *Актуальные вопросы ядерно-химических технологий: тезисы докладов*. Севастополь. – 2013. – С. 106.

### Bibliography (transliterated)

1. Maturin, Y. M., Matskevich, I. K. Voprosy morfometrii i rayonirovaniya vodokhranilishch [Questions morphometry and zoning of reservoirs]. *Voprosy formirovaniya vodokhranilishch i ikh morfometriya [Questions of formation of reservoirs and morphometry]*, Perm: Publishing house Perm.University, 1970, 92 p.
2. Maturin, Y. M., Bogoslovsky, B. B., Matskevich, I. K. Gidrologicheskie protsessy v vodokhranilishchakh [Hydrological processes in reservoirs]. *Perm: Publishing house of the technical training College*, 1977, 87 p.
3. Braslavsky, A. P. Raschet vetrovykh voln [Calculation of wind waves]. *Proceedings of the state hydrological Institute*, 1952, 35(89), 94-158.
4. Braslavsky, A. P. Ukazaniya po raschetu ispareniiya s poverkhnosti vodoemov [Guidelines for the calculation of evaporation from the surface of bodies of water], *Leningrag: Gidrometeoizdat*, 1969, 92 p.
5. Braslavsky, A. P. Raschet mineralizatsii vody v vodokhranilishchakh [Calculation of mineralization of water in the reservoirs], *Hydrochemical materials*, 1961, 32.
6. Gantmakher, F. Teoriya matrits [Theory of matrices], Moscow: Nauka, 1967, 575 p.
7. Maturin, Y. M., Matskevich, I. K. Voprosy morfometrii i rayonirovaniya vodokhranilishch [Questions morphometry and zoning of reservoirs]. *Voprosy formirovaniya vodokhranilishch i ikh morfometriya [Questions of formation of reservoirs and morphometry]*, Perm: Publishing house Perm. University, 1970, 92 p.
8. Rodionov, I. V. O svoystvakh otsenki Khilla ekstremalnogo indeksa dlya vyborok s zagryazneniyami [Properties of evaluation index for Hill's extreme pollution samples]. *Sibirskiy zhurnal industrial'noy matematiki [Siberian Journal of Industrial Mathematics]*, 2014, 1, 3-6.
9. Pinigin, D., Nikolaev, N., Salova, T., Ksenofontova, M. Otsenka kachestva vody vodokhranilishcha Neryungrinskoy GRES [Evaluation of the water quality of the reservoir Neryungrin GRES]. *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2011, 5, 37-39.
10. Timoshkin, O. A., Zaytseva, E. P., Nepokrytykh, A. V., Mal'nik, V. V. Otsenka nakopleniya otkhodov potrebleniya v pribrezhnoy zone ozera Baykal i del'te reki Selengi [Estimation of accumulation of domestic waste in the coastal zone of Lake Baikal and the Selenga River delta] *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2016, 1, 62-69.
11. Selivanova, D. Elementnyy sostav pochv i donnykh otlozheniy vodotokov vostochnogo makrosklona Pripolyarnogo Urala [The elemental composition of soils and sediment of watercourses eastern macro-Polar Urals] *Geografiya i prirodnye resursy [Geography and natural resources]*, 2016, 1, 87-93.

12. **Dubovik, D.** Ob otsenke stoykosti rusla r. Dnepr v sisteme vodokhranilishch [An estimate of the channel resistance p. Dnieper reservoir system], *Mezhdunarodnaya mezhdistsiplinarnaya konferentsiya molodykh uchenykh «Shevchenkovskaya vesna»: tezisy dokladov [Interdisciplinary International Conference of Young Scientists "Shevchenko Spring": abstracts]*, Kyiv, 2015, 73 p.
13. **Dubovik, D.** Raschet zailivaniya kaskada Dneprovskogo vodokhranilishcha s pomoshch'yu GIS tekhnologii (na primere ust'ya r. Orel') [Calculation of siltation Dnieper cascade reservoirs using GIS technology (for example, the mouth of the river. Eagle)]. *Aktual'nye voprosy yadernokhimicheskikh tekhnologiy: tezisy dokladov [Topical issues of nuclear and chemical technologies: abstracts]*. Sevastopol, 2013, 106 p.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Дубовик Денис Дмитриевич** – аспирант, Институт технической механики и государственное космическое агентство НАН Украины, ул. Ляшко-Попеля 15, г. Днепрпетровск, Украина, 49005, тел.: 0679563038, e-mail: denic3d@gmail.com.

**Dubovyk Denis** – post-graduated student. Institute of engineering mechanics and state space Agency of NAS of Ukraine, tel.: 0679563038, e-mail: denic3d@gmail.com.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Дубовик, Д. Д.** Приближенная методика оценки объема заиления водохранилища – прототипа / **Д. Д. Дубовик** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серия: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 164-169. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.24.

*Please cite this article as:*

**Dubovyk, D.** Approximate method estimate of the volume of reservoir sedimentation – prototype. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 164-169, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.24.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Дубовик, Д. Д.** Наближена методика оцінки обсягу замулення водосховища – прототипу / **Д. Д. Дубовик** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 164-169. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.24.

**АНОТАЦІЯ** Аналіз станів великих водойм важливо для загальної оцінки стану водойм. Використання зональних характеристик, інформаційних технологій, баз даних, дозволяє відобразити реальний стан водойм. У зв'язку з цим при прогнозуванні екологічного стану водосховища по обмеженій групі екологічних показників можна використовувати дані прототипу для досліджуваного або проектного водосховища (аналога), яке знаходиться в геосистемі близькою за характерними показниками до геосистемі аналога.

**Ключові слова:** геосистема, прототип, інфінітезимальне рішення, інтервал стабільності.

*Поступила (received) 15.05.2016*

УДК 663.837.1

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.25

## УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ГІРКИХ НАСТОЯНОК ЗА ДОПОМОГОЮ МАТЕМАТИКО-СТАТИСТИЧНИХ МЕТОДІВ ДОСЛІДЖЕНЬ

**Н. В. ПОПОВА<sup>\*1</sup>, Т. Г. МИСЮРА<sup>2</sup>, А. В. РИБАЧОК<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Кафедра експертизи харчових продуктів, Національний університет харчових технологій, м. Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup>Кафедра процесів і апаратів харчових виробництв, Національний університет харчових технологій, м. Київ, УКРАЇНА

\*e-mail: natalkn@mail.ru

**АНОТАЦІЯ** В статті представлено новий спосіб виробництва гірких настоянок, який полягає в екстрагуванні водою пряно-ароматичної сировини з подальшим концентруванням екстрактів та купажуванні з водно-спиртовою сумішшю. Режими виробництва уточнювалися за допомогою експериментально-статистичних методів математичного моделювання. Було підібрано оптимальні режими проведення процесу екстрагування сировини для отримання основних складових настоянки та забезпечення її високої якості. При цьому готова настоянка проявлятиме загальнозміцнюючий ефект на організм людини та матиме короткі терміни виробництва.

**Ключові слова:** гіркі настоянки, процес екстрагування, гідромодуль, тривалість, вітамін С, фенольні сполуки, математико-статистичні методи дослідження.

## IMPROVEMENT TECHNOLOGY OF PRODUCTION OF BITTER TINCTURES THROUGH THE MATHEMATICAL AND STATISTICAL METHODS OF RESEARCHES

**N. POPOVA<sup>\*1</sup>, T. MISYURA<sup>2</sup>, A. RYBACHOK<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Department of Foodstuff Expertise, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup>Department of Processes and Apparatus for Food Production, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

\*e-mail: natalkn@mail.ru

**ABSTRACT** Object. Improvement of technology of production of bitter tinctures, which will provide short spaces of production, also bitter tinctures will show the high biological value of drink and a positive effect on the human organism.

Design. Methodology. Approach. By a basic instrument improvements in this work is mathematic-statistical methods of researches and program STATISTICA 6.0ru.

Essence of method of production of bitter is tinctures consists in the following. At first dry powders spicily aromatic raw material does release from different admixtures and separately extract water at permanent interfusion and temperature 40°C with subsequent filtration and concentration to the set maintenance of dry matters. The next technological stage is mix of extracts with an alcohol to durability 40% at. The eventual stage of production is mix of extracts and solution of honey. For a receipt and analysis of experimental data, the multivariable experiment of type was planned 2<sup>2</sup> and 3<sup>n</sup> and the used methods of determination of vitamin C and phenolic compounds. For processing of experimental data used experimentally statistical methods of mathematical design.

Conclusions. Thus, made the optimum values of correlation and duration of process of extracting accordingly for to the cardamom 14,5 and 83 minutes; for a ginger – 13 and 70 minutes ; for a pepper bitter 17 and 92 minutes.

**Keywords:** bitter tinctures, process of extracting, correlation, duration, vitamin C, phenolic compounds, mathematic-statistical research methods

### Вступ

Гіркі настоянки є алкогольними напоями, які одержують шляхом купажування екстрактів (настоїв) різноманітної корисної сировини. Вони мають гіркуватий, гіркувато-пряний або пекучий смак. При виробництві гірких настоянок використовують рослинну пряно-ароматичну сировину, таку як аніс, шкірки цитрусових, гвоздику, коріандр, імбир, калган, зубрівку, кардамон, перець чорний та червоний і багато іншого. Пряно-ароматична сировина проявляє антиоксидантні та загальнозміцнюючі властивості, що говорить про сенс її використання у лікєро-горілчаній промисловості. Головним технологічним етапом класичного виробництва гірких настоянок є

настоювання за допомогою 2-х зливів протягом 14дб [1].

### Мета роботи

Виходячи з вище наведеного, метою роботи є удосконалення технології виробництва гірких настоянок, що забезпечить короткі терміни виробництва, високу біологічну цінність напою. Такі гіркі настоянки проявлятимуть загальнозміцнюючий ефект на організм людини. Основним інструментом удосконалення способу та уточнення режимів екстрагування в даній роботі є математико-статистичні методи досліджень та програма STATISTICA 6.0Ru.



### Викладення основного матеріалу

STATISTICA – це система для статистичного аналізу даних, яка включає широкий набір аналітичних процедур і методів: більше 100 різних типів графіків, описові та внутрішньогрупові статистики, кореляції, швидкі, основні та блокові статистики, Т-критерії, таблиці частот, аналіз багатомірних відгуків, множинна регресія, непараметричні статистики, загальна модель дисперсного і коваріаційного аналізу тощо. Модулі серії STATISTICA основані на самих сучасних технологіях, повністю відповідають останнім досягненням в області ІТ-технологій, дозволяють вирішувати будь-які задачі в області аналізу і обробки даних, ідеально підходять для вирішення практичних задач в харчовій промисловості.

У літературних джерелах існує різна інформація щодо параметрів та умов проведення процесу екстрагування пряно-ароматичної сировини. Так є приклад проведення екстракції протягом 20 хв за умови інтенсифікації процесу збільшенням ступеня подрібнення сировини до розмірів частинок 0,5...1,0 мм і проведенням екстрагування при постійному перемішуванні суміші, що екстрагується. Співвідношення об'єму екстрагенту до маси сировини (дм<sup>3</sup>/кг) складає 20 : 1 [2-3].

В інших дослідженнях наголошено на можливості отримання якісного екстракту з максимальним вилученням ефірних олій способом ремацерації. При цьому процес проводився у два етапи: при першому заливі концентрація водно-спиртової суміші складала 50 % об., розмір частинок сировини – 20 мм, співвідношення сировина:водно-спиртова суміш – 1:10, тривалість настоювання – 10 діб; при другому заливі міцність водно-спиртової суміші складає 30 % об., тривалість – 3-5 діб [4].

У нашій роботі при виборі компонентів гіркої настоянки ми керувалися органолептичними показниками та хімічним складом пряно-ароматичної сировини. Так кардамон – спеція з теплим пряним ароматом і приємним лимонним смаком. До складу спеції входять ефірні олії (4-7%), кальцій, калій, магній, вітаміни С та РР. Імбир – пряність із вираженим ароматом за рахунок вмісту ефірних олій (1,5-3%) та гостротою, так як містить фенол подібну речовину – гінгерол. До складу імбиру входить також ряд макро- та мікроелементів, вітамінів – холін та вітамін С. А перець червоний гіркий особливий за рахунок вмісту вітаміну С та алкалоїдоподібного аміду – капсаїцину, що надає плоду сильного пекучого смаку.

Отже, використання обраної пряно-ароматичної сировини, а саме перцю червоного гіркого, кардамону та імбиру, дозволить отримати продукт для покращення обміну речовин в організмі, підвищення апетиту і тонуусу шлунково-кишкового тракту, із радіопротекторними, імуномодуючими та антиоксидантними властивостями з поліпшеними

органолептичними показниками за рахунок гармонійного поєднання всіх інгредієнтів [5].

Суть розробленого нами способу виробництва гірких настоянок полягає в наступному. Спочатку сухі порошки пряно-ароматичної сировини звільняють від різних домішок і окремо екстрагують водою при постійному перемішуванні і температурі 40°C з подальшим фільтруванням і концентруванням до заданого вмісту сухих речовин. Наступним технологічним етапом є купажування екстрактів зі спиртом до міцності 40% об. Кінцевим етапом виробництва є купажування екстрактів і розчину меду. Готова гірка настоянка фільтрується і розливається в пляшки. Принципово-технологічна схема виробництва гірких настоянок представлена на рис.1. [6, 7].

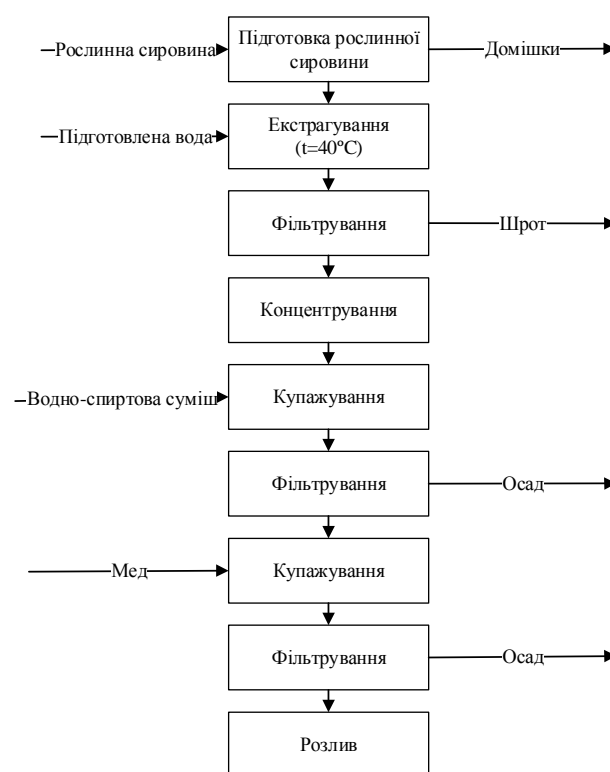


Рис. 1 – Принципово-технологічна схема виробництва гірких настоянок

Процес екстрагування є одним з головних у технології гірких настоянок. Він полягає у вилученні з пряно-ароматичної сировини цільових компонентів за допомогою екстрагенту (води). На проходження даного процесу впливає безліч факторів, таких як гідромодуль, тривалість тощо [1, 7, 8].

У розробленому способі заміну водно-спиртової суміші підготовленою водою можна пояснити тим, що при екстрагуванні водою виходить більша кількість вітаміну С, також під час купажування є можливість кращого збагачення вітаміном С готової настоянки, завдяки концентруванню отриманих екстрактів. Одночасно

виключаються витрати спирту на екстрагування сировини [7 – 10].

Спираючись на раніше проведені дослідження нами було сформульовано такі висновки щодо режимів отримання екстрактів. Тривалість процесу екстрагування має забезпечувати максимальний вихід біологічно активних речовин. Проведення процесу екстрагування більше 120 хв недоцільно так як, при цьому екстракти забруднюються супутніми сполуками, швидкість дифузії яких значно менша, ніж у біологічно активних речовин. А тривалість менше 40 хв не дає максимального вилучення біологічно активних речовин [6].

Підтримання гідромодуля нижче 10 є недоцільним так як під час проходження процесу екстрагування відбувається істотне набухання сировини і значно зменшується кількість екстрагенту при цьому, а гідромодуль вище 20 застосовувати не раціонально через значне розведення екстракту водою.

Температура 40°C пришвидшить процес екстрагування та збереже вітамін С, який містить рослинна сировина. Температура нижче 35°C не забезпечить повного вилучення біологічно активних речовин, а температура вище 45 °C посприє руйнуванню вітаміну С [6].

При перемішуванні швидкість екстрагування збільшується, так як зменшується шар нерухомої рідини та створюються конвективні потоки, що сприяють перенесенню речовини в екстрагент [5,6].

### Обговорення результатів

Визначивши, які фактори впливають на вміст фенольних сполук та вітаміну С в екстрактах пряно-ароматичної сировини, ми знайшли їх рівні варіювання, які наведені у табл.1 та побудували матрицю двохфакторного експерименту.

Таблиця 1 – Рівні варіювання факторів

Фактор	0-рівень	Верхній рівень «+»	Нижній рівень «-»
Гідромодуль	15	20	10
Тривалість, хв	80	120	40

Для отримання та аналізу експериментальних даних був спланований багатфакторний експеримент (ПФЕ) типу 2<sup>2</sup> та використані математико-статистичні методи досліджень та методи визначення вмісту вітаміну С та фенольних сполук. Для обробки даних використовували експериментально-статистичні методи математичного моделювання. З метою знаходження оптимальних значень параметрів процесу був спланований і реалізований план експерименту типу 3<sup>n</sup> для отримання рівняння регресії другого порядку.

За допомогою програми STATISTICA 6.0Ru було спрогнозовано і знайдено оптимальні значення

гідромодуля та тривалості процесу екстрагування, що забезпечують найкращий вміст вітаміну С та фенольних сполук в екстрактах з пряно-ароматичної сировини.

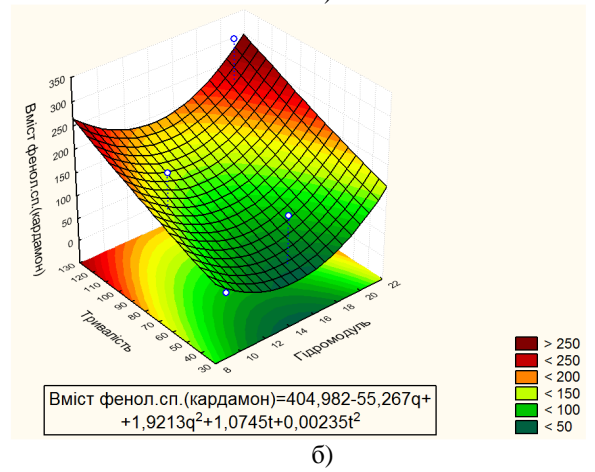
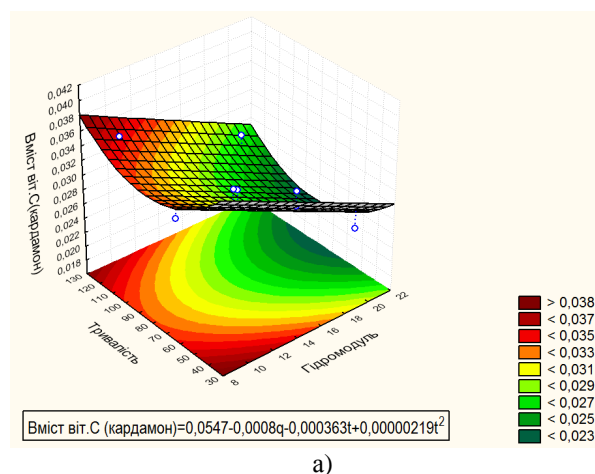
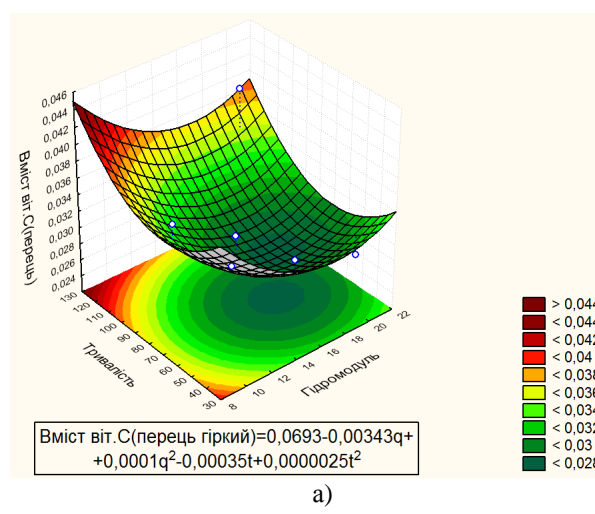
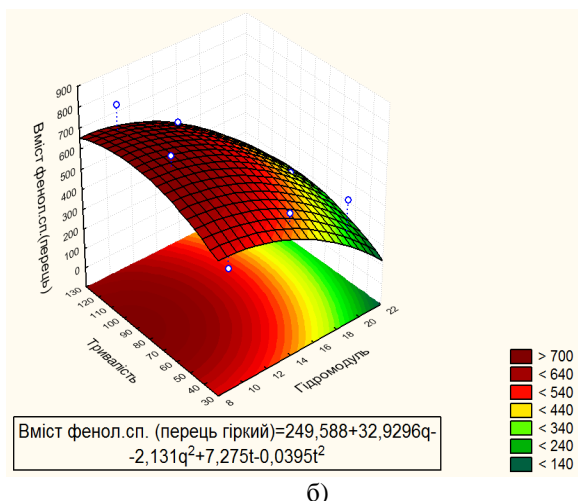


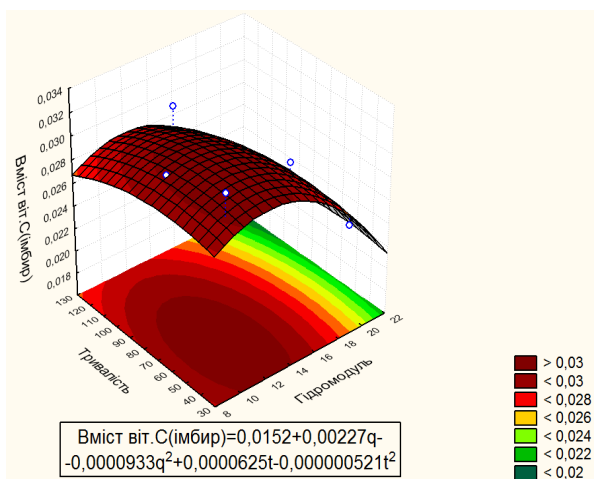
Рис.2 – Поверхні відгуку залежності вмісту вітаміну С (а) та фенольних сполук (б) від гідромодуля та тривалості в екстракті з кардамону



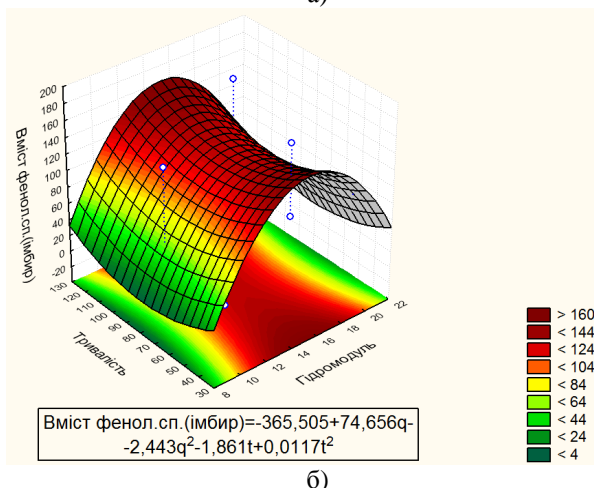


б)

Рис.3 – Поверхні відгуку залежності вмісту вітаміну С (а) та фенольних сполук (б) від гідромодуля та тривалості в екстракті з перця червоного гіркого



а)



б)

Рис.4 – Поверхні відгуку залежності вмісту вітаміну С (а) та фенольних сполук (б) від гідромодуля та тривалості в екстракті з імбиру

Сумісне співставлення значень основних факторів по кожному цільовому компоненту дало

зможу визначити оптимальні значення параметрів процесу екстрагування для кожного виду сировини.

Таким чином, оптимальні значення гідромодуля та тривалості процесу екстрагування склали відповідно для кардамону 14,5 та 83 хв (рис.2); для перцю гіркого 17 та 92 хв (рис.3) ; для імбиру – 13 та 70 хв (рис.4).

## Висновки

Було проаналізовано сучасні наукові досягнення в досліджуваній темі, розглянуто хімічний склад компонентів гіркої настоянки, представлено новий спосіб виробництва гіркої настоянки, застосовано сучасні методи та програми обробки даних для отримання оптимальних режимів проведення процесу екстрагування сировини.

Отримані результати досліджень можна ефективно застосувати в лікєро-горілчаній промисловості для отримання високоякісних напоїв, які б характеризувалися високою біологічною цінністю. Одночасно з тим можна зменшити витрати спирту на екстрагування сировини та скоротити терміни виробництва настоянок.

## Список літератури

1. Домарецький, В. А. Технологія харчових продуктів / В. А. Домарецький, М. В. Остапчук, І. А. Українець. – К.: НУХТ. – 2003. – 318 с.
2. Осипова, Л. А. Функціональні напої на основі пряно-ароматического рослинного сир'я / Л. А. Осипова, Л. В. Капельнянц // *Пищ. промышленность* – 2007. – №9. – С. 74-75.
3. Zavalov, V Development of mathematical models of external mass exchange under conditions of vibroextraction from vegetable raw materials / V. Zavalov, V. Bodrov, T. Misyura, N. Popova, Y. Zaporozhets, V. Dekanskiy // *Chemistry and Chemical Technology*. – 2015. – Volume 9, Issue 3. – P. 367-374.
4. Gutierrez, I. H. Phenolic composition and magnitude of copigmentation in young and shortly aged red wines made from the cultivars, Cabernet Sauvignon, Cencibel and Syrah / I. Hermosin Gutierrez, E. Sanchez-Palomo Lorenzo, A. Vicario Espinosa // *Food Chemistry*. – 2005. – № 92. – С. 269-283. – doi:10.1016/j.foodchem.2004.07.023.
5. Knöss, W. Community Herbal Monograph on Gentian lutea L., Radix / W. Knöss, F. Stolte // *European Medicines Agency, London, UK*. – 2009.
6. Рибачок, А. В. Інтенсифікація процесу екстрагування при виробництві гірких настоянок / А. В. Рибачок, В. М. Чорний, Т. Г. Мисюра, Н. В. Попова // *ОНАХТ: Наукові праці*. – 2015. – №47. – С. 75-78.
7. Патент UA № 106057. Спосіб виробництва гіркої настоянки / Попова Н. В., Мисюра Т. Г., Рибачок А. В., Чорний В. М. Опуб. 11.04.2016.
8. Kemper, F. H. ESCOP Monographs. The Scientific Foundation for the Herbal Medicinal Products / F. H. Kemper // *Thieme*, Stuttgart, Germany, 2nd edition. – 2003.
9. Olivier, D. K. Bitterness values for traditional tonic plants of southern Africa / D. K. Olivier, B.-E. van Wyk // *Journal of Ethnopharmacology*. – 2013. – vol. 147, no. 3. – P. 676-679. – doi: 10.1016/j.jep.2013.03.059.

10. **Heinrich, M.** Fundamentals of Pharmacognosy and Phytotherapy / **M. Heinrich, J. Barnes, S. Gibbons, E. M. Williamson** // *Churchill Livingstone*, Edinburgh, UK, **2nd edition**. – 2012.

#### Bibliography (transliterated)

- 1 **Domaretskiy, V. A., Ostapchuk, M. V., Ukrainets, I. A.** Tehnologiya harchovih produktiv [Food Technology], Kyiv: NUHT, 2003, 318 p.
- 2 **Osipova, L. A., Kaprelyants, L.V.** Funktsionalnye napitki na osnove pryano- aromaticeskogo rastitelnogo syrya [Functional drinks based pryano- aromatic vegetable raw materials], *Pishch. promyshlennost [Food Technology]*, 2007, **9**, 74-75.
- 3 **Zavialov, V., Bodrov, V., Misyura, T., Popova, N., Zaporozhets, Y., Dekanskiy, V.** Development of mathematical models of external mass exchange under conditions of vibroextraction from vegetable raw materials. *Chemistry and Chemical Technology*. 2015, **3(9)**, 367-374.
- 4 **Gutierrez, I. H., Lorenzo E. Sanchez-Palomo, Espinosa A. Vicario** Phenolic composition and magnitude of copigmentation in young and shortly aged red wines made from the cultivars, Cabernet Sauvignon, Cencibel and Syrah.

- Food Chemistry*, 2005, **92**, 269-283, doi:10.1016/j.foodchem.2004.07.023
- 5 **Knöss, W., Stolte, F.** Community Herbal Monograph on *Gentiana lutea L., Radix*, European Medicines Agency, London, UK, 2009.
  - 6 **Ribachok, A. V., Chorniy, V. M., Misyura, T. G., Popova N. V.** Intensifikatsiya protsesu ekstrahuvannya pri virobnitstvi girkih nastoyanok [The intensification of the extraction process in the production of bitter liqueurs]. *ONAHT: Naukovi pratsi*, 2015, **47**, 75-78.
  - 7 **Patent UA № 106057.** Sposib virobnitstva girkoyni nastoyanki / **Popova N. V., Misyura T. G., Ribachok A. V., Chorniy V. M.** Opub. 11.04.2016.
  - 8 **Kemper, F. H.** ESCOP Monographs. The Scientific Foundation for the Herbal Medicinal Products, *Thieme*, Stuttgart, Germany, 2nd edition, 2003.
  - 9 **Olivier, D. K. and B.-E. van Wyk** Bitterness values for traditional tonic plants of southern Africa. *Journal of Ethnopharmacology*, 2013, **3(147)**, 676-679, doi:10.1016/j.jep.2013.03.059.
  - 10 **Heinrich, M., Barnes, J., Gibbons, S., Williamson, E. M.** Fundamentals of Pharmacognosy and Phytotherapy, *Churchill Livingstone*, Edinburgh, UK, **2nd edition**, 2012.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Попова Наталія Вікторівна** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри експертизи харчових продуктів; м. Київ, Україна; e-mail: natalkn@mail.ru

**Popova Natalia** - Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate professor, Department of examination of food products, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: natalkn@mail.ru

**Мисюра Тарас Григорович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний університет харчових технологій, доцент кафедри процесів і апаратів харчових виробництв; м. Київ, Україна; e-mail: taras\_as@i.ua

**Misyura Taras** - Candidate of Technical Sciences, Docent, Associate professor, Department of processes and vehicles of food productions, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: taras\_as@i.ua

**Рибачок Альбіна Вікторівна** – магістрант, Національний університет харчових технологій, магістрант кафедри експертизи харчових продуктів; м. Київ, Україна; e-mail: ryb-albina@yandex.ru

**Rybachok Albina** – student (master), Department of examination of food products, National University of Food Technologies, Kyiv, Ukraine; e-mail: ryb-albina@yandex.ru

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Попова, Н. В.** Удосконалення технології виробництва гірких настоянок за допомогою математико-статистичних методів досліджень / **Н. В. Попова, Т. Г. Мисюра, А. В. Рибачок** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 170-174. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.25.

*Please cite this article as:*

**Popova, N., Misyura, T., Rybachok, A.** Improvement technology of production of bitter tinctures through the mathematical and statistical methods of researches. *Bulletin of NTU “KhPI”. Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU “KhPI”, 2016, **18** (1190), 170-174, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.25.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Попова, Н. В.** Усовершенствование технологии производства горьких настоек с помощью математико-статистических методов исследований / **Н. В. Попова, Т. Г. Мисюра, А. В. Рибачок** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серія: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 170-174. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.25.

**АННОТАЦИЯ** В статье представлен новый способ производства горьких настоек, который заключается в экстрагировании водой пряно-ароматического сырья с последующим концентрированием экстрактов и купажировании с водно-спиртовой смесью. Режимы производства уточнялись с помощью экспериментально статистических методов математического моделирования. Были подобраны оптимальные режимы проведения процесса экстрагирования сырья для получения основных составляющих настойки и обеспечения ее высокого качества. При этом готовая настойка будет проявлять общеукрепляющий эффект на организм человека и иметь короткие сроки производства.

**Ключевые слова:** горькие настойки, процесс экстрагирования, гидромодуль, время, витамин С, фенольные соединения, математико-статистические методы исследования

Надійшла (received) 14.05.2016

УДК 664.87

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.26

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОСМОТИЧЕСКОГО ОБЕЗВОЖИВАНИЯ НА КАЧЕСТВО КАРТОФЕЛЬНЫХ ЧИПСОВ

*Е. А. КОВАЛЕНКО<sup>1\*</sup>, В. Н. КОВБАСА<sup>1</sup>, Б. В. ГРЕБЕНЬ<sup>1</sup>, В. Ю. НАГОРНЫЙ<sup>1</sup>, Т. Н. КУПРИЯНОВА<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Кафедра технологии хлебопекарных и кондитерских изделий, Национальный университет пищевых технологий, г. Киев, УКРАИНА

<sup>2</sup> Институт картофелеводства Национальной академии аграрных наук Украины, г. Киев, УКРАИНА

\*email: alenkala@ukr.net

**АННОТАЦИЯ** Картофельные чипсы – высококалорийный продукт, а чрезмерное потребление жира приводит к ожирению человека. Поэтому задача состоит в получении продукта с низким содержанием жира, так как чрезмерное содержание жира ухудшает качество картофельных чипсов. Важным фактором, способствующим снижению жира в чипсах, есть содержание сухих веществ в картофеле и одним из способов их повышения является обрабатывание ломтиков картофеля раствором соли (осмотическое обезвоживание) перед обжариванием.

**Ключевые слова.** Картофельные чипсы, картофель, осмотическое обезвоживание, концентрация соли.

## STUDY OF OSMOTIC DEHYDRATION ON QUALITY POTATO CHIPS

*E. KOVALENKO<sup>1\*</sup>, V. KOVBASA<sup>1</sup>, B. GREBEN<sup>1</sup>, V. NAGORNYI<sup>1</sup>, T. KUPRIYANOVA<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Department of Technology of bakery and confectionery products, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE.

<sup>2</sup> Potato Institute of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine, Kyiv, UKRAINE.

**ABSTRACT** Wide potato popularity among consumers helped to expand the range of products from it and increase its processing methods. Currently, there is an active development of such product groups as a semi-finished and ready-to-eat potato products. This is due to the fact that modern man has changed the attitude to the diet and eating habits.

Potato chips - high-calorie foods, and excessive fat intake leads to obesity man. An important parameter in the manufacture of chip technology has fat consumption, from which depends largely on the cost price of the finished product, as well as utility consumption. Therefore, the problem consists in obtaining a product with low fat content because excessive fat content degrades the quality of chips. One important factor contributing to the reduction of fat, is the maximum density of the potato, which is associated with solids in it. Method of increasing the solids content in the potato is a treat potato slices brine (osmotic dehydration) before frying. Osmotic dehydration of potato was carried out in the petals salt solutions with a concentration of 2, 4, 6, 8, 10, and 12% were placed at 5, 10, 15 minutes at various concentrations of saline solution whose temperature was  $20 \pm 2$  °C. When finding the potato slices sided diffusion process occurs in saline solution in which displaces located in the intercellular space of moisture and thus increases the amount of solids. According to the regression equation obtained in its natural form, the amount of absorbed fat is reduced by increasing the solids content of the potato slices while in the saline solution. For values of length of time of 10 min, the concentration of 4% brine and slice thickness of 1.5 mm (specific surface area of 10.7 - 14.0 cm<sup>2</sup>). The amount of absorbed fat is the least.

**Keywords.** Potato chips, potato, osmotic dehydration, the salt concentration.

### Введение

Картофель – по – настоящему важная культура, которая выращивается в 150 странах мира в различных почвенно-климатических зонах и является универсальным продуктом питания. Он пользуется большим спросом у населения, его потребляют больше 3 млрд. людей. По масштабам производства картофель занимает четвертое место после главных пищевых сельскохозяйственных культур – пшеницы, риса и кукурузы. Ежегодно в мире производят до 350 млн. т картофеля, 52% этого объема приходится на развивающиеся страны, где он является важным источником пищи, рабочих мест и доходов [ 7 ].

Широкая популярность картофеля у потребителей способствовала расширению ассортимента продуктов из него и увеличению способов его переработки. В настоящее время

наблюдается активное развитие таких товарных групп как полуфабрикаты и готовые к употреблению картофелепродукты. Это связано с тем, что у современного человека изменилось отношение к рациону и образу питания.

В Украине и за рубежом в группу обжаренных картофелепродуктов входят картофельные чипсы, которые являются готовым к употреблению обжаренным продуктом и вырабатываются в виде ломтиков. Это высококалорийный продукт, удобен для употребления в пищу на «ходу», а также в качестве гарнира к мясным блюдам, закуска к различным сокам и другим напиткам.

### Цель работы

Важным показателем в технологии изготовления чипсов есть расход жира, от чего во

многом зависит себестоимость готового продукта, а также полезность его потребления. Картофельные чипсы – высококалорийный продукт, а чрезмерное потребление жира приводит к ожирению человека. Поэтому задача состоит в получении продукта с низким содержанием жира, так как чрезмерное содержание жира ухудшает качество картофельных чипсов (имеют не привлекательный вид, маслянистый вкус и слипаются в упаковке) [5, 14-17, 6, 521-528].

#### Изложение основного материала

Одним из важных факторов, способствующих снижению жира, является максимальная плотность картофеля, которая связана с содержанием сухих веществ в нем. Повышение содержания сухого вещества в клубнях на 1% может увеличить выход чипсов на 14 кг с каждой тонны сырья, снизить содержание жира на 1,62% [1, 89-91]. Использование картофеля с содержанием сухого вещества 20 – 24% обеспечивает высокий выход готового продукта с низким содержанием жира и более сухой консистенцией, а с содержанием менее 20% – с влажной консистенцией [2, 40-43, 3, 256, 4, 156-160].

Полученные результаты в Институте картофелеводства национальной академии аграрных наук Украины, показали, что химический состав клубней зависит не только от сорта, а также и от

условий выращивания. Клубни разных сортов картофеля формируют в тот или иной год определенное количество сухих веществ, крахмала и редуцирующих сахаров.

Одним из способов повышения сухих веществ в картофеле является обрабатывание ломтиков картофеля раствором соли (осмотическое обезвоживание) перед обжариванием [11, 307-312, 12, 989-997, 13, 770-780].

Осмоз – процесс односторонней диффузии через полупроницаемую мембрану молекул растворителя в сторону большей концентрации растворенного вещества из объема с меньшей концентрацией растворенного вещества.

Осмозическое обезвоживание лепестков картофеля проводили в растворах соли с концентрацией 2, 4, 6, 8, 10, 12 %. Учитывая результаты предыдущих исследований [8, 140-141], лепестки картофеля сорта Киммерия нарезали на слайсере фирмы «Bosch» с удельной поверхностью 10,7 – 14,0 см<sup>-1</sup> (толщина ломтиков 1,5 – 2,0 мм) и помещали на 5, 10, 15 минут в разную концентрацию солевого раствора, температура которого составляла 20±2 °С. Лепестки картофеля обжаривали во фритюре при температуре 160°С и определяли вкусовые качества картофельных чипсов. Результаты исследований представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Влияние осмотического обезвоживания лепестков картофеля на вкусовые качества чипсов

Время, мин.	Концентрация солевого раствора, %	Вкусовые качества чипсов
5	2	Не соленые
	4	Мало соленые
	6	Средне соленые
	8	Соленые
	10	Очень соленые
	12	Очень соленые
10	2	Мало соленые
	4	Средне соленые
	6	Соленые
	8	Очень соленые
	10	Очень соленые
	12	Очень соленые
15	2	Мало соленые
	4	Соленые
	6	Соленые
	8	Очень соленые
	10	Чрезмерно соленые
	12	Чрезмерно соленые

Как видно с таблицы 1, время нахождения лепестков картофеля в солевом растворе влияет на вкусовые качества чипсов. При продолжительности процесса осмотического обезвоживания 5 и 10 минут наблюдаются лучшие вкусовые качества в чипсах, чем при 15 минутах во всех концентрациях солевых

растворов. Поэтому для дальнейших исследований обрабатывали лепестки картофеля в концентрации солевого раствора в течении 5 и 10 минут.

Следующим этапом исследования было определение влияния осмотического обезвоживания на содержание сухих веществ в картофеле. Данные предоставлены в таблице 2.



Таблиця 2 – Влияние осмотического обезвоживания на содержание сухих веществ в лепестках картофеля

Время, мин.	Концентрация солевого раствора, %	Содержание сухих веществ, %
5	0	17,4±1,0
	2	18,3±1,0
	4	20,1±1,2
	6	21,2±1,2
	8	22,7±1,2
	10	23,5±1,5
	12	23,9±1,5
10	0	17,4±1,0
	2	19,9±1,0
	4	21,8±1,2
	6	21,9±1,2
	8	23,9±1,2
	10	24,3±1,5
	12	24,6±1,5

Проведение эксперимента показало, что при увеличении концентрации солевого раствора с 2 до 12 % при продолжительности 5 минут количество сухих веществ в лепестках картофеля изменилось с 17,42 до 23,91 %, а при 10 минутах – с 17,42 до 24, 63%. Принимая во внимание вкусовые качества ( один из важных показателей ), а также содержание сухих веществ, для получения продукта высокого качества целесообразнее использовать 4 и 6 % концентрацию солевого раствора.

Для определения оптимальных параметров проведения процесса осмотического обезвоживания, таких как продолжительность выдерживания

ломтиков, концентрация солевого раствора и толщина картофельных ломтиков. В общем виде функцию можно представить так [9, 10]:

$$Y = f(X_1, X_2, X_3). \quad (1)$$

Где:

- Y – количество поглощенного жира, %;
- X1 – концентрация солевого раствора, %;
- X2 – продолжительность, мин.;
- X3 – толщина ломтика, мм.

По результатам эксперимента получили регрессионное уравнение, предварительно предусмотрев справедливость линейной модели в виде:

$$Y = B_0 + B_1 \times X_1 + B_2 \times X_2 + B_3 \times X_3 + B_4 \times X_1 \times X_2 + B_5 \times X_1 \times X_3 + B_6 \times X_2 \times X_3 + B_7 \times X_1 \times X_2 \times X_3. \quad (2)$$

Где B<sub>0</sub>, B<sub>1</sub>, B<sub>2</sub>, B<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>, B<sub>5</sub>, B<sub>6</sub>, B<sub>7</sub> – коэффициент регрессии.

Для проведения опытов составили матрицу планирования эксперимента с указанными числами

опытов и пределами изменения факторов. Матрица представляет собой перечень вариантов, взятых в данной серии опытов.

Таблиця 3 – Уровни и шаг варьирования

Показатель/Параметр	X <sub>1</sub> , %	X <sub>2</sub> , хв	X <sub>3</sub> , мм
Нулевой уровень	5,0	7,5	1,5
Верхний уровень	6,0	10,0	2,0
Нижний уровень	4,0	5,0	1,0
Интервал варьирования	1,0	2,5	0,5

Проверку однородности дисперсий средних значений S<sub>y1</sub><sup>2</sup> рассчитали согласно критерию Кохрена:

$$S_{y1}^2 = \frac{1}{m-1} \sum Y_{срe} - Y_n^2. \quad (3)$$

После расчета коэффициентов уравнение регрессии принимает вид:

$$Y = 34,43 - 0,55 \cdot X_1 - 0,81 \cdot X_2 - 1,04 \cdot X_3 - 0,062 \cdot X_1 \cdot X_2 + 0,03 \cdot X_1 \cdot X_3 - 0,2 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,095 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

Для оценки существенности коэффициентов регрессии определяли значение критерия Стьюдента и адекватности процесса коэффициентов Фишера.

Полученная математическая модель, адекватная процесса выдерживания картофельных ломтиков в солевом растворе:

$$Y = 33,43 + 0,55 \cdot X_1 - 0,81 \cdot X_2 - 1,04 \cdot X_3 - 0,2 \cdot X_2 \cdot X_3 - 0,1 \cdot X_1 \cdot X_2 \cdot X_3.$$

X<sub>1</sub> – концентрация солевого раствора, %;



$X_2$  – продолжительность процесса выдерживания ломтиков, мин.;

$X_3$  – толщина ломтика, мм.

Таблица 4 – Результаты экспериментов

Номер эксперимента	$Y_1, \%$	$Y_2, \%$	$Y_3, \%$	$Y_{\text{ср}}, \%$	$S_{y1}^2$
№1	35,81	35,90	35,83	35,85	0,002
№2	34,77	34,60	34,55	34,64	0,013
№3	34,45	34,00	34,20	34,22	0,051
№4	33,10	33,20	33,12	33,14	0,003
№5	33,61	33,65	33,50	33,59	0,006
№6	32,80	32,90	32,87	32,86	0,003
№7	32,16	32,25	32,31	32,24	0,006
№8	30,90	30,90	30,85	30,88	0,001

### Выводы

При нахождении ломтиков картофеля в солевом растворе происходит процесс односторонней диффузии при котором раствор вытесняет находящуюся в межклеточном пространстве влагу и тем самым увеличивает количество сухих веществ. Согласно полученного уравнения регрессии в натуральном виде, количество поглощенного жира будет уменьшаться за счет увеличения сухих веществ в картофельных ломтиках во время нахождения в солевом растворе. При значениях продолжительности нахождения 10 мин., концентрации солевого раствора 4% и толщине ломтика 1,5 мм (удельная поверхность 10,7 – 14,0 см<sup>-1</sup>) количество поглощенного жира является наименьшей.

### Список литературы

- 1 **Кожушко, Н. С.** Технологічна оцінка картоплі на придатність до промислової переробки / **Н. С. Кожушко, М. Д. Гончаров** // *Пропозиція*. – 2001. – № 12. – С. 89-91.
- 2 **Лисогор, О. А.** Сировина для виробництва картопляних чіпсів / **О. А. Лисогор, В. М. Ковбаса, Т. М. Купріянова** // *Збірник наукових праць НААН України; Інститут продовольчих ресурсів НААН України*. – К.: ННЦ «ІАЕ». – 2014. – №3 – С. 40-43.
- 3 **Коршунова, А. В.** Качество картофеля и картофелепродуктов. – М. – 2001. – 256 с.
- 4 **Кравченко, О. М.** Хіміко-технологічна оцінка нових сортів і гібридів картоплі селекції СДАУ при переробці на чіпси // *Картоплярство*. – К.: Нора-Прінт. – 2000. – Вип. 30. – С. 156-160.
- 5 **Pravisani, C. I.** Minimum cooking time for potato strip frying / **C. I. Pravisani, A. Calvelo** // *Journal of Food Science*. – 1986. – №51. – 614-17. – doi:10.1111/j.1365-2621.1986.tb13892.x.
- 6 **Dobarganes, M. C.** Interactions between fat and food during deep frying / **M. C. Dobarganes, G. Marquez-Ruiz, J. Velasco** // *European Journal of Lipid Science and Technology*. – 2000. – № 102. – P. 521-28. – doi:10.1002/1438-9312(200009)102:8/9<521::AID-EJLT521>3.0.CO;2-A.
- 7 Kartoffeln für Pommes und Chips [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: [http://orgprints.org/8714/1/kartoffeln\\_f%C3%BCr\\_pommes.pdf](http://orgprints.org/8714/1/kartoffeln_f%C3%BCr_pommes.pdf)
- 8 **Мазур, А. М.** Влияние процесса осмотического обезвоживания кусочков картофеля на качество готового

продукта / **А. М. Мазур, Т. В. Прохорцова** // *Техника и технология пищевых производств: тез. Докл. VI Междунар. науч.-техн. Конференции. УО «Могилевский государственный университет продовольствия»*. – Могилев. – 2007. – С. 140-141.

- 9 **Юрчак, В. Г.** Оптимізація та вдосконалення технологічних процесів галузі / **В. Г. Юрчак** // *Конспект лекцій для студентів спеціальності 7.091702 «Технологія хліба, кондитерських, макаронних виробів і харчоконцентратів» денної форми навчання*. – К.: НУХТ. – 2002. – 64 с.
- 10 **Грачев, Ю. П.** Математические методы планирования экспериментов / **Грачев Ю. П.** – М.: Пищевая промышленность. – 1979. – 200 с.
- 11 **Santis, N.** Soaking in a NaCl solution produce paler potato chips / **N. Santis, F. Mendoza, P. Moyano, F. Pedreschi, P. Dejmeck** // *LWT – Food Sci. and Technol.* – 2007. – Vol. №2. – P. 307-312. – doi:10.1016/j.lwt.2005.09.020.
- 12 **Pedreschi, F.** Color kinetics and acrylamide formation in NaCl soaked potato chips / **F. Pedreschi, O. Bustos, D. Mery, P. Moyano, K. Kaack, K. Grandy** // *J. Food Eng.* – 2007. – Vol. 79, №3. – P. 989-997. – doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.03.020.
- 13 **Nath, A.** High temperature short time fir puffed ready-to-eat (RTE) potato snacks: Prosser parameter optimization / **A. Nath, P. K. Chattopadhyay** // *J. Food*. – 2007. – Vol. 80, №3. – P. 770-780. – doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.07.006.

### Bibliography (transliterated)

- 1 **Kozhushko, N. S., Goncharov, M. D.** *Technologichna ocinka kartopli na pry'datnist' do promy'slovoi pererobky* [Process evaluation on potato suitability for industrial processing]. *Propozytsiya [Proposal]*, 2001, 12, 89-91.
- 2 **Ly'sogor, O. A., Kovbasa, V. M., Kupriyanova, T. M.** *Sy'rovny'na dlya vy'robny'cztva kartoplyany'x chipsiv* [Raw materials for the production of potato chips]. *Zbirny'k naukovy'x prac'z' NAAN Ukrayiny'; Insty'tut prodovol'chy'x resursiv NAAN Ukrayiny' [Proceedings of NAAS of Ukraine; NAAS Institute of Food Resources Ukraine]*, Kyiv, NNCz «IAE», 2014, 3, 40-43.
- 3 **Korshunova, A. V.** *Kachestvo kartofelja i kartofeleproduktov* [Quality of potatoes and potato products], Moscow, 2001, 256 p.
- 4 **Kravchenko, O. M.** *Khimiko-technologichna ocinka novy'h sortiv i gibry'div kartopli selekciyi SDAU pry' pererobci na chipsy'* [Chemical and technological assessment of new varieties and hybrids of potato breeding GARDEN on the processing chips]. *Kartoplyarstvo [Potato]*, Kyiv: Nora-Print, 2000, 30, 156-160.

- 5 **Pravisani, C. I., Calvelo, A.** Minimum cooking time for potato strip frying. *Journal of Food Science*, 1986, **51**, 614-17.
- 6 **Dobarganes, M. C., Marquez-Ruiz, G., Velasco, J.** Interactions between fat and food during deep frying. *European Journal of Lipid Science and Technology*, 2000, **102**, 521-528, doi:10.1002/1438-9312(200009)102:8/9<521::AID-EJLT521>3.0.CO;2-A.
- 7 Kartoffeln für Pommes und Chips [Web]. – 2005, [http://orgprints.org/8714/1/kartoffeln\\_f%C3%BCr\\_pommes.pdf](http://orgprints.org/8714/1/kartoffeln_f%C3%BCr_pommes.pdf).
- 8 **Mazur, A. M., Prohorcova, T. V.** Vlijanie processa osmoticheskogo obezvozhivaniya kusochkov kartofelja na kachestvo gotovogo produkta [Influence of the process of osmotic dehydration of potato slices on the quality of the finished product]. *Tehnika i tehnologija pishhevyyh proizvodstv: tez. Dokl. VI Mezhdunar. Nauch.-tehn. Konfirencii [Technique and technology of food production: mes. Dokl. VI Intern. scientific and engineering. Conference]*, Mogilev, 2007, 140-141.
- 9 **Yurchak, V. G.** Opty`mizaciya ta vdoskonalennya tehnologichny`x procesiv galuzi [Optimize and improve industry processes] *Konspekt lekcij dlya studentiv special`nosti 7.091702 "Tehnologiya hliba, kondy`ters`ky`h, makaronny`h vy`roviv i harchokconcentrativ" dennoyi formy` navchannya [Lecture for students specializing 7.091702 "Technology of bread, pastry, pasta and food concentrates" full-time ]*, Kyiv: NUXT, 2002, 64 p.
- 10 **Grachev Ju. P.** Matematicheskie metody planirovaniya jekspirimentov [Mathematical methods for design of experiments], *Moskow: Pishhevaja promyshlennost' [Food processing industry]*, 1979, 200 p.
- 11 **Santis, N., Mendoza, F., Moyano, P., Pedreschi, F., Dejmek, P.** Soaking in a NaCL solution produce paler potato chips. *LWT – Food Sci. and Technol*, 2007, **2**, 307-312, doi:10.1016/j.lwt.2005.09.020.
- 12 **Pedereschi, F., Bustos, O., Mery, D., Moyano, P., Kaack, K., Grandy, K.** Color kinetics and acrylamide formation in NaCL soaked potato chips. *J. Food Eng*, 2007, **79**(3), 989-997, doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.03.020.
- 13 **Nath, A., Chattopadhyay, P. K.** Higt temperature short time fir puffed ready-to-eat potato snacks: Prosser parameter optimization. *J. Food*, 2007, **80**(3), 770-780, doi:10.1016/j.jfoodeng.2006.07.006.

#### Сведения об авторах (About authors)

**Коваленко Елена Артуровна** – аспирант, кафедра технологии хлебопекарных и кондитерских изделий, Национальный университет пищевых технологий. E-mail: alenkala@ukr.net;

**Kovalenko Elena Arturovna** – graduate student, Department of Technology of bakery and confectionery products, National University of Food Technologies. Address: Str. Vladimirska 68, Kyiv, Ukraine, 01601. E-mail: alenkala@ukr.net;

**Ковбаса Владимир Николаевич** – док. техн. наук, проф., кафедра технологии хлебопекарных и кондитерских изделий, Национальный университет пищевых технологий. Адрес: ул. Владимирская 68, г. Киев, Украина, 01601;

**Kovbasa Vladimir Nikolaevich** – Doctor of Technical Sciences, Department of Technology of bakery and confectionery products, National University of Food Technologies. Address: Str. Vladimirska 68, Kyiv, Ukraine, 01601;

**Гребень Богдан Владимирович** – студент, кафедра технологии хлебопекарных и кондитерских изделий, Национальный университет пищевых технологий. Адрес: ул. Владимирская 68, г. Киев, Украина, 01601;

**Hreben Bogdan Vladimirovich** – undergraduate, Department of Technology of bakery and confectionery products, National University of Food Technologies. Address: Str. Vladimirska 68, Kyiv, Ukraine, 01601;

**Нагорный Владислав Юрьевич** – студент, кафедра технологии хлебопекарных и кондитерских изделий, Национальный университет пищевых технологий. Адрес: ул. Владимирская 68, г. Киев, Украина, 01601;

**Nagornyj Vladislav Yuryevich** – undergraduate, Department of Technology of bakery and confectionery products, National University of Food Technologies. Address: Str. Vladimirska 68, Kyiv, Ukraine, 01601;

**Куприянова Татьяна Николаевна** – к. с-х. н. Института картофелеводства Национальной академии аграрных наук Украины. Адрес: ул. Чкалова, 22, пгт Немешаево, Бородинский район, Киевская область, 07853;

**Kupriyanova Tatiana Mykolayivna** – Candidate of Agricultural Sciences, Potato Institute of the National Academy of Agrarian Sciences of Ukraine. Address: Str. Chkalov, 22 Nemishaevo town, Borodyanka district, Kyiv region, 07853.

*Пожалуйста ссылаетесь на эту статью следующим образом:*

**Коваленко, Е. А.** Исследование влияния осмотического обезвоживания на качество картофельных чипсов / **Е. А. Коваленко, В. Н. Ковбаса, Б. В. Гребень, В. Ю. Нагорный, Т. Н. Куприянова** // *Вестник НТУ «ХПИ»*, Серия: Новые решения в современных технологиях. – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 175-179. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.26.

*Please cite this article as:*

**Kovalenko, E., Kovbasa, V., Hreben, B., Nagornyj, V., Kupriyanova, T.** Study of osmotic dehydration on quality potato chips. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies*. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 175-179, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.26.

*Будь ласка посилайтеся на цю статтю наступним чином:*

**Коваленко, О. А.** Дослідження впливу осмотичного зневоднення на якість картопляних чіпсів / **О. А. Коваленко, В. М. Ковбаса, Б. В. Гребень, В. Ю. Нагорний, Т. М. Купріянова** // *Вісник НТУ «ХПІ»*, Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 175-179. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.26.

**АНОТАЦІЯ** Картопляні чіпси - висококалорійний продукт, а надмірне споживання жиру призводить до ожиріння людини. Тому завдання полягає в отриманні продукту з низьким вмістом жиру, так як надмірний вміст жиру погіршує якість картопляних чіпсів. Важливим фактором, що сприяє зниженню жиру в чіпсах, є вміст сухих речовин у картоплі і одним із способів їх підвищення є оброблення скибочок картоплі розчином солі (осмотичний зневоднення) перед обсмажуванням.

**Ключові слова.** Картопляні чіпси, картопля, осмотичний зневоднення, концентрація солі.

*Поступила (received) 21.04.2016*

УДК 544.723.212

doi:10.20998/2413-4295.2016.18.27

## ВИКОРИСТАННЯ КОМПОЗИЦІЙНОГО СОРБЕНТУ ЦЕОЛІТ-ГУМІНОВІ КИСЛОТИ ДЛЯ ВИЛУЧЕННЯ ІОНІВ МІДІ З ВОДНИХ РОЗЧИНІВ

О. П. ХОХОТВА<sup>1\*</sup>, О. І. КОНДРАТЕНКО<sup>1</sup>, К. О. ШКЕЛЬ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Кафедра екології та технології рослинних полімерів, інженерно-хімічний факультет, Національний технічний університет України "КПІ", Київ, УКРАЇНА

<sup>2</sup> Кафедра кафедра екобіотехнології та біоенергетики, факультет біотехнології і біотехніки, Національний технічний університет України "КПІ", Київ, УКРАЇНА

\*email: khokhotva@bigmir.net

**АНОТАЦІЯ** Отримано композиційний сорбент шляхом осадження гумінових кислот на цеоліті. Досліджено вплив концентрації гуматів при синтезі сорбенту на ефективність вилучення іонів міді. Кінетика сорбції іонів міді на композиційному сорбенті і необробленому цеоліті описується рівняннями псевдо-першого і псевдо-другого порядків. Лімітуючою стадією сорбційного процесу є дифузія всередині зерен сорбентів. Покращення сорбційних властивостей відбуваються за рахунок гумінових кислот, осаджених у макропорах.

**Ключові слова:** цеоліти, гумінові кислоти, композиційний сорбент, сорбція, важкі метали, кінетика, дифузія, модель Вебера-Морріса.

## THE APPLICATION OF COMPOSITE SORBENT ZEOLITE-HUMIC ACIDS FOR THE REMOVAL OF COPPER IONS FROM AQUEOUS SOLUTIONS

О. П. ХОХОТВА<sup>1\*</sup>, О. КОНДРАТЕНКО<sup>1</sup>, К. ШКЕЛЬ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, Faculty of Chemical Engineering, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

<sup>2</sup> Department of Environmental Biotechnology and Bioenergy, Faculty of Biotechnology and Biotechnics, National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute", Kyiv, UKRAINE

**ABSTRACT** Zeolite is a natural aluminosilicate material widely used as an inorganic ion-exchanger but having relatively low sorption capacity to heavy metal ions. The authors tried to improve its sorption properties via impregnation by humic acids solution. Humic acids themselves can bind metal ions in complexes but their application in pure form is not practical as they are in colloid form. The composite sorbent was obtained in the result of sorption of humates by zeolite at pH 9.5 followed by precipitation in acidic conditions. A range of concentrations of humates used for sorbent synthesis – 100-200 mg/dm<sup>3</sup> - was determined for maximal removal of copper ions from model metal solutions. The lower concentrations did not provide a significant amount of active sites with a good affinity to heavy metals. The higher concentrations resulted in the worsening of copper sorption due to the filling of pore volume by humic acids and the reduction of sorption surface area. The application of composite sorbent provided 20% lower residual copper concentration compared to non-treated zeolite at sorption from 60 mg/l metal solution. Sorption process followed pseudo-first (Lagergren) and pseudo-second kinetic models. Calculated specific sorption values were close to experimental numbers. As defined from Weber-Morris diffusion model, the sorption process was limited by intraparticle diffusion. The improved sorption capacity could be attributed to humic acids were precipitated in macropores and provided additional sorption sites. Humic acids due to their large size did not penetrate to micropores of zeolite that's why diffusion coefficients for non-treated and modified sorption materials were equal.

**Keywords:** zeolites, humic acids, composite sorbent, sorption, heavy metals, kinetics, diffusion, Weber-Morris model.

### Вступ

Процеси сорбції широко використовуються в різних галузях промисловості, в тому числі в очищенні стічних вод. Одним з найбільш поширених забруднювачів навколишнього середовища є іони важких металів, які надходять у природні води разом з недостатньо очищеними стічними водами гальванічних цехів, підприємств гірничодобувної промисловості, чорної і кольорової металургії, машинобудівних заводів. Особливий інтерес представляють недорогі і ефективні способи

очищення вод, засновані на використанні відходів промисловості, місцевої сировини і мінералів як сорбентів.

Природні мінеральні сорбенти, завдяки адсорбційним та іонообмінним властивостям, є перспективними для використання у різних галузях промисловості і, зокрема, у охороні навколишнього середовища. Цеоліт є природним алюмосилікатом каркасної будови [1, 2], має ряд унікальних властивостей – здатність до катіонного обміну, ситові властивості, висока хімічна і термічна стабільність, які використовують у процесах водоочистки.

© О. П. ХОХОТВА, О. І. КОНДРАТЕНКО, К. О. ШКЕЛЬ, 2016

Очищення вод від іонів важких металів найбільш ефективна і рентабельна при використанні сорбційних методів і матеріалів [3-7], таких як природні цеоліти різних типів, зокрема, клиноптилоліт.

Одним з методів поліпшення сорбційних властивостей природних адсорбентів є хімічна активація. Найбільш поширеними методами є модифікація алюмосилікатів кислотами й лугами [8-10]. Модифікацією поверхні природних цеолітів хітозаном та фероціанідами міді можна отримати сорбенти, що мають вищу селективність до окремих груп забруднюючих речовин, таких як, барвники, іони важких металів [11].

Гумінові кислоти (ГК) відносяться до складних природних сполук і є групою природних аморфних високомолекулярних органічних кислот, схожих за своєю будовою, які мають відмінності в залежності від типу вихідної сировини [12]. Один з основних напрямків використання гумінових кислот – застосування їх як сорбентів. У роботах [13-17] досліджена сорбція катіонів металів  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$  з водних розчинів гуміновими речовинами, виділеними з бурого вугілля і торфу. Здатність гумінових кислот до іонного обміну і комплексоутворення створює широкі перспективи для поділу і вилучення катіонів металів з різних середовищ, очищення стічних вод.

#### Мета роботи

Одним з недоліків практичного використання гумінових кислот є складність їх відділення від очищеної води, тому у даній роботі був створений новий композиційний сорбент, який поєднує у собі переваги цеоліту (пориста структура, сорбційні властивості і доступність) і гумінових кислот (висока хімічна активність до іонів важких металів, широка сировинна база).

Метою роботи було дослідження сорбційних властивостей отриманого композиційного сорбенту цеоліт-гумінові кислоти.

#### Методика експерименту

Як об'єкти дослідження використовувалися гумінові кислоти, отримані екстракцією з торфу водним розчином  $\text{NaOH}$ , і цеоліт Сокирницького родовища фракції 3-5 мм.

Обробку цеоліту гуміновими кислотами проводили за наступною методикою: наважку цеоліту 10 г поміщали у 100 мл суспензії гуматів з концентрацією 10-500  $\text{мг/дм}^3$  при рН 9,5, витримували 24 години, після чого осаджували гумінові кислоти підкисленням розчином  $\text{HCl}$  до рН 4 з наступним промиванням отриманого модифікованого цеоліту і висушуванням на повітрі.

Сорбційну здатність отриманих зразків оцінювали по ефективності вилучення іонів  $\text{Cu}^{2+}$  з

розчинів 32,5  $\text{мг/дм}^3$  (рН 5) об'ємом 100  $\text{см}^3$  наважками сорбентів по 2 г протягом 1 год.

Дослідження з кінетики сорбції проводилися з розчинів  $\text{Cu}^{2+}$  з концентрацією 60  $\text{мг/дм}^3$  на наважках необробленого (НОЦ) обробленого і модифікованого гуміновими кислотами (Ц-ГК) цеоліту по 1 г.

#### Обговорення результатів

Залежність ефективності видалення іонів міді від концентрації гуматів, взятих для модифікації цеоліту, показана на рис. 1. За своїми іонообмінними властивостями гумінові кислоти близькі до слабокислотних катіонітів. Сорбційні властивості гумінових кислот, обумовлені наявністю іонообмінних карбоксильних груп і фенольних гидроксилів, залежать від рН середовища і природи кислот. Наявність в структурі гумінових кислот таких електродонорних функціональних груп як  $>\text{C}=\text{O}$ ,  $-\text{COOH}$ ,  $-\text{C}-\text{OH}$ ,  $\text{Ar}-\text{OH}$ ,  $=\text{N}-\text{H}$ ,  $\equiv\text{N}$  та ін. в різних поєднаннях і вільних орбіталей у сорбованих катіонів металів повинні сприяти утворенню комплексних сполук в процесі сорбції.

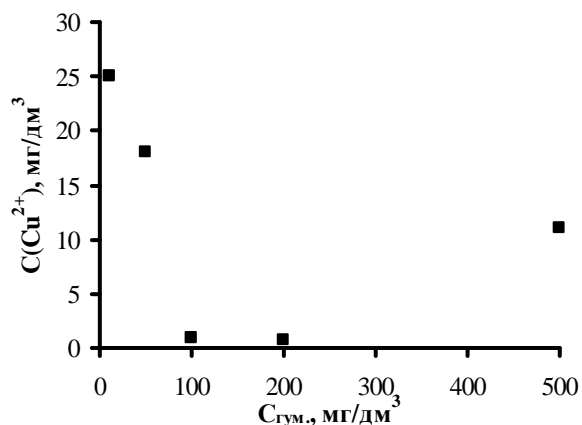


Рис. 1 – Залежність залишкової концентрації  $\text{Cu}^{2+}$  від концентрації гуматів при модифікації цеоліту

При сорбції катіонів металів гуміновими кислотами можливі наступні механізми: іонний обмін; комплексоутворення з електродонорними функціональними групами; комплексоутворення з утворенням зв'язку  $\text{Me}^{z+}$ -гумінові кислоти за рахунок наявності на поверхні вільних  $\pi$ -електронів; реакції відновлення катіонів металів до елементарної форми. Існує припущення, що катіони металів взаємодіють з гуміновими кислотами за першим і другим механізмом [18, 19]. Крім реакцій іонного обміну за рахунок водню карбоксильних груп і фенольних гидроксилів, при яких утворюються розчинні і нерозчинні гумати металів, можливо одночасне протікання реакцій, що ведуть до утворення комплексних сполук.

При низьких концентраціях гуматів на поверхні цеоліту і у макропорах їх осідає невелика

кількість, тому ефективність вилучення іонів міді мала, яка зростає з підвищенням концентрації гуматів до певної межі – 100-200 мг/дм<sup>3</sup>. Подальший ріст концентрації модифікуючого розчину веде до росту залишкової концентрації міді, очевидно, в результаті різкого зменшення питомої сорбційної поверхні внаслідок заповнення макропор гуміновими кислотами.

Такі характеристики поглиначів, як сорбційна ємність, селективність, комплексоутворюючі властивості, мають важливе практичне і теоретичне значення. Для розуміння механізмів протікання процесу адсорбції необхідно знати його лімітуючу стадію. Кінетичні дослідження процесів вилучення і поглинання дозволяють визначити час, необхідний для досягнення адсорбційної рівноваги "адсорбент-адсорбат".

На рис. 2 показані залежності сорбції Cu<sup>2+</sup> від часу на цеоліті до і після обробки його гуміновими кислотами.

Отримані дані були проаналізовані, використовуючи кінетичні моделі псевдо-першого, псевдо-другого порядків та дифузійної моделі Вебера-Морріса.

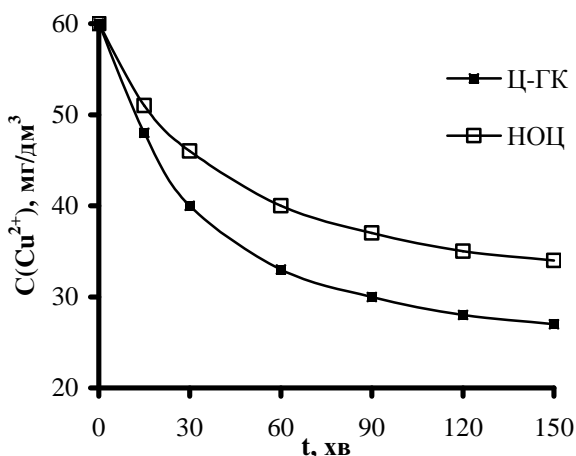


Рис. 2 – Зміна концентрації Cu<sup>2+</sup> від часу сорбції обробленим (Ц-ГК) і не модифікованим (НОЦ) цеолітом

Графічне зображення кінетичних моделей псевдо-першого (1) і псевдо-другого (2) порядку у лінійному вигляді показані на рис. 3 і 4 відповідно.

$$\ln(q_e - q_t) = \ln q_e - k_1 t \quad (1)$$

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{1}{q_e} t \quad (2)$$

де  $q_t$  – кількість Cu<sup>2+</sup>, адсорбованого в момент часу  $t$ , мг/г;

$q_e$  – кількість адсорбованого Cu<sup>2+</sup> у стані рівноваги, мг/г;

$k_1$  – константа Лагергрена швидкості реакції

псевдо-першого порядку, хв<sup>-1</sup>;

$k_2$  – константа швидкості реакції псевдо-другого порядку, г/(мг·хв);

$t$  – час адсорбції, хв.

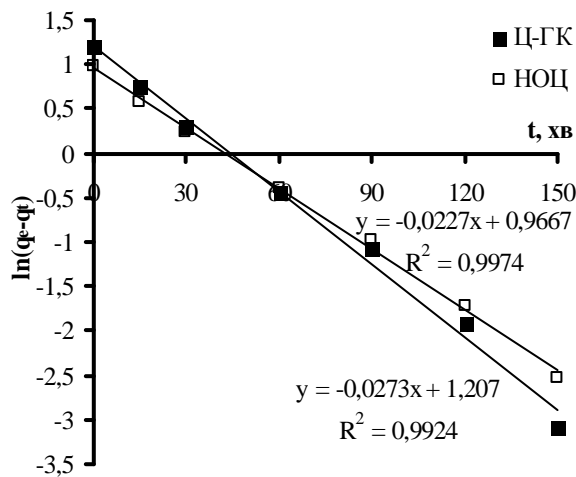


Рис. 3 – Графік у координатах  $\ln(q_e - q_t) - t$  для кінетичної моделі псевдо-першого порядку

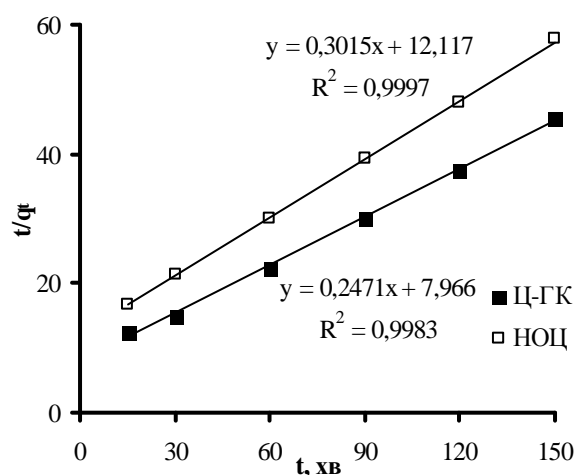


Рис. 4 – Графік у координатах  $t/q_t - t$  для кінетичної моделі псевдо-другого порядку

Після відповідних розрахунків були отримані параметри кінетичних моделей для модифікованого і немодифікованого цеоліту, які наведено у табл. 1.

Константи сорбції розраховані з рівнянь лінійної апроксимації. Обчислені значення граничної питомої сорбції близькі до експериментальних. Для всіх модельних прямих коефіцієнт детермінації  $R^2 > 0,99$ , що свідчить про адекватність вказаних моделей. Початкова швидкість сорбції Cu<sup>2+</sup> на ОЦ у півтора рази вища, ніж на НОЦ.

Поглинання іонів міді цеолітом відбувається у кілька стадій, загальний процес адсорбції може лімітуватися однією чи кількома стадіями: дифузією у тонкій плівці, дифузією у порах, адсорбцією на

поверхні сорбента. Для опису механізму процесу адсорбції іонів міді на композиційному сорбенті і

визначення його лімітуючої стадії була використана дифузійна модель Вебера-Морріса [20]:

Таблиця 1 – Параметри кінетичних моделей псевдо-першого і псевдо-другого порядків для сорбції іонів  $\text{Cu}^{2+}$  композиційним сорбентом цеоліт-гумінової кислоти і необробленим цеолітом

Цеоліт	$q_{\text{експ}}$ мг/г	Кінетична модель						
		псевдо-першого порядку			псевдо-другого порядку			
		$k_1$ , хв <sup>-1</sup>	$q_{\text{модель}}$ , мг/г	$R^2$	$k_2$ , г/(мг·хв)	$q_{\text{модель}}$ , мг/г	$h$ , мг/(г·хв)	$R^2$
Ц-ГК	3,35	0,0273	3,34	0,9924	0,007665	4,05	0,13	0,9983
НОЦ	2,68	0,0228	2,63	0,9974	0,007502	3,32	0,08	0,9997

$$q_t = k_{id}t^{0.5} + c,$$

де  $q_t$  – кількість міді, адсорбованої в момент часу  $t$ , мг/г;  
 $k_{id}$  – коефіцієнт внутрішньої дифузії адсорбції всередині зерен сорбенту, мг/г хв;  
 $t$  – час сорбції;  
 $c$  – константа, пов'язана з товщиною дифузійного шару.

На рис. 5 представлена залежність сорбційної ємності сорбентів в координатах моделі Вебера-Морріса.

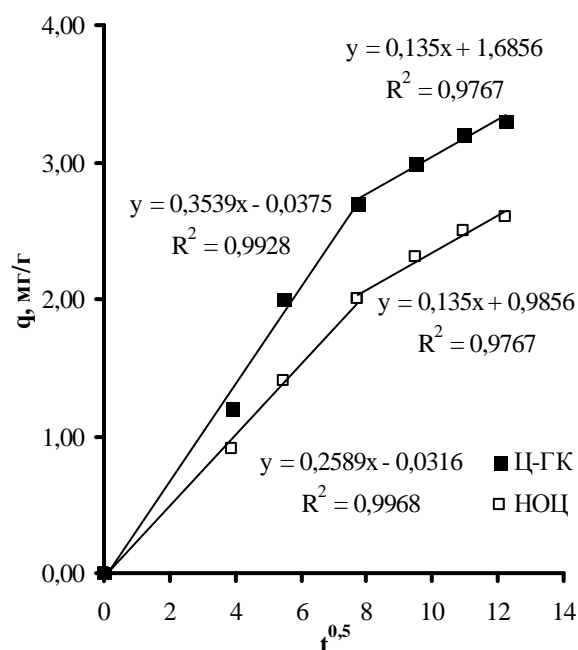


Рис. 5 – Модель Вебера-Морріса для сорбції іонів міді модифікованим (Ц-ГК) і необробленим (НОЦ) цеолітом

В результаті апроксимації експериментальних даних виразом лінійної функції для всіх досліджених іонів важких металів виділені два прямолінійних ділянки. Перша ділянка кривих проходить через початок координат, що є доказом відсутності зовнішнього приграничного шару на адсорбенті. Кут нахилу першої прямолінійної ділянки більше, ніж

другої. Це пояснюється тим, що швидкість адсорбції іонів важких металів на початковому етапі досить висока і відбувається всередині макро- і мезопор. Далі відбувається дифузія іонів металу вглиб мікропор, з подальшим встановленням в гетерофазній системі адсорбційної рівноваги (невеликий кут нахилу другої ділянки). Отже, можна припустити, що лімітуючою стадією процесу адсорбції іонів важких металів з водних розчинів цеолітом і композиційним сорбентом цеоліт-ГК є дифузія іонів всередині мікропористого простору сорбентів.

Очевидно, при обробці цеоліту гуматами, гумінової кислоти, як активні сорбційні центри для іонів міді, внаслідок великих розмірів молекул, осаджуються у макропорах, тому і спостерігається різниця у питомій сорбції саме в області макропор. У мікропори гумінової кислоти не проникають, тому коефіцієнт дифузії (з рівняння апроксимації більш пологих ділянок графіка) для обох сорбентів однаковий.

### Висновки

Отриманий композиційний сорбент має покращені сорбційні властивості по відношенню до іонів важких металів (на прикладі іонів  $\text{Cu}^{2+}$ ) при вилученні їх з розчинів з низькою концентрацією. Швидкість вилучення міді з водних розчинів вища за рахунок гумінових кислот, осаджених у макропорах. Там же вилучається основна частина металу. Процес сорбції лімітується дифузією в мікропорах.

### Список літератури

- 1 Цицишвили, Г. В. Природные цеолиты / Г. В. Цицишвили, Т. Г. Анроникашвили, Г. Н. Киров, Л. Д. Филизова // М.: Химия. – 1985. – 224 с.
- 2 Тарасевич, Ю. И. Природные цеолиты в процессах очистки воды / Ю. И. Тарасевич // Химия и технология воды. – 1988. – Т. 10. №3. – С. 210-218.
- 3 Campos, V. The sorption of toxic elements onto natural zeolite, synthetic goethite and modified powdered block carbon / V. Campos // Environmental Earth Sciences. – 2009. – № 59(4). – P. 737-744. – doi:10.1007/s12665-009-0069-6
- 4 Kosobucki, P. Immobilization of selected heavy metals in sewage sludge by natural zeolites / P. Kosobucki, M. Kruk,

- B. Buszewski** // *Bioresour. Technol.* – 2008. – Vol. 99. – № 13. – P. 5972-5976. doi:10.1016/j.biortech.2007.10.023.
- 5 **Lihareva, N.** Investigation of Zn sorption by natural clinoptilolite and mordenite / **N. Lihareva, L. Dimova, O. Petrov, Y. Tzvetanova** // *Bulgarian Chemical Communications.* – 2009. – № 41(3). – P. 266-271.
- 6 **Nyembe, D. W.** Adsorption mechanisms of  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  from aqueous solutions using natural clinoptilolite: Equilibrium and kinetic studies / **D. W. Nyembe, B. B. Mamba, A. F. Mulaba-Bafubandi** // *Journal of Applied Sciences.* – 2010. – № 10(8). – P. 599-610.
- 7 **Onthong, U.** The applications of natural zeolites for cadmium removal from sample water: Models on laboratory scale / **U. Onthong, P. Pungpo, W. Thongnueakhaeng** // *Advanced Materials Research.* – 2012. – Vol. 347-353. – P. 1930-1933. – doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.1930.
- 8 **Jozefaciuk, G.** Effect of acid and alkali treatments on surface-charge properties of selected minerals / **G. Jozefaciuk** // *Clays Clay Minerals.* – 2002. – V. 50. – P. 647-656. – doi:10.1346/000986002320679378.
- 9 **Breen, C.** Acid-activated organoclays: preparation, characterization and catalytic activity of polycation-treated bentonites / **C. Breen, R. Watson** // *Appl. Clay Sci.* – 1998. – V. 12. – P. 479-494. – doi:10.1016/S0169-1317(98)00006-4.
- 10 **Комаров, В. С.** Адсорбенты: получение, структура, свойства. / **В. С. Комаров** // Минск: Беларус. Навука. – 2009. – 256 с.
- 11 **Машкова, С. А.** Получение и исследование адсорбционных свойств модифицированных природных сорбентов / **С. А. Машкова, Н. П. Шапкин, Н. Н. Жамская, А. С. Скобун, С. В. Малкова, И. В. Тонких** // *Журнал Известия Вузов серия «Химия и химическая технология».* – 2005. – Т.48. №5. – С. 112-114.
- 12 **Комиссаров, И. Д.** Структурная схема и моделирование макромолекул гуминовых кислот / **И. Д. Комиссаров, Л. Ф. Логинов** // *Гуминовые препараты: научные труды.* - Тюмень: Изд-во ТСХИ – 1971. – Т.8. – С. 131-142.
- 13 **Калиниченко, И. Е.** Комплексообразование  $\text{Cu}$  (II) с гуминовыми кислотами в водных растворах / **И. Е. Калиниченко, И. В. Выщеревич, Л. Н. Демущая** // *Укр. хим. жс.* – 2013. – Т.79. – С. 3-4.
- 14 **Дерхам, Х. М.** Взаимодействие ионов свинца и цинка с гуминовыми кислотами агростратоземов альфегумусовых / **Х. М. Дерхам, Г. В. Мотузова, Н. Н. Матинян** // М.: Наука. – 2011. – С. 81-88.
- 15 **Дину, М. И.** Сравнение комплексообразующих способностей фульвокислот и гуминовых кислот в водной среде с ионами железа и цинка / **М. И. Дину** // *Сб. науч. тр. Института водных проблем Российской академии.* – 2010. – № 1. – С. 65-69.
- 16 **Лиштван, И. И.** Взаимодействие гуминовых кислот с ионами металлов в водной среде / **И. И. Лиштван, Ю. Г. Янута, А. М. Абрамец, Г. С. Монич, Н. С. Глухова, В. Н. Алейникова** // *Химия и технология воды.* – 2012. – Т. 34, № 5. – С. 359-369.
- 17 **Ho, Y. S.** Sorption of Cooper(II) from Aqueous Solution by Peat / **Y. S. Ho, G. McKay** // *Water, Air and Soil Pollution,* – 2004. – V. 158. – P. 77-97. – doi:10.1023/B:WATE.0000044830.63767.a3.
- 18 **Ringqvist, L.** Copper and zinc adsorption onto poorly humified Sphagnum and Carex peat / **L. Ringqvist, I. Oborn** // *Water Research,* – 2002. – V. 36. № 9. – P. 2233-2242. – doi:10.1016/S0043-1354(01)00431-6.
- 19 **Gossett, T.** Batch metal removal by peat. Kinetics and thermodynamics / **T. Gossett, J.-L. Trancart, D. R. Thevenot** // *Water Research,* – 1986. – V.20. – P. 21-26. – doi:10.1016/0043-1354(86)90209-5.
- 20 **Weber, W. J.** Kinetics of adsorption on carbon from solutions / **W. J. Weber, J. C. Morris** // *J. Sanitary Engineering Division.* – 1963. – V.89. – P. 31-36.

## Bibliography (transliterated)

- 1 **Cicishvili, G. V., Anronikashvili, T. G., Kirov, G. N., Filizova, L. D.** Prirodnye ceolity [Natural zeolites]. Moscow: Himija. – 1985. – 224 p.
- 2 **Tarasevich, Ju.I.** Prirodnye ceolity v processah ochistki vody [Natural zeolites in water treatment processes]. *Himija i tehnologija vody [Chemistry and technology of water]*, 1988, **3**(10), 210-218.
- 3 **Campos, V.** The sorption of toxic elements onto natural zeolite, synthetic goethite and modified powdered block carbon. *Environmental Earth Sciences*, 2009, **59**(4), 737-744, doi:10.1007/s12665-009-0069-6.
- 4 **Kosobucki, P., Kruk, M., Buszewski, B.** Immobilization of selected heavy metals in sewage sludge by natural zeolites. *Bioresour. Technol.*, 2008, **13**(99), 5972-5976, doi:10.1016/j.biortech.2007.10.023.
- 5 **Lihareva, N., Dimova, L., Petrov, O., Tzvetanova, Y.** Investigation of Zn sorption by natural clinoptilolite and mordenite. *Bulgarian Chemical Communications*, 2009, **41**(3), 266-271.
- 6 **Nyembe, D. W., Mamba, B. B., Mulaba-Bafubandi, A. F.** Adsorption mechanisms of  $\text{Co}^{2+}$  and  $\text{Cu}^{2+}$  from aqueous solutions using natural clinoptilolite: Equilibrium and kinetic studies. *Journal of Applied Sciences*, 2010, **10**(8), 599-610.
- 7 **Onthong, U., Pungpo, P., Thongnueakhaeng, W.** The applications of natural zeolites for cadmium removal from sample water: Models on laboratory scale. *Advanced Materials Research*, 2012, **347-353**, 1930-1933, doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.1930.
- 8 **Jozefaciuk, G.** Effect of acid and alkali treatments on surface-charge properties of selected minerals, *Clays Clay Minerals*, 2002, **50**, 647-656, doi:10.1346/000986002320679378.
- 9 **Breen, C., Watson, R.** Acid-activated organoclays: preparation, characterization and catalytic activity of polycation-treated bentonites. *Appl. Clay Sci.*, 1998, **12**, 479-494, doi:10.1016/S0169-1317(98)00006-4.
- 10 **Komarov, V. S.** Adsorbenty: poluchenie, struktura, svojstva [Adsorbents: Preparation, Structure, Properties], Минск: Belarus. Navuka, 2009, 256 p.
- 11 **Mashkova, S. A., Shapkin, N. P., Zhamskaja, N. N., Skobun, A. S., Malkova, S. V., Razov, R. I., Tonkih, I. V.** Poluchenie i issledovanie adsorbicnyh svojstv modifitsirovannyh prirodnyh sorbentov [Preparation and study of the adsorption properties of modified natural sorbents] *Zhurnal Izvestija Vuzov serija «Himija i himicheskaja tehnologija» [Journal Proceedings of the universities series "Chemistry and chemical technology"]*, 2005, **5**(48), 112-114.
- 12 **Komissarov, I. D., Loginov, L. F.** Strukturnaja shema i modelirovanie makromolekul guminovyh kislot [The block diagram and the simulation of macromolecules of humic acids]. *Guminovye preparaty: nauchnye Trudy [Humic preparations: scientific works]*, Tjumen': Izd-vo TSHI, 1971, **8**, 131-142.



- 13 **Kalinichenko, I. E., Demuckaja, L. N., Vyshherevich, I. V.** Kompleksoobrazovanie Cu (II) s guminovymi kislotalami v vodnyh rastvorah [Complexing Cu (II) with humic acids in aqueous solutions] *Ukr. him. Zh [Ukr. Chem. Jour.]*, 2013, **79**, 3-4.
- 14 **Derham, H. M., Motuzova, G. V., Matinjan, N. N.** Vzaimodejstvie ionov svinca i cinka s guminovymi kislotalami agrostratozemov al'fegumusovyh [Interaction of lead and zinc ions with humic acids agrostratozemov al'fegumusovyh], Moscow: Nauka, 2011, 81-88.
- 15 **Dinu, M. I.** Sravnenie kompleksobrazujushchih sposobnostej ful'vokislot i guminovyh kislot v vodnoj srede s ionami zheleza i cinka [Comparison of the complexing ability of fulvic and humic acids in aqueous medium with ions of iron and zinc] *Sb. nauch. tr. Instituta vodnyh problem Rossijskoj akademii [Coll. scientific. tr. Institute of Water Problems of the Russian Academy]*, 2010, **1**, 65-69.
- 16 **Lishtvan, I. I., Januta, Ju. G., Abrames, A. M., Monich, G. S., Gluhova, N. S., Alejnikova, V. N.** Vzaimodejstvie guminovyh kislot s ionami metallov v vodnoj srede [Interaction of humic acids with metal ions in the aqueous medium]. *Himija i tehnologija vody [Chemistry and technology of water]*, 2012, **5(34)**, 359-369.
- 17 **Ho, Y. S., McKay, G.** Sorption of Cooper(II) from Aqueous Solution by Peat. *Water, Air and Soil Pollution*, 2004, **158**, 77-97, doi:10.1023/B:WATE.0000044830.63767.a3.
- 18 **Ringqvist, L., Oborn, I.** Copper and zinc adsorption onto poorly humified Sphagnum and Carex peat, *Water Research*, 2002, **9(36)**, 2233-2242, doi:10.1016/S0043-1354(01)00431-6.
- 19 **Gossett, T., Trancart, J.-L., Thevenot, D. R.** Batch metal removal by peat. Kinetics and thermodynamics. *Water Research*, 1986, **20**, 21-26, doi:10.1016/0043-1354(86)90209-5.
- 20 **Weber, W. J., Morris, J. C.** Kinetics of adsorption on carbon from solutions. *J. Sanitary Engineering Division*, 1963, **89**, 31-36.

#### Відомості про авторів (About authors)

**Хохотва Олександр Петрович** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», доцент кафедри екології та технології рослинних полімерів; м. Київ, Україна; e-mail: khokhotva@bigmir.net

**Khokhotva Oleksandr** – Ph. D., Docent, Associate Professor, Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: khokhotva@bigmir.net

**Кондратенко Олександра Іванівна** – студентка кафедри екології та технології рослинних полімерів, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: sashunja\_92@mail.ru

**Kondratenko Oleksandra** – student of Department of Ecology and Technology of Plant Polymers, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: sashunja\_92@mail.ru

**Шкель Катерина Олександрівна** – студентка кафедри екобіотехнології та біоенергетики, Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, Україна; e-mail: shkel.kateryna@gmail.com

**Shkel Kateryna** – student of Department of Environmental Biotechnology and Bioenergy, National Technical University of Ukraine “Kyiv Polytechnic Institute”, Kyiv, Ukraine; e-mail: shkel.kateryna@gmail.com

*Будь ласка посилайтесь на цю статтю наступним чином:*

**Хохотва, О. П.** Використання композиційного сорбенту цеоліт-гумінові кислоти для вилучення іонів міді з водних розчинів / **О. П. Хохотва, О. І. Кондратенко, К. О. Шкель** // *Вісник НТУ «ХПІ», Серія: Нові рішення в сучасних технологіях.* – Харків: НТУ «ХПІ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 180-185. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.27.

*Please cite this article as:*

**Khokhotva, O., Kondratenko, O., Shkel, K.** The application of composite sorbent zeolite-humic acids for the removal of copper ions from aqueous solutions. *Bulletin of NTU "KhPI". Series: New solutions in modern technologies.* – Kharkiv: NTU "KhPI", 2016, **18** (1190), 180-185, doi:10.20998/2413-4295.2016.18.27.

*Пожалуйста ссылайтесь на эту статью следующим образом:*

**Хохотва А. П.** Использование композиционного сорбента цеолит-гуминовые кислоты для извлечения ионов меди из водных растворов / **А. П. Хохотва, А. И. Кондратенко, Е. А. Шкель** // *Вестник НТУ «ХПИ», Серія: Новые решения в современных технологиях.* – Харьков: НТУ «ХПИ». – 2016. – № 18 (1190). – С. 180-185. – doi:10.20998/2413-4295.2016.18.27.

**АННОТАЦИЯ** Получен композиционный сорбент путем осаждения гуминовых кислот на цеолите. Исследовано влияние концентрации гуматов при синтезе сорбента на эффективность извлечения ионов меди. Кинетика сорбции ионов меди на композиционном сорбенте и необработанном цеолите описывается уравнениями псевдо-первого и псевдо-второго порядков. Лимитирующей стадией сорбционного процесса является диффузия внутри зерен сорбентов. Улучшение сорбционных свойств происходит за счет гуминовых кислот, осажденных в макропорах.

**Ключевые слова:** цеолиты, гуминовые кислоты, композиционный сорбент, сорбция, тяжелые металлы, кинетика, диффузия, модель Вебера-Морриса.

*Надійшла (received) 30.04.2016*

## ЗМІСТ

## ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<i>Артюх С. М.</i> Методика оцінювання показників професійної придатності операторів	5
<i>Берник І. М., Луговський О. Ф.</i> Аналіз методів визначення швидкості розповсюдження хвиль в кавітаційній області ультразвукового поля	10
<i>Бурдейна В. М., Трищ А. Р., Доценко Н. А.</i> Системи з напрямком ріжучого інструменту в операційних системах з силовою головкою і насадкою	16
<i>Грабовський А. В., Васильєв А. Ю., Ткачук М. М., Танченко А. Ю., Мартиненко О. В., Киричук Д. В., Борисенко С. В., Касай О. І.</i> Забезпечення тактико-технічних характеристик військових гусеничних і колісних машин на етапі проектних досліджень	22
<i>Зав'ялов В. Л., Костюк В. С., Бодров В. С., Костюк Є. В., Мисюра Т. Г., Запорожець Ю. В., Попова Н. В.</i> Удосконалення технології виробництва гірких настоянок за допомогою математико-статистичних методів досліджень	30
<i>Коротков О. О., Семіков А. В., Мельников Г. І.</i> Побудова та моделювання енергозберігаючого ственду на базі асинхронного генератора для випробувань двигунів внутрішнього згоряння	39
<i>Костенко, Ю. В.</i> Динамічні процеси у віброударних системах зі змінними параметрами	45
<i>Ларін, О. О., Петрова, Ю. А.</i> Експериментальні дослідження ортотропних пружних і в'язкопружних характеристик еластодимірних текстильно армованих композитів	55
<i>Лежнюк П. Д., Рубаненко О. О.</i> Нормування втрат електроенергії в мережах агропромислового комплексу критеріальним методом з застосуванням нейрон-нечіткого моделювання	60
<i>Ідан А. Ф. І., Акімов О. В., Костик К. О., Гончарук О. О.</i> Вплив попередньої термічної обробки та режимів лазерного гартування на структуроутворення сталі	66
<i>Карвацький А. Я., Лазарєв Т. В., Швачко Д. Г., Тищенко О. С.</i> Реологічні властивості вуглецевих композицій в діапазоні температури 120-170 °С	74
<i>Кузнецов Е. Г.</i> Динамічна модель імпульсного торцевого ущільнення	80
<i>Лежнюк П. Д., Гунько І. О.</i> Вплив розосереджених джерел енергії на оптимальний потікорозподіл в електричних мережах	86
<i>Лежнюк П. Д., Комар В. О., Кравчук С. В.</i> Оцінювання імовірнісних характеристик генерування сонячних електростанцій в задачі інтелектуалізації локальних електричних систем	92
<i>Моргунов, В. В., Трищ Р. М., Діденко Н. В.</i> Метод розрахунку поглиненої (еквівалентної) дози і потужності поглиненої (еквівалентної) дози іонізуючого випромінювання	101
<i>Рубаненко, О. Є.</i> Оперативне діагностування високовольтних вимірювальних трансформаторів струму	107
<i>Рудий А. В., Васильєв А. Ю., Бистрицький М. Є.</i> Моделювання зовнішніх збурень опорної поверхні під час руху військової гусеничної машини	113

## ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

<i>Вербицький Є. В., Кисельова А. Г.</i> Контекстний підхід керування системою електроживлення	123
<i>Діхтяр М. Ю., Мовсесян Я. С., Саваневич В. Є., Хламов С. В.</i> Метод аварійного ототожнення цифрових кадрів з істотною невизначеністю їх параметрів	128
<i>Криводуб А. С.</i> Оцінка надійності діяльності операторів в системах надання доступу до ресурсів комп'ютерних мереж	140
<i>Мігущенко Р. П., Саприкіна М. І., Куштим К. Ю.</i> Перспективність FDM технологій у 3D друку	148
<i>Сергєєва О. В., Півоваров О. А., Пиляєв В. В.</i> Розробка системи моніторингу отримання кисневмісних сполук кобальту плазмохімічним методом	153

## ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

<i>Бондар С. М., Чабанова О. Б., Трубішкова А. А.</i> Інтенсифікація біотехнологічного процесу аеробної обробки рідких субстратів	158
---	-----

<i>Дубовик Д. Д.</i> Наближена методика оцінки обсягу замулення водосховища – прототипу	164
<i>Коваленко О. А., Ковбаса В. М., Гребень Б. В., Назорний В. Ю., Купріянова Т. М.</i> Дослідження впливу осмотичного зневоднення на якість картопляних чіпсів	170
<i>Попова Н. В., Мисюра Т. Г., Рибачок А. В.</i> Удосконалення технології виробництва гірких настоянок за допомогою математико-статистичних методів досліджень	175
<i>Хохотва О. П., Кодратенко О. І., Шкель К. О.</i> Використання композиційного сорбенту цеоліт-гумінові кислоти для вилучення іонів міді з водних розчинів	180

## CONTENTS

### ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

<i>Artyukh S.</i> Methods of assessment of indicators of professional suitability of operators	5
<i>Bernyk I. M., Lugovskoy O. F.</i> Analysis methods of determining velocity distribution waves in the cavitation zone ultrasound field	10
<i>Burdein V., Trichsh A., Dotsenko N.</i> System with the direction of the cutting tool in operating systems with the power head and attachment	16
<i>Grabovskiy, A. V., Vasyliiev, A. Y., Tkachuk, M. M., Tanchenko, A. Y., Martynenko, O. V., Kyrychuk, D. V., Borysenko, S. V., Kasai, O. I.</i> Providing of tactical and technical characteristics of military caterpillar and wheeled vehicles on stage of design researches	22
<i>Zavialov V., Kostyuk V., Bodrov V., Kostyuk E., Misyura T., Zaporozhets Y., Popova N.</i> Features of private extraction equipment with vibrational effect workspace	30
<i>Korotkov A. O., Semikov A. V., Melnikov G. I.</i> Construction and modelling energy saving stand on the basis of the asynchronous generator for testing of internal combustion engines	39
<i>Kostenko Iu.</i> Dynamic processes in vibroimpact systems with variable parameters	45
<i>Larin O., Petrova Ju.</i> Experimental observations of orthotropic elastic and viscoelastic characteristics of the elastomeric textile reinforced composites	55
<i>Lezhnyuk P., Rubanenko O.</i> Valuation of power losses in electrical networks of agro-industrial complex by criterion method with use neuro-fuzzy modelling	60
<i>Idan Alaa Fadhil I., Akimov O., Kostyk K., Goncharuk O.</i> The influence of pre-heat treatment and laser hardening on the steel structure formation	66
<i>Kuznetsov E.</i> Dynamic model of pulse mechanical seal	74
<i>Larin, O., Petrova, Ju.</i> Experimental observations of orthotropic elastic and viscoelastic characteristics of the elastomeric textile reinforced composites	80
<i>Lezhniuk I., Hunko S.</i> The impact of distributed power sources to the best of flow in electrical networks	86
<i>Lezhniuk P., Komar V., Kravchuk S.</i> Evaluation probabilistic characteristics of solar power generation in applications of intellectualization local electric systems	92
<i>Morgunov V., Trishch R., Didenko N.</i> Calculation method of the absorbed (equivalent) dose and absorbed (equivalent) dose rate of the ionizing radiation	101
<i>Rubanenko O.</i> Operational diagnostics of high voltage instrument current transformers	107
<i>Rudiy A., Vasiliev A., Bystrytsky M.</i> Modeling of the external disturbances of the ground surface during military tracking vehicles movement	113

### INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

<i>Verbitskyi I. V., Kyselova A. G.</i> Context approach for electric grid control	123
<i>Dikhtyar M. Movsesian Ia. Savanevych V. Khlamov S.</i> The method of emergency identification of the digital frame with substantial uncertainty of their parameters the method of emergency identification of the digital frame with substantial uncertainty of their parameters	128

- Krivodub A.** The approach to the evaluation of options of the activities of the operators technical support information services telecommunication systems 140
- Mygushchenko R. P., Oprichnina M. I., Kushtym K. Yu.** The perspective of fdm-technologies in 3D printing 148
- Sergeyeva O., Pivovarov A., Pilyaev V.** Development of monitoring system for producing oxygen-containing compounds of cobalt by plasm-chemical method 153

## CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY

- Bondar S., Chabanova O., Trubnikova A.** Intensification of biotechnological aerobic process of treatment of liquid substrates 158
- Dubovyk D.** Approximate method estimate of the volume of reservoir sedimentation – prototype 164
- Kovalenko E., Kovbasa V., Hreben B., Nagornyj V., Kupriyanova T.** Study of osmotic dehydration on quality potato chips 170
- Popova N., Misyura T., Rybachok A.** Improvement technology of production of bitter tinctures through the mathematical and statistical methods of researches 175
- Khokhotva O., Kondratenko O., Shkel K.** The application of composite sorbent zeolite-humic acids for the removal of copper ions from aqueous solutions 180

**ВІСНИК  
НАЦІОНАЛЬНОГО ТЕХНІЧНОГО УНІВЕРСИТЕТУ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

Збірник наукових праць  
Серія:  
Нові рішення в сучасних технологіях  
№ 18 (1190) 2016

Науковий редактор чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Є. І. Сокол  
Технічний редактор канд. техн. наук А. В. Грабовський

Відповідальний за випуск: канд. техн. наук, доц. Р. С. Томашевський

**АДРЕСА РЕДКОЛЕГІЇ:** 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ «ХПІ».  
Рада молодих вчених, тел. (057)707-69-37, e-mail: vestnik.nsmi@gmail.com

Обл.-вид. № 17-16

Підп. до друку «01» липня 2016 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк цифровий.  
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,0. Облік.вид.арк. 10,0.  
Тираж 300 прим. Зам. № . Ціна договірна.

---

Видавничий центр НТУ «ХПІ». Свідоцтво про державну реєстрацію  
суб'єкта видавничої справи ДК №3657 від 24.12.2009  
61002, Харків, вул. Фрунзе, 21

---