

p-ISSN 2079-5459

e-ISSN 2413-4295

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



ВІСНИК

Національного технічного університету
«Харківський політехнічний інститут»

Випуск
46` 2015

Харків

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"

ВІСНИК

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

Серія: "Нові рішення в сучасних технологіях"

№ 46 (1155) 2015

Збірник наукових праць

Видання засновано в 1961 р.

Збірник наукових праць. Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Х.: НТУ «ХПІ» – 2015р. – № 46 (1155) – 155 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 постановою президії ВАК України від 26 травня 2010 р. №1 – 05/4. (Бюлєтень ВАК України №6, 2010 р., стор. 3, №20).

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.; Е. 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. Грабчінко, 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. Єспіанов, канд. техн. наук проф.; Ю. І. Зайцев, канд. техн. наук, проф.; П.О. Качанов, д-р техн. наук, проф.; В.Б. Клепіков, 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: Е. 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. Клепіков, 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.

У квітні 2013 р. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія «Нові рішення в сучасних технологіях» включений у довідник періодичних видань бази даних **«Ulrich's Periodicals Directory»** (New Jersey, USA)

Рекомендовано до друку вченого радиою НТУ «ХПІ»

Протокол № 9 від «30» жовтня 2015 р.

©Національний технічний університет «ХПІ», 2015

NATIONAL TECHNICAL UNIVERSITY
“KHARKIV POLYTECHNIC INSTITUTE”

BULLETIN

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

Series: "New solutions in modern technologies"

№ 46 (1155) 2015

Collected Works

The publication was founded in 1961

Collected Works. Series: New solutions in modern technology. - Kharkiv: NTU "KhPI" – 2015. – No 46 (1155) – 155 p.

State edition

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

The collection is published in Ukrainian and Russian.

Bulletin of the National Technical University "KhPI" included in the "List of scientific professional editions of Ukraine, which can be published results of dissertations for the degree of doctor and candidate of sciences", approved by the presidium of VAK of Ukraine of 26 May 2010 No1 - 05/4 . (Bulletin of VAK Ukraine No6, 2010 3, No20).

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. Dominin, 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.

In April 2013 Bulletin of the National Technical University "KhPI" series "New solutions in modern technologies" included in the directory database of periodicals «Ulrich's Periodicals Directory» (New Jersey, USA)

Recommended for publication by the Academic Council of NTU "KhPI"
Protocol number 9 of October, 30, 2015

© National Technical University "KhPI", 2015

**УПРАВЛІННЯ ТЕМПЕРАТУРНИМ ПОЛЕМ ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ
ЕКСТРУЗІЇ ВИРОБНИЦТВА АЛЮМІНІЄВИХ ПРОФІЛІВ,**

A. Б. БУНДЗА¹, О. С. ЄЛІЗАРОВ¹, С. М. КУЩОВИЙ²

¹ Державне спеціальне конструкторсько-технологічне бюро фізичного приладобудування з дослідним виробництвом Інституту фізики Національної Академії наук України, м. Київ, УКРАЇНА

² Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут», м. Київ, УКРАЇНА

*e-mail: bundza@iop.kiev.ua

АНОТАЦІЯ В роботі досліджено метод управління температурним полем технологічного процесу екструзії алюмінієвих профілів. Визначено, що під час виробництва алюмінієвих профілів важливим є контроль відхилення температури від заданого значення та її рівномірність розподілу по поверхні заготовки. Від цих параметрів залежить якість алюмінієвих профілів, відсоток браку та об'єми виробництва загалом. Активних засобів контролю температурних параметрів процесу екструзії алюмінієвих профілів раніше запропоновано не було, тому дана робота присвячена розробці такого контролально-вимірювального комплексу, який би вирішив поставлену задачу. Для вирішення проблеми керування температурним полем в процесі екструзії запропоновано використати пристрій для бесконтактного вимірювання температури поверхні алюмінію, який буде складовою частиною контролально-вимірювального комплексу.

Ключові слова: екструзія, температурне поле, контролально-вимірювальний комплекс, пірометр спектрального відношення, алюмінієві профілі, якість продукції

АННОТАЦИЯ В работе исследован метод управления температурным полем технологического процесса экструзии алюминиевых профилей. Определено, что при производстве алюминиевых профилей важен контроль отклонения температуры от заданного значения и ее равномерность распределения по поверхности заготовки. От этих параметров зависит качество алюминиевых профилей, процент брака и объемы производства в целом. Активных средств контроля температурных параметров процесса экструзии алюминиевых профилей ранее предложено не было, поэтому данная работа посвящена разработке такого контролально-измерительного комплекса, который бы решил поставленную задачу. Для решения проблемы управления температурным полем в процессе экструзии предложено использовать устройство для бесконтактного измерения температуры поверхности алюминия, которое будет составной частью контролально-измерительного комплекса.

Ключевые слова: экструзия, температурное поле, контролально-измерительный комплекс, пирометр спектрального отношения, алюминиевые профили, качество продукции

**CONTROL THE TEMPERATURE FIELD OF EXTRUSION PROCESS IN
PRODUCTION ALUMINUM PROFILES**

A. BUNDZA¹, A. ELIZAROV¹, S. KUSCHOVIY²

¹ Special design and technological bureau of optical instrumentation of the Institute of Physics of National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

² National Technical University «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The main goal of this work is the control of temperature deviation from the set value and its even distribution on the surface of the workpiece during extrusion in the production of aluminum profiles. From these parameters affects the quality of aluminum profiles, lack of interest and the production volume in general. Active controls temperature parameters of the extrusion of aluminum profiles previously not been proposed because this work is devoted to the development of the control and measuring complex, which would be decided the task. To solve the problem temperature control during extrusion proposed use the device for contactless measuring the surface temperature of aluminum, which is part of the control and measuring complex. For this purpose at certain points of the production line to install contactless measuring temperature, namely pyrometer DPR-1. When using control-measuring complex, where the temperature measurement used pyrometer DPR-1, overheating the metal factor is excluded, and therefore decreases the production of substandard products and there is energy savings. In the complex information about melting temperature is transferred from pyrometer to the computer and is displayed in digital form, which allows at any time to review the finished aluminum extrusion processes. Control-measuring complex provides temperature data according to which it is possible to control the speed of the conveyor and power induction heating system that allows you to increase the volume of finished products at optimized expenses for electricity.

Keywords: extrusion, temperature field, control-measuring complex, spectral ratio pyrometer, aluminum profiles, product quality

кольорових металів, а неувага до економічного зростання внутрішнього ринку цієї галузі розглядається як серйозна загроза фінансовій безпеці країни. Особливо це стосується виробів з алюмінію та його сплавів, які за рахунок своїх унікальних властивостей стали незамінними в машинобудуванні (авіабудування та автомобілебудування), а також в приладобудуванні і електротехніці. До уваги, частка виготовлених виробів з алюмінію разом з міддю, цинком і свинцем складає близько 96%, а саме виробництво кольорової металургії в цілому характеризується 70 різними металами [1]. Поєднання таких факторів зумовлює високі вимоги, що пред'являються технологічним процесам металургійного комплексу держави. Однією з надважливих проблем цієї галузі є контроль температурного режиму, від якого залежить якість продукції та відсоток браку [2-5]. Дану проблему намагаються вирішити з допомогою впровадження безконтактних методів вимірювання температури, які вже добре себе зарекомендували [6]. Зокрема це стосується тих методів, що базуються на спектральній пірометрії і мають ряд переваг перед інших способів контролю температури об'єктів [7]. Особливо актуальною задачею є керування температурним полем в системах нагріву алюмінієвих елементів перед пресуванням [8]. Цей процес називають екструзією.

Екструзія – це технологічний процес отримання виробів шляхом екструдування матеріалу через формувальний отвір (фільтера) у матриці. Зазвичай використовується у виробництві будівельних матеріалів, виробів з полімерних матеріалів, конструкційних металевих профілів, а також в харчовій промисловості, шляхом протисування пластифікованого матеріалу через отвір екструзійної головки преса [9, 10].

Постановка проблеми

Сьогодні в промисловості для виготовлення виробів з кольорових металів з допомогою пресування застосовують різні технології. Однією з таких є екструзія алюмінію [9-11]. Світовий ринок екструзійних продуктів складає близько 6 млн тонн на рік, в той час коли європейський ринок екструзії є основним ринком, особливо для виробів з алюмінієм (обсяг близько 2,8 млн тонн на рік). Зауважимо, в Європі встановлено близько 480 пресів для екструзії алюмінієвих заготовок, що є важливим аспектом в умовах Євроінтеграційних процесів. Тому питання, які пов'язані з екструзією алюмінію актуальні і потребують уваги.

Нагрівання перед пресуванням полегшує процес обробки матеріалу та сприяє підвищенню його пластичності. Відомо, що алюміній та мідь досить добре піддаються обробці, зокрема витягуванню в дріт і прокатці в тонкі листи. До всього іншого алюміній володіє рядом унікальних якостей і

властивостей, цінних у металургії: досить міцний, легкий, має гарну стійкість до корозії і багато іншого [10].

Перед пресуванням алюмінієві заготовки нагрівають від кімнатної температури до кінцевих температур 400-500 °C. В основному, для попереднього нагрівання заготовки перед екструзією використовують газові печі й індукційні нагрівачі [10, 16]. Широка область застосування індукційного нагріву для різних видів термообробки вимагає простих і точних методів управління системою. Для проектування і вибору необхідних складових елементів системи, наприклад конденсаторів і трансформаторів, необхідно знати основні параметри індуктора: струм, напруга і коефіцієнт потужності. Але у кінцевому підсумку вибір обладнання залежить від багатьох інших факторів, тому що, як зазначалося вище, технології плавки металу характеризуються високими вимогами до процесу нагрівання, а саме:

- незначне відхилення температури від заданого значення;
- рівномірність температурного розподілу в заготовці;
- малі інвестиційні витрати;
- малі експлуатаційні витрати (високий ККД, малі енерговитрати, обслуговування і можливість ремонту, низький відсоток браку при налагодженні);
- висока продуктивність;
- швидка готовність до роботи;
- відсутність шкоди, що завдається навколошньому середовищу (низька забрудненість виробничої території теплом, відпрацьованими газами і шумами) [8].

Отже, в процесі екструзії виробництва алюмінієвих профілів важливим є контроль відхилення температури від заданого значення та її рівномірність розподілу по поверхні заготовки.

Вирішення задачі

Зупинимося на пріоритетних факторах, які зумовлюють оптимізацію процесу екструзії алюмінієвих профілів, а саме: контроль температури відповідно до заданого нормованого значення технологічного процесу та рівномірність розподілу температурного поля в заготовці.

Для вирішення проблеми керування температурним полем в процесі екструзії алюмінію пропонується застосування пристрою для безконтактного вимірювання температури поверхні алюмінієвого профілю. Вимірювання температури відбувається після виходу об'єкту контролю з екструдера незалежно від його випромінювальної здатності та розміру. На рис. 1 наведений схематичний варіант вдосконалення процесу екструзії алюмінію, з допомогою введення дистанційного активного засобу управління температурним полем в заготовці, яку нагрівають. А саме, мається на увазі, застосування пристрою контролю температури ДПР-1

(рис. 2), методика вимірювання якого, базується на використанні співвідношення енергетичних яскравостей контролюваного об'єкту в двох спектральних зонах вимірювання.

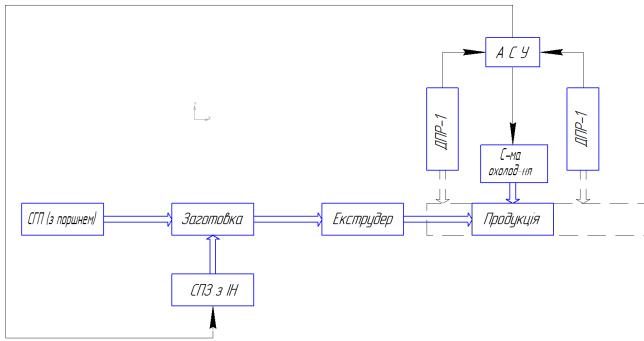


Рис. 1 – Схема процесу екструзії алюмінію з «вмонтованім» пристроєм контролю температури (ДПР-1)

Методи і матеріали

В даному запропонованому дистанційному вимірювачі температури здійснюється двоспектральна схема вимірювання, без врахування коефіцієнта випромінювальної здатності. Ці дистанційні вимірювачі із великою точністю визначають температуру об'єктів понад 200 °C аж до температури фазових переходів (ΔT від +200 °C до 3500 °C).



Рис. 2 – Пристрій для безконтактного вимірювання температури поверхні нагрітих тіл [12]

Основним елементом приладу є піроелектричний приймальний пристрій (ППП), який призначений для реєстрації теплового випромінювання об'єктів в спектральному діапазоні 0,5~45 мкм (в приладі, за допомогою оптичних фільтрів, використовуються довжини хвиль: 1,6; 2,2; мкм) рис. 3.

ППП розроблений на базі піроелектричного приймача випромінювання, чутливий елемент якого являє собою плоско-паралельну пластину, виготовлену з піроактивного матеріалу

(поляризований танталат літію), на протилежній стороні якої нанесено електроди. Під дією теплового випромінювання пластина нагрівається і її спонтанна поляризація зменшується, що приводить до змін

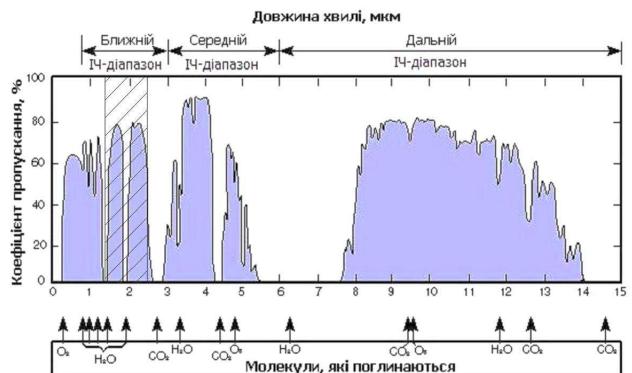


Рис. 3 – Залежність коефіцієнту пропускання від довжини хвилі [13]

заряду конденсатора, які можна реєструвати. Поріг чутливості на частоті модуляції 20 Гц порядку 1 ÷ 2,5 • 10 -10 Вт/Гц 1/2, а вольтова чутливість -10 5 ÷ 10 7 В/Вт. Можна використовувати фотонні приймачі, які мають поріг чутливості менше 1 • 10 -10 Вт/Гц 1/2 (такі приймачі використовуються за кордоном і нашими вітчизняними виробниками), однак, вони сприймають випромінювання з довжиною хвиль до 1,2 мкм, але при температурі 500 °C сигнал не достатній. Крім того, всі фотонні приймачі мають сильну залежність від температури і потребують високоточної терmostабілізації для підтримання рівня чутливості приладів, що веде до пониження надійності при їх використанні. Піроелектричні приймачі не потребують терmostабілізації і зберігають свою порогову чутливість в широкому інтервалі температур (від -100 до +600 °C) і у всьому вищезгаданому спектральному діапазоні.

Прилад складається з трьох частин: оптичної, ППП і електронної. Оптична частина здійснює концентрацію теплового випромінювання, від об'єкту на ППП.

Тепловий потік, який потрапляє в об'єктив приладу не характеризує власну температуру контролюваного об'єкту, оскільки остання визначається коефіцієнтом випромінювальної здатності (коефіцієнт емісії), який змінюється в залежності від матеріалу об'єкту, стану його поверхні і температури. Це набагато ускладнює процес вимірювання.

Якщо нам необхідно вимірювати і контролювати температуру одного і того ж об'єкту з постійною випромінювальною здатністю, або різних з їх також іншим постійним коефіцієнтом випромінювання, то можна виготовити односпектральний пірометр з фіксованим значенням коефіцієнтів, які задаються в залежності від матеріалу і поверхні контролюваних об'єктів.

Зауважимо, що для вирішення поставленої задачі щодо контролю температури алюмінієвих профілів перед їх пресуванням застосування односпектрального методу не є доцільним і технологічним, так як практично в процесі екструзії температура вимірюється з великої відстані (від 5 до 10 метрів) і тоді профіль потрапляє частково в поле зору, що зумовлює невідповідність показів та сильну похибку вимірювань, тому перевагу віддають спектральній пірометрії, яка дозволяє отримувати правильні значення температури незалежно від значення коефіцієнту випромінювальної здатності об'єкту.

В багатьох випадках ми не знаємо коефіцієнт випромінювання об'єкту і його розміри, до того ж він ще й різний для кожного об'єкту і має різну температурну залежність. У цьому випадку використовується спектральний метод вимірювання температури.

Ці прилади називаються пірометрами спектрального відношення. Методика вимірювання цих пірометрів базується на використанні відношення теплових потоків від контролюваного об'єкту в двох спектральних зонах їх вимірювань. Найчастіше це дві зони які перекриваються, або прилеглі одна до одної.

Результати вимірювань виводяться на цифровий індикатор (рис.4). В аналоговій формі, - вихідний струм від 4 до 20 mA та в цифровій формі через стандартний RS-232, RS-485 для під'єднання до ПК.



Рис. 4 – Цифровий індикатор пірометра спектрального відношення ДПР-1

Згідно закону Віна [14] нагріте до певної температури тверде тіло випромінює енергію в певному спектрі довжин хвиль з постійною інтенсивністю на кожній довжині хвилі відповідно до його температури. Якщо в спектрі випромінювання виділити дві вузькі смуги довжин хвиль і виміряти випромінювання, що надходить від нагрітого тіла, в кожній з цих смуток, а потім знайти відношення отриманих значень енергій, то знайдений результат однозначно визначить температуру, яку мало тіло в момент вимірювання енергій. При такому методі вимірювання температури твердого тіла результат не

залежатиме від того чи було заповнене поле зору приладу поверхнею розігрітого тіла, чи в поле зору приладу потрапила частина поверхні розігрітого тіла разом з іншими холодними тілами. Головна вимога до умови вимірювання - щоб енергія, яка потрапляє в об'єктив приладу була достатньою величини для отримання відношення енергій з врахуванням чутливості піроприймаčів.

Пірометр спектрального відношення ДПР-1 є одноблочний прилад, блок-схема якого приведена на рис. 5 [15].

В передній частині приладу розташований об'єктив (1), на вхід якого потрапляє видиме та ІЧ випромінювання від поверхні об'єкта. За об'єктивом розташоване розподільче дзеркало (2), яке розділяє видиме та ІЧ випромінювання. Видимі промені відбившись від дзеркала (7) потрапляють через об'єктив візуування (8) на матове скло (9), на якому формується зображення об'єкта. Потік ІЧ випромінювання, який пройшов модулятор (3) ділиться розподільчим фільтром (4) на два потоки, направлених на перший піроприймальний пристрій (ППП) (5) та другий ППП (6) відповідно. На вході кожного ППП встановлені світлофільтри з різними спектральними смугами пропускання.

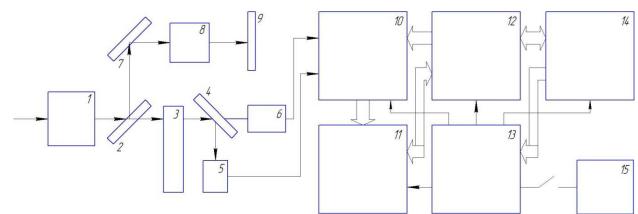


Рис. 5 – Блок-схема роботи ДПР-1
(1 – об'єктив; 2 – розподільче дзеркало; 3 – модулятор; 4 – розподільчий фільтр; 5,6 – ППП (піроприймальний пристрій); 7 – дзеркало; 8 – об'єктив візуування; 9 – матове скло оптичного візура; 10 – плата підсилювача нормуючого; 11 – плата АЦП; 12 – плата мікроЕОМ; 13 – плата живлення; 14 – панель індикації та керування; 15 – акумуляторна батарея)

З виходу ППП електричний сигнал подається на плату підсилювача нормуючого (10), а після підсилення – на плату аналого-цифрового перетворювача (АЦП) (11). З виходу АЦП сигнали у цифровому коді подаються на плату мікро-ЕОМ (12). Після чого мікро-ЕОМ здійснює обробку сигналів згідно з програмою і визначає температуру досліджуваного об'єкта. Результат розрахунку виводиться на цифровий індикатор (дисплей), що встановлений на панелі індикації та керування (14). Крім того, результат вимірювання виводиться в аналоговій формі у вигляді струму від 4 до 20 mA на роз'єдинувач, розташований на панелі об'єктива приладу. В приладі реалізовано канал передачі результатів вимірювання в цифровій формі в стандарти RS-232 (RS-485), що забезпечує можливість

під'єднання приладу до персонального комп'ютера або іншого приймача інформації.

Плата живлення (13) призначена для перетворення вхідної напруги живлення, яка подається від акумуляторної батареї (15) або зовнішнього джерела живлення, в низку напруг, які необхідні для функціонування приладу. На платі живлення розміщений зарядний пристрій, який призначений для зарядження батарей акумуляторів. В нижній частині приладу розташований батарейний відсік для розміщення батареї акумуляторів та кріпиться рукоятка.

Розташування елементів на панелі об'єктива наведено на рисунку 6. На панелі об'єктива розміщені семиконтактний роз'єднувач PC7 для виведення сигналів по каналу RS-232 (RS-485), для підключення персональної ЕОМ або іншого приймача інформації та для виведення сигналів в аналоговій формі (струменевий вихід 4-20 mA), роз'єднувач для підключення зовнішнього джерела живлення, вимикач живлення приладу та лазер.

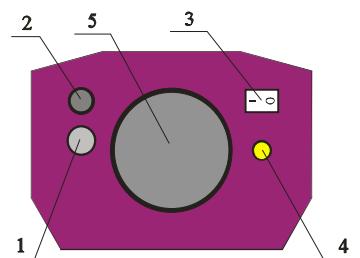


Рис. 6 – Панель об'єктива

(1 – роз'єднувач для виведення сигналів по інтерфейсу та токового вихіду; 2 – роз'єднувач для підключення зовнішнього джерела живлення; 3 – вимикач живлення приладу; 4 – лазер; 5 – об'єктив)

Отже, тепер можемо перейти до побудови функціональної схеми щодо контролю та управління температурним полем технологічного процесу екструзії алюмінієвих профілів (рис. 7).

На рисунку 7 наведено запропоновану структурну схему щодо управління температурним полем технологічного процесу екструзії алюмінієвих профілів. Заготовка 2, який, використовуючи індукційну систему нагріву 1, надають заданої технологічними вимогами температуру, а потім з допомогою приводу подачі заготовки, направляють в гнізда екструдера 4. В екструдері тилова частина оброблюваного матеріалу піддається векторному лінійному навантаженню через поршень гіdraulічного пресу 3 і таким чином направляється до матричного інструменту 5. Інша назва – фільтра. Коли заготовка проходить через матрицю, то вона отримує необхідну нам форму алюмінієвого профілю. Саме на виході ми й пропонуємо перший етап контролю температури об'єкту з допомогою пірометра спектрального відношення ДПР-1 6. Якщо температура має відхилення від заданої

технологічними умовами процесу екструзії алюмінію, то через АСУ (Автоматичну Систему Управління) 7 подається відповідний інформативний сигнал до системи індукційного нагріву про збільшення чи зменшення напруги, яка регулює температуру заготовки. Як наслідок, ми маємо змогу зменшити відсоток браку, мінімізувавши на кінцевому етапі кількість неякісної продукції, та встановити чітке керування системою нагрівання, що в свою чергу допоможе регулювати витрати енергії, необхідної для індукційних нагрівачів, та встановлювати необхідну швидкість переміщення робочої гілки конвеєру.

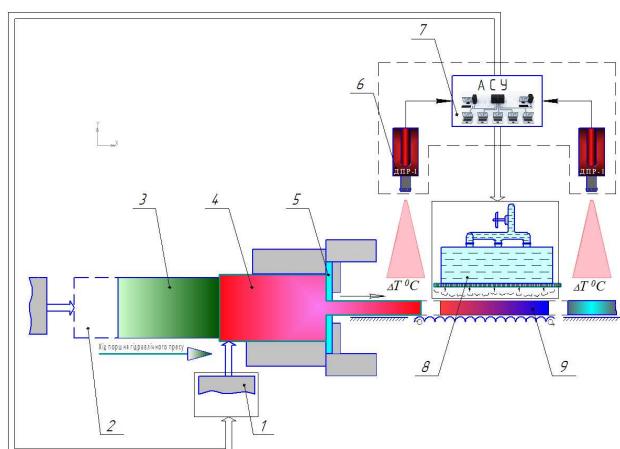


Рис. 7 – Функціональна схема щодо управління температурним полем технологічного процесу екструзії алюмінієвих профілів

(1 – привід подачі заготовки з системою індукційного нагріву; 2 – заготовка; 3 – поршень гіdraulічного пресу; 4 – гніздо екструдера; 5 – матричний інструмент (фільтра); 6 – пірометра двухспектрального відношення ДПР-1; 7 – АСУ (автоматична система управління температурним полем); 8 – система охолодження виробу; 9 – робоча гілка конвеєру)

Другий етап контролю температури пропонуємо після того, як продукція пройде процес охолодження, який передбачений вимогами технологічного процесу екструзії алюмінію. Цей етап є важливим з позиції контролю якості та міцності профілів, які виготовляються, і потім використовуються за призначенням.

Такий комплекс інновацій призначений значно зменшити кількість неякісної продукції, а також сприяти енергоефективності, що дозволить знизити собівартість продукції за рахунок оптимізації використання затрат на нагрів.

Висновки

При використанні контрольно-вимірювального комплексу, де в якості вимірювача температури використаний пірометр ДПР-1, виключається фактор перегріву металу, а відповідно зменшується випуск неякісної продукції і виникає економія електроенергії. В комплексі інформація про

температуру плавки з пірометра передається на комп'ютер і на моніторі відображається в цифровому вигляді, що дає можливість в будь-який час переглянути закінчені процеси екструзії алюмінію.

Також, що дуже важливо, контрольно-вимірювальний комплекс надає дані температури згідно яких можливо керувати швидкістю руху конвеера та потужністю системи індукційного нагріву, що дозволяє збільшувати об'єми готової продукції при оптимізованих затратах на електроенергію.

Автори висловлюють вдячність Державному спеціальному конструкторсько-технологічному бюро оптичного приладобудування з дослідним виробництвом Інституту Фізики Національної Академії Наук України за технічну та експериментальну підтримку роботи.

Список літератури

- 1 **Ткаченко, А. М.** Основні тенденції розвитку алюмінієвої промисловості на сучасному етапі / **А. М. Ткаченко, Ю. Ю. Ястребова** // Економіка промисловості. – 2004 – № 5. – С. 33 - 38.
- 2 **Поскачей, А. А.** Оптико-электронные системы измерения температуры / **А. А. Поскачей, Е. П. Чубаров** // М.: Энергоатомиздат. – 1988. – 340 с.
- 3 **Мирошников, М. М.** Теоретические основы оптико-электронных приборов / **М. М. Мирошников** // Л.: Машиностроение – 1983. – 360 с.
- 4 **Гордов, А. Н.** Основы пирометрии / **А. Н. Гордов** // М.: Металлургия. – 1971. – 240 с.
- 5 **Олейник, Б. И.** Приборы и методы температурных измерений / **Б. И. Олейник, С. И. Лаздина, В. П. Лаздин, О. М. Жагулло** // М.: Изд-во стандартов. – 1987. – 440 с.
- 6 **Скорик, Б. И.** К вопросу применения бесконтактных методов измерения температуры нагретых тел / **Б. И. Скорик, А. В. Гейко** // Системы обработки информации. – 2007. – №9. – С. 129-132
- 7 **Фрунзе, А.** Пирометры спектрального отношения: преимущества, недостатки и пути их устранения / **А. Фрунзе** // Фотоника. – №4. – 2009. – С. 32-37
- 8 **Галунин, С. А.** Исследование методов управления температурным полем в системах нагрева алюминия перед прессованием / **С. А. Галунин, А. Н. Никаноров, А. А. Муратов, Ю. И. Блинов, А. С. Орлов** // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ» – 2012. – С. 87-93
- 9 Мала гірничча енциклопедія. В 3-х т. / За ред. **В. С. Білецького**. — Донецьк: Донбас. – 2004.
- 10 **Saha, P. K.** Aluminum extrusion technology / **P. K. Saha** // Asm International – 2000.
- 11 **Kleiner, M.** Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming / **M. Kleiner, M. Geiger, A. Klaus.** // Cirp Annals - Manufacturing technology. – 2003 – №52(2). – Р. 521-542.
- 12 **Бундза, Б. П., Єлізаров, О. С.** Оптичний пірометр №2196306 опуб. 10.01.2003 Патент РФ заявка 2000119033/28 від 10.07.2000
- 13 **Gaussorgues, G.** La Thermographie Infrarouge / **G. Gaussorgues** //Principes-technologie - Application. Lavoisier – 1988. – 419 p.
- 14 **Савельев, И. В.** Курс общей физики, том III. Оптика, атомная физика, физика атомного ядра и элементарных

- частич / **И. В. Савельев** //М., Изд., «Наука». Глав. ред. физ.-мат. лит 1973.
- 15 **Петренко, В. А.** Пирометрический комплекс с системой команд i-7000 / **В. А. Петренко, А. М. Цубин, Л. Б. Ковал'чук** // ГНПП "РИУС" КИА, г. Киев. – 2002. – С. 372-376.
- 16 **Runde, M.** Induction Heating of Aluminium Billetsusing Superconducting Coil / **M. Runde, N. Magnusson** // PHYSIC. – 2002. – Р. 133-134.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Tkachenko, A. M.** Major trends in the aluminum industry today. Industrial Economy, 2004, **5**, 33 - 38.
- 2 **Poskachey, A. A., Chubarov E.P.** Optoelectronic measurement of temperature. – Moskow: Energoatomisdat, 1988, 340 p.
- 3 **Miroshnikov, M. M.** Theoretical Foundations of optoelectronic devices. Mechanical engineering – Leningrad, 1983, 360 p.
- 4 **Gordov, A. N.** Fundamentals of pyrometry. Moskow: Metallurgy, 1971, 240 p.
- 5 **Olejnik, B. I., Lazdina, S. I., Lazdin, V. P., Zhagullo, O.M.** Devices and methods of temperature measurement - Moskow: Publishing standards, 1987, 440 p.
- 6 **Skorik, B. I., Geiko, A. V.** On the question of the use of contactless methods of measuring the temperature of heated bodies. Information processing systems, 2007, **9**, 129-132.
- 7 **Frunze, A.** Pyrometers spectral ratio: advantages, disadvantages, and how to overcome them. Photonics, 2009, **4**, 32-37.
- 8 **Galunin, S., Nikanorov, A., Muratov, A., Blinov, Y., Orlov, A.** The study of management practices in the field of thermal heating systems prior to compression of aluminum. Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012, 87-93.
- 9 Small mining Encyclopedia. In 3 v. Ed. **V. Beletsky**. Donetsk: Donbas, 2004.
- 10 **Saha, P. K.** Aluminum extrusion technology. Asm International, 2000.
- 11 **Kleiner, M., Geiger, M., Klaus, A.** Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming. Cirp Annals - Manufacturing technology, 2003, **52**(2), 521-542.
- 12 **Bundza, B. P., Yelizarov, O. S.** Optical pyrometer №2196306 published 10.01.2003 RF Patent Application 2000119033/28 from 10.07.2000
- 13 **Gaussorgues, G.** La Thermographie Infrarouge. Principes-technologie - Application. Lavoisier,1988, 419p.
- 14 **Savel'yev, I. V.** Kurs obshchey fiziki, tom III. Optika, atomnaya fizika, fizika atomnogo yadra i elementarnykh chastits. Moskow, Izd., «Nauka», 1973.
- 15 **Petrenko, V. A., Tsubin, A. M., Koval'chuk, L. B.** Pirometricheskiy kompleks s sistemoy komand i-7000. GNPP "RIUS" KIA, Kiev, 2002, 372-376
- 16 **Runde, M., Magnusson, N.** Induction Heating of Aluminium Billetsusing Superconducting Coil, PHYSIC, 2002, 133-134.

Надійшла (received) 15.09.2015

УДК 539.3

ЗАВИСИМОСТЬ СОБСТВЕННЫХ ЧАСТОТ И СОБСТВЕННЫХ ФОРМ КОЛЕБАНИЙ ОТ ИНЕРЦИОННО-ЖЕСТКОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМ С КОНЕЧНЫМ ЧИСЛОМ СТЕПЕНЕЙ СВОБОДЫ

A. V. ГРАБОВСКИЙ

Кафедра теории и систем автоматизированного проектирования механизмов и машин, Национальный технический университет «Харьковский политехнический институт», Харьков, УКРАИНА
email: grabovskiy@tmm-sapr.org

АННОТАЦИЯ В работе предложен новый подход к исследованию чувствительности собственных частот и форм колебаний к варьированию параметров динамической системы. Собственные формы колебаний определяются из условий достижения экстремумов функции Рэлея. Предложен подход к линейной аппроксимации динамических характеристик систем с несколькими степенями свободы на изменение их инерционно-жесткостных параметров. Проведен анализ влияния инерционно-жесткостных характеристик на спектр собственных частот и формы колебаний.

Ключевые слова: свободные колебания, динамическая система, собственная форма колебаний, функция Рэлея, чувствительность.

АННОТАЦІЯ У роботі запропоновано новий підхід до дослідження чутливості власних частот і форм коливань до варіювання параметрів динамічної системи. Власні форми коливань визначаються з умов досягнення екстремумів функції Релея. Запропоновано підхід до лінійної апроксимації динамічних характеристик систем з декількома ступенями свободи на зміну їх інерційно-жорсткісних параметрів. Проведено аналіз впливу інерційно-жорсткісних характеристик на спектр власних частот і форми коливань.

Ключові слова: вільні коливання, динамічна система, власна форма коливань, функція Релея, чутливість.

DEPENDENCE OF NATURAL FREQUENCIES AND NATURAL MODES OF THE INERTIA AND STIFFNESS PROPERTIES OF SYSTEMS WITH FINITELY MANY DEGREES OF FREEDOM

A. GRABOVSKIY

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

ABSTRACT The paper presents a new approach to the linear approximation of the dynamic characteristics of the study and the sensitivity of the natural frequencies and mode shapes to variations in inertial stiffness parameters of the dynamic system. Natural modes are determined by the conditions for maximization or minimization of the Rayleigh function.

The influence of the inertial stiffness characteristics on the spectrum of natural frequencies and their own forms of vibrations. The applicability of this approach based on the use of exact solutions for a finite variation of inertial stiffness parameters (so-called "benchmark" decisions), to predict changes in natural frequencies and natural modes.

It is shown that the linearization gives acceptable accuracy over a wide range varying discrete dynamic system parameters. Accordingly, it can be linearized and reverse dependencies. Thus, these approximations are applicable for solving the parametric sensitivity of the synthesis.

Subsequently, data approximation can be used to design problems, since thus the response function in a neighborhood of the nominal parameter set is linearised. In the presence of linear (or linearized) restrictions (for example, by weight or stiffness) the problem of linear programming to replace the original nonlinear programming problem.

Keywords Free vibration analysis, dynamic system, eigen mode, Rayleigh function, sensitivity

Введение

Известные [1] зависимости собственных частот и собственных форм колебаний динамических систем от их инерционно-жесткостных характеристик имеют достаточно общий вид и требуют во многих случаях численной конкретизации.

Многие авторы [2-6] используют эти зависимости для исследования различных

характеристик и решения частных задач. Например, в работе [2] авторы исследуют свободные колебания вращающейся балки с переменной площадью поперечного сечения. В работе [3] авторы обсуждают характеристики множества допустимых функций, которые используются в методе Рэлея-Ритца. Работы [4-5] посвящены исследованию оболочечных конструкций с применением метода Рэлея-Ритца. В [6] авторы распространяют метод Рэлея-Ритца на

© А. В. ГРАБОВСКИЙ, 2015

решение задачи о собственных значениях прямоугольных пластин с разрывными граничными условиями.

В этой статье представляет интерес реакция собственных частот колебаний и собственных форм колебаний на сравнительно небольшое варьирование относительно некоторого условного «номинального» набора инерционно-жесткостных характеристик. С другой стороны, иногда требуется провести анализ тенденций изменения спектра собственных частот колебаний и собственных форм колебаний при стремлении тех или иных инерционно-жесткостных характеристик к нулю или бесконечности. Разработка метода проведения таких оценок составляет цель данной работы.

Постановка задачи

Исследуется влияние изменения инерционно-жесткостных параметров на динамические системы с несколькими степенями свободы. Они используются для моделирования многомассовых колебательных систем, а также – систем с распределенными параметрами, к которым применена процедура дискретизации (например, по методу конечных элементов [7]). Далее в статье такие системы называются дискретные динамические системы (ДДС).

Метод решения

Исходная разрешающая система обыкновенных дифференциальных уравнений для описания дискретной динамической системы имеет вид:

$$M\ddot{x} + Cx = 0, \quad (1)$$

где M , C – матрицы масс и жесткости исследуемой системы,
 $x(t)$ – массив обобщенных координат исследуемой динамической системы [1 - 7].

Ставится задача определить влияние инерционно-жесткостных параметров, задающих инерционно-жесткостные характеристики исследуемой дискретной динамической системы, на собственный частоты и собственные формы этой системы. Такую задачу можно решить несколькими способами. В предложенной статье для поиска решения будет использоваться функция Рэлея [8 - 10]:

$$R(\lambda_1, \dots, \lambda_N) = \frac{\sum_{ij} c_{ij} \lambda_i \lambda_j}{\sum_{ij} m_{ij} \lambda_i \lambda_j}, \quad (2)$$

где c_{ij} , m_{ij} – компоненты матриц C и M соответственно,

λ_i – компоненты собственных форм колебаний.

Условные экстремумы функции Рэлея (2) соответствуют квадратам собственных частот колебаний ω_s^2 , а наборы параметров $\lambda_{(s)}$ – тем значениям аргументов, которые доставляют эти экстремумы R (т.е. собственных форм колебаний, соответствующих частоте ω_s).

При этом следует принимать во внимание, что свойства реальных динамических систем в общем случае формируются из свойств конструктивов, образующих исследуемые машины, узлы, детали. Если при этом обозначить массив этих определяющих величин $p = \{p_q\}$ ($q = 1, \dots, N_p$), то в соотношениях (1), (2) компоненты матриц жесткостей и масс становятся зависимыми от p . В силу этого уравнение (2) приводится к условиям:

$$\frac{\partial R(p, \lambda)}{\partial \lambda} = 0, \quad \sum_i \lambda_i^2 = 1. \quad (3)$$

Если в пространстве компонент λ выделять линейно независимый базис Λ размерности $(N-1)$ по некоторым соотношениям:

$$\lambda = \lambda(\Lambda), \quad (4)$$

то условные экстремумы (3) соответствуют безусловным:

$$\frac{\partial R(p, \Lambda)}{\partial \Lambda_m} = 0, \quad m = 1, \dots, (N-1). \quad (5)$$

При этом в условиях (5), начиная с первого глобального минимума, после каждого шага исключается очередной компонент Λ из условия ортогональности собственных форм колебаний всем предыдущим формам колебаний [1].

Тогда условия (5) можно привести к виду:

$$\Phi(p, \Lambda) = 0, \quad (6)$$

где Φ – некоторая функциональная зависимость, в которую трансформируется левая часть (5).

Если рассматривать частный случай системы с двумя степенями свободы при одном варьируемом параметре, то собственные формы при учете условия нормировки определяются одним независимым параметром φ [8].

Численная реализация подхода

Тестовая задача выполнена на примере системы с двумя степенями свободы x_1 , x_2 (рис. 1).

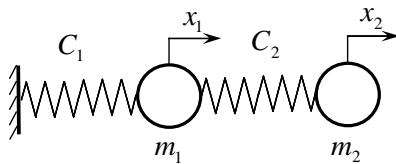


Рис. 1 – Тестовая динамическая система

Математическая модель, как отмечалось выше, основывается на использовании функции Рэлея. Для этого вводится в рассмотрение базисная переменная φ , определяющая угловые положения точки на единичной окружности в системе координат (λ_1, λ_2) :

$$\lambda_1 = \cos \varphi, \quad \lambda_2 = \sin \varphi. \quad (7)$$

В данном случае выражение (2) можно привести к виду:

$$R(\varphi) = \frac{C_1 \cos^2 \varphi + C_2 (\cos \varphi - \sin \varphi)^2}{m_1 \cos^2 \varphi + m_2 \sin^2 \varphi}. \quad (8)$$

Условие экстремальности:

$$R'(p, \varphi) = 0 \quad (9)$$

дает два значения угла φ в интервале $[0, \pi]$, соответствующих двум собственным частотам и собственным формам колебаний.

Соотношение (9) можно трактовать как параметрическую зависимость переменной φ от параметров p . Тогда можно применить для приближенного вычисления производной (9) конечно-разностные соотношения:

$$\frac{\partial R}{\partial \alpha} \approx \frac{R(\alpha^*) - R(0)}{\alpha^*}. \quad (10)$$

Здесь α - малое приращение безразмерного параметра, соответствующего изменению варьируемого параметра p на величину $\Delta p = p_0 \cdot \alpha$. В силу этого соотношения (9) можно трактовать как неявное уравнение, связывающее искомое значение φ и варьируемый параметр p (или в данном случае α), и линеаризовать эту зависимость, причем используя для вычисления производной по параметру конечно-разностное соотношение:

$$\varphi = \varphi(p) = \varphi(p_0(1 + \alpha^*)) \Rightarrow B = \frac{\partial \varphi}{\partial \alpha} \approx \frac{\varphi(\alpha^*) - \varphi(0)}{\alpha^*}, \quad (11)$$

$$R(\alpha, \varphi) \approx R(0, \varphi)(1 + B \cdot \alpha). \quad (12)$$

Здесь α^* - некоторое малое, но конечное значение α , определяющее базу варьирования

параметра p , на которой по конечно-разностным соотношениям приближенно вычисляется производная $\frac{\partial R}{\partial \alpha}$.

Реализовав приведенные выше зависимости, в численном виде можно получить решение поставленной задачи (рис. 2, 3). При этом следует отметить, что в качестве исходных данных для определенности были взяты следующие – $C_1 = 1000 \text{ H/m}$, $C_2 = 1000 \text{ H/m}$, $m_1 = 1 \text{ кг}$, $m_2 = 1 \text{ кг}$.

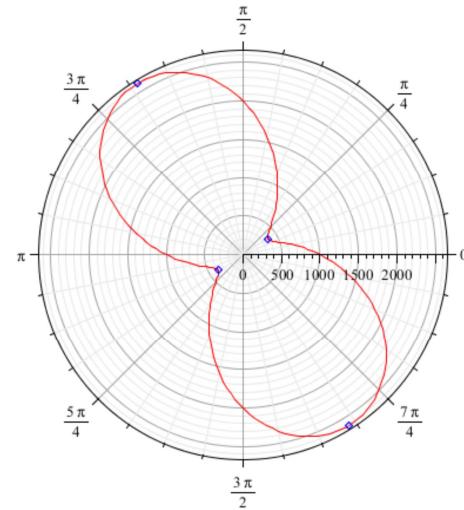


Рис. 2 – Графики функции Рэлея в полярной системе координат с отмеченными маркером корнями

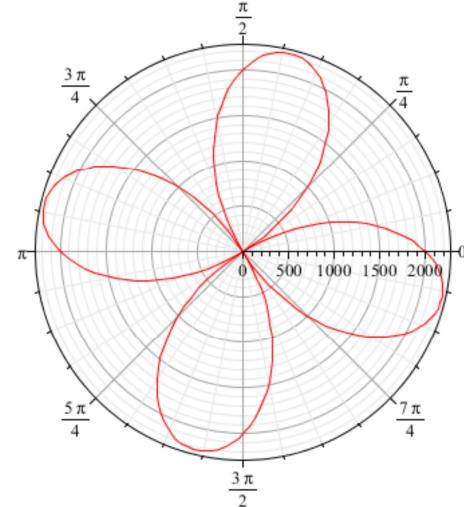


Рис. 3 – Графики первой производной функции Рэлея в полярной системе координат

Решения в полярной системе координат получаются при углах $\varphi_1 = 0.55 \text{ rad}$, $\varphi_2 = 2.12 \text{ rad}$. При этом собственные частоты следующие: $\omega_1^2 = 381.97 \text{ c}^{-2}$, $\omega_2^2 = 2618.03 \text{ c}^{-2}$. У системы с 2мя

степенями свободы - присутствует 2 ортогональных решения. Решение в «плюс-плюс» (или «минус-минус») (без перемены знака) квадрантах соответствуют минимумам, а соответственно первой собственной частоте и форме. Решения в «плюс-минус» (или «минус-плюс») квадрантах (с одной переменой знака) – максимуму, а, соответственно, второй собственной частоте и форме.

Стоит отметить, что данное утверждение будет справедливым и для систем с N числом степеней свободы, с той лишь разницей, что функция будет строиться в N -мерном пространстве, а промежуточные собственные значения будут седловыми точками. При этом следует заметить, что для системы с двумя степенями свободы можно получить аналитические выражения для производных. Однако с точки зрения последующего распространения предложенного подхода на системы с большим количеством степеней свободы уместно использование конечно-разностных соотношений, которые легко обобщаются на систему с произвольным количеством степеней свободы. При этом также важно то обстоятельство, что решение уравнения (9) можно не осуществлять напрямую, а значения ω , φ получить как корни частотного уравнения и уравнения для определения собственных форм в традиционной форме [1].

Аналіз впливання параметрів на собственні частоти і форми ДДС

На приведенных ниже рисунках (рис. 4 - 7) показан характер изменения функции Рэлея и собственных частот при варьировании массовых и жесткостных характеристик приведенной выше системы (см. рис. 1). При этом экстремальные точки определяют на единичной окружности радиус-векторы, соответствующие собственным формам

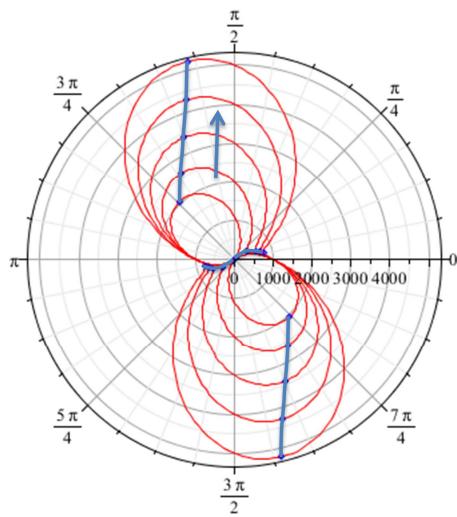


Рис. 4 – Функція Рэлея в полярній системі координат при варіюванні жесткості $C_1 \in [100; 4000] H/m$

колебаний.

Из результатов видно, что все собственные частоты и формы изменяются, смещааясь в квадранте, который им соответствует, и не выходят за его пределы. При этом размах лепестков функции Рэлея, естественно [1], с повышением жесткостей C_1 , C_2 увеличивается, а с повышением масс m_1 , m_2 – уменьшается.

На рис. 8 показан характерный график изменения собственных форм в полярной системе координат для системы с двумя степенями свободы при варьировании параметра C_1 .

Видно, что угол φ , определяющий ориентацию радиус-вектора, который соответствует собственной форме, уменьшается. При этом размах лепестков возрастает, причем в узкой и широкой

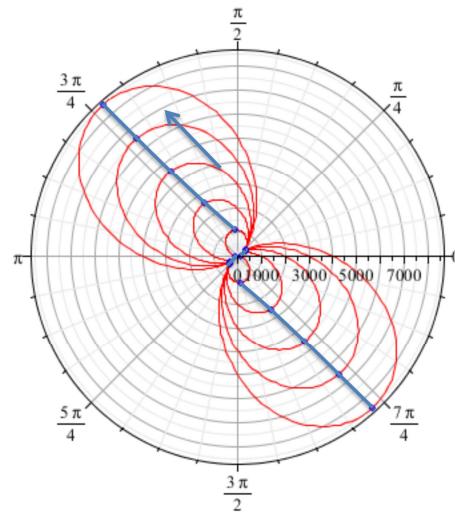


Рис. 5 – Функція Рэлея в полярній системі координат при варіюванні жесткості $C_2 \in [100; 4000] H/m$

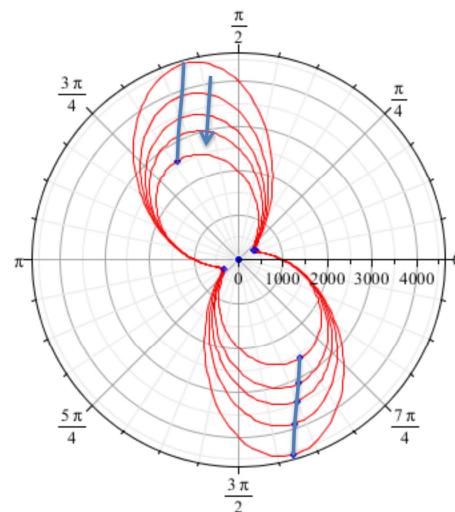


Рис. 6 – Функція Рэлея в полярній системі координат при варіюванні маси $m_1 \in [0.5; 1] kg$

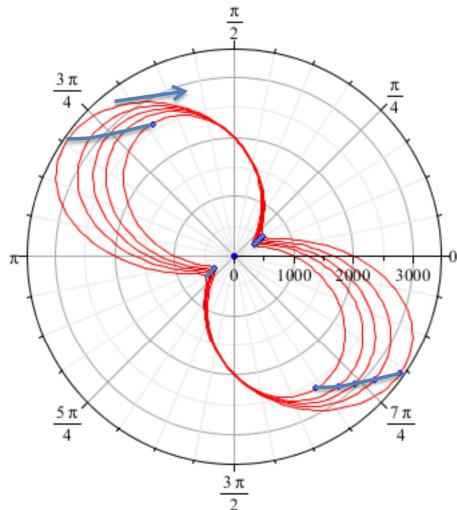


Рис. 7 – Функція Рэлея в полярній системі координат при варіюванні маси $m_2 = [0.5; 1]$ кг

своїй часті – з різною інтенсивністю. В предельному случаю отримаємо (при $C_1 \gg C_2$): $\varphi_1 = 0$;

$$\varphi_2 = \frac{\pi}{2}; \quad \omega_1^2 = \frac{C_2}{m_2}; \quad \omega_2^2 = \frac{C_1}{m_1}.$$

Із приведених параметрів видно, що залежності $\omega^2(p)$, $\varphi(p)$ (або $\omega^2(\alpha)$, $\varphi(\alpha)$) можна в силу неперервності лінеаризувати по p (або відповідно по α), в околісті якої заданому номіналу набору інерційно-жесткостних характеристик дискретної динамічної системи. Так, на рис. 9, 10 приведені графики залежності власних частот та форм коливань при варіюванні

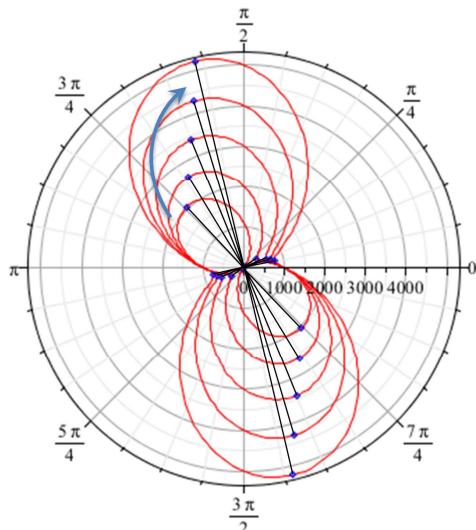


Рис.8 – Графік залежності власних форм в полярній системі координат при варіюванні жесткості $C_1 \in [100; 4000]$ H/m

жесткості C_1 (див. рис. 1), а також їх лінеаризація в околісті якоїто точки $C_1 = 2000$ H/m.

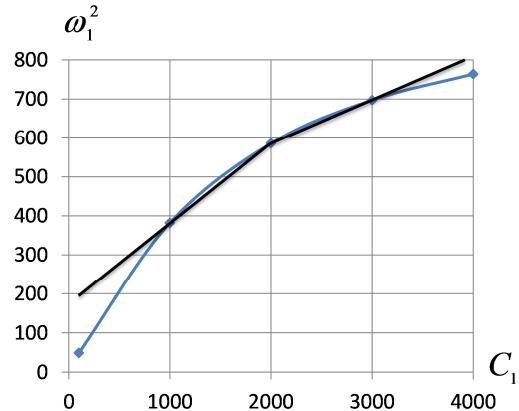


Рис. 9 – Графік залежності $\omega_1^2(\alpha)$ при варіюванні $C_1 \in [100; 4000]$ H/m ($\alpha \in [-0.9; 1]$)

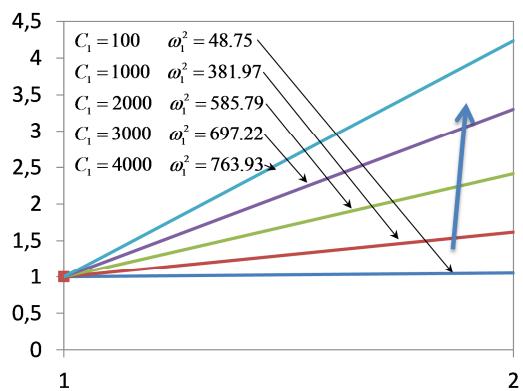


Рис. 10 – Графік залежності λ_1 при варіюванні $C_1 \in [100; 4000]$ H/m

Видно, що лінеаризація дає приемлему точність в достатньо широкому діапазоні варіювання параметрів ДДС ($\alpha \in [-0.5; 1.0]$). Сповідно, можна лінеаризувати і обернені залежності. Таким чином, ці апроксимації применимі для розв'язання задач чутливості та параметричного синтезу.

Выводы

В работе приведен анализ реакции динамических характеристик (собственных частот и собственных форм колебаний) систем с несколькими степенями свободы на изменение их инерционно-жесткостных параметров. Система исследовалась с применением функции Рэлея. Показана применимость этого подхода, основанного на использовании точных решений при конечном варьировании инерционно-жесткостных параметров (т.н. "реперных" решений), для прогнозирования изменения и собственных

частот, и собственных форм колебаний. Данные результаты в дальнейшем планируется применять для решения задач синтеза таких параметров, которые обеспечивают требуемые значения собственных частот и распределения компонент собственных форм колебаний исследуемой системы.

Список літератури

1. **Бабаков, И. М.** Теория колебаний: учеб. Пособие / И. М. Бабаков. – М.: Дрофа, 2004. – 591 с.
2. **Tang, A. Y.** Flapwise bending vibration of rotating tapered Rayleigh cantilever beams / A. Y. Tang, X. F. Li, J. X. Wu, K. Y. Lee // *Journal of Constructional Steel Research*. – 2015. – Volume 112, – P. 1-9.
3. **Monterruebio, L. E., Ilanko, S.** Proof of convergence for a set of admissible functions for the Rayleigh–Ritz analysis of beams and plates and shells of rectangular planform / L. E. Monterruebio, S. Ilanko // *Computers & Structures*. – 2015. – Volume 147, – P. 236-243.
4. **Hyun Wook Lee** Free vibration analysis of a circular cylindrical shell using the Rayleigh–Ritz method and comparison of different shell theories / Wook Lee Hyun, K. Kwak Moon // *Journal of Sound and Vibration*. – 2015. – Volume 353, – P. 344-377.
5. **Lorenzo Dozio** Refined 2-D theories for free vibration analysis of annular plates: Unified Ritz formulation and numerical assessment / Dozio Lorenzo // *Computers & Structures*. – 2015. – Volume 147. – P. 250-258.
6. **Gavalas George R.** Extension of Rayleigh–Ritz method for eigenvalue problems with discontinuous boundary conditions applied to vibration of rectangular plates / George R. Gavalas, El-Raheb Michael // *Journal of Sound and Vibration*. – 2014. – P. 4007-4016.
7. **Зенкевич, О.** Метод конечных элементов в технике / О. Зенкевич. – М.: Мир. – 1975. – 541 с.
8. **Грабовский, А. В.** Чувствительность собственных форм колебаний систем с несколькими степенями свободы к варьированию параметров динамической системы / А. В. Грабовский, Н. А. Ткачук, Н. Н. Ткачук, А. Ю. Танченко, И. В. Мазур // *Вестник НТУ «ХПИ»*. Серия: Транспортное машиностроение. – Х.: НТУ «ХПИ», 2015. (В печати)
9. **Танченко, А. Ю.** Метод прямого конечного возмущения численных моделей при исследовании динамических, жесткостных и прочностных характеристик тонкостенных элементов машиностроительных конструкций / А. Ю. Танченко, А. В. Литвиненко, А. Д. Чепурной, Ю. В. Костенко, Н. А. Ткачук // *Вестник Брянского государственного технического университета*. – Брянск, 2014, – № 4(44). – С. 114-124.
10. **Танченко, А. Ю.** Анализ чувствительности прочностных и динамических характеристик машиностроительных конструкций на основе прямого возмущения конечно-элементных моделей / Н. А. Ткачук, А. Ю. Танченко, А. Н. Ткачук, П. В. Чурбанов, И. Я. Храмцова, О. А. Ищенко // *Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут"*. – Харків : НТУ "ХПІ", 2012. – №22. – С. 147-169.

Bibliography (transliterated)

1. **Babakov, I. M.** Teoriya kolebaniy: ucheb. Posobie. – Moskow: Drofa, 2004, 591 s.
2. **Tang, A. Y., Li, X.-F., Wu, J.-X., Lee, K.Y.** Flapwise bending vibration of rotating tapered Rayleigh cantilever beams. *Journal of Constructional Steel Research*. 2015, **112**, 1-9.
3. **Monterruebio, L. E., Ilanko, S.** Proof of convergence for a set of admissible functions for the Rayleigh–Ritz analysis of beams and plates and shells of rectangular planform. *Computers & Structures*, 2015, **147**, 236-243.
4. **Lee Hyun Wook, Kwak, Moon K.** Free vibration analysis of a circular cylindrical shell using the Rayleigh–Ritz method and comparison of different shell theories. *Journal of Sound and Vibration*. 2015, **353**, 344-377.
5. **Lorenzo Dozio** Refined 2-D theories for free vibration analysis of annular plates: Unified Ritz formulation and numerical assessment. *Computers & Structures*. 2015, **147**, 250-258.
6. **Gavalas George R., Michael El-Raheb** Extension of Rayleigh–Ritz method for eigenvalue problems with discontinuous boundary conditions applied to vibration of rectangular plates. *Journal of Sound and Vibration*, 2014, 4007-4016.
7. **Zenkevich, O.** Metod konechnykh elementov v tekhnike. Moskow: Mir, 1975, 541 p.
8. **Grabovskiy, A. V., Tkachuk, N. A., Tkachuk, N. N., Tanchenko, A. Yu., Mazur, I. V.** Chuvstvitel'nost' sobstvennykh form kolebaniy sistem s neskol'kim stepenyami svobody k var'irovaniyu parametrov dinamicheskoy sistemy. *Vestnik NTU «KhPI». Seriya: Transportnoe mashinostroenie*. – Kh.: NTU «KhPI», 2015. (V pechati)
9. **Tanchenko, A. Yu. Litvinenko, A. V., Chepurnoy, A. D., Kostenko, Yu.V., Tkachuk, N. A.** Metod pryamogo konechnogo vozmushcheniya chislennykh modeley pri issledovanii dinamicheskikh, zheskostnykh i prochnostnykh kharakteristik tonkostennyykh elementov mashinostroitelnykh konstruktsiy. *Vestnik Bryanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. – Bryansk, 2014, **4**(44), 114-124.
10. **Tkachuk, N. A., Tanchenko, A. Yu., Tkachuk, A. N., Churbanov, P. V., Khrantsova, I. Ya., Ishchenko, O. A.** Analiz chuvstvitel'nosti prochnostnykh i dinamicheskikh kharakteristik mashinostroitel'nykh konstruktsiy na osnove pryamogo vozmushcheniya konechno-elementnykh modeley. *Visnik Natsional'nogo tekhnichnogo universitetu "Kharkiv's'kiy politekhnichniy institut"*. – Kharkiv : NTU "KhPI", 2012, **22**, 147-169.

Поступила (received) 15.09.2015

КРИТЕРИАЛЬНА ПАРЕТО-ОПТИМИЗАЦІЯ ПАРАМЕТРОВ АКСІАЛЬНО-ПОРШНЕВЫХ ГІДРОМАШИН

**В. М. ЖЕГЛОВА¹, В. П. ЯГЛІНСКИЙ², Г. В. КОЗЕРАЦКИЙ³, А. С. ОБАЙДИ²,
Н. Н. МОСКВІЧЕВ²**

¹ Кафедра металорежущих станков, метрологии и сертификации, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

² Кафедра машиноведения и деталей машин, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

³ Кафедра управления системами БЖД, Одесский национальный политехнический университет, Одесса, УКРАИНА

АННОТАЦІЯ У статті запропоновані критерії вібростійкості і екстремального перевантаження для всестороннього відображення службових властивостей сферичних торцевих розподільників аксіально-поршневих гідромашин. Для критерійної оптимізації створені відповідні комп'ютерні моделі методом кінцевих елементів. Встановлена можливість зменшення товщини розподільника, що сприяє збільшенню його власної частоти і віддаленню від резонансу в області експлуатаційних частот гідромашин. Згідно Парето-діаграмми запропоновані оптимальні значення товщини розподільника для заданої області зміни тиску і чисел оборотів блоку циліндрів.

Ключові слова: технічні характеристики, еквівалентні напруження, технічний рівень, власна частота

АННОТАЦИЯ В статье предложены критерии вибростойкости и экстремальной перегрузки для всестороннего отображения служебных свойств сферических торцевых распределителей аксиально-поршневых гидромашин. Для критериальной оптимизации созданы соответствующие компьютерные модели методом конечных элементов. Установлена возможность уменьшения толщины распределителя, что способствует увеличению его собственной частоты и удалению от резонанса в области эксплуатационных частот гидромашин. Посредством Парето-диаграммы предложены оптимальные значения толщины распределителя для заданной области изменения давлений и чисел оборотов блока цилиндров

Ключевые слова: технические характеристики, эквивалентные напряжения, технический уровень, собственная частота

PARETO-OPTIMIZATION OF KRITERIA PARAMETERS OF AXIAL AND PISTON MACHINERY HYDRAULICS

**V. M. ZHEGLOVA¹, V. P. YAGLINSKY², G. V. KOZERATSKY³, A. S. OBAYDI²,
M. M. MOSKVICHEV²**

¹ Department of machine tools, metrology and certification, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

² Department of Mechanical Engineering, and machine parts, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

³ Department of life safety systems management, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT In this article be offered criteria of vibration resistance and an extreme overload for comprehensive display of auxiliary properties of spherical face distributors of the axial and pistons hydraulics machine. Dynamics of development of a volume hydraulic actuator is shown in continuous expansion of opportunities by acquisition of more progressive properties and the improved technical characteristics of the hydraulic machine. Therefore the problem of objective, multilevel and comprehensive display of auxiliary properties of the main parts of a design of axial and piston machinery hydraulics is actual. On the basis of technical characteristics of the axial and piston hydraulic machine. are created criteria of vibration resistance and extreme overload. For criteria optimization the corresponding kompyuterny models are created by method of the finite-element method. It is executed research of the intense deformed condition of the distributor of the hydraulic machine. As a result of research strain and deformation of the spherical distributor it is revealed, that the maximum values of equivalent strain are in a transitional zone of a window of the distributor, and the maximum axial displacement – in the middle of a window of distribution of working liquid. Results are presented of modeling of forms vibration of the distributor. Is established the possibility of reduction of thickness of the distributor that promotes increase in its own frequency and removal from a resonance in the field of operational frequencies of the hydraulic machine. By means of Pareto-diagrammy are offered optimum values of thickness of the distributor for the set area of change of pressure and numbers of turns of the block of cylinders

Keywords: technical characteristics, equivalent tension, technological level, fundamental frequency.

Введение

Создание новой техники и своевременная модернизация уже освоенных моделей аксиально-

поршневых гидромашин (АПГ) является фундаментом беспрерывного развития современного производства. Динамика развития объемного гидропривода проявляется в непрерывном

расширении возможностей путем приобретения более прогрессивных свойств и улучшенных технических характеристик гидромашин. Поэтому задача объективного, многоуровневого и всестороннего отображения служебных свойств основных частей конструкции АПГ является актуальной.

Цель и задачи

Вопросам исследования функциональных свойств АПГ посвящены работы отечественных и зарубежных исследователей [1, 4, 6, 7, 9]. Известны работы по анализу технических характеристик АПГ типовых конструкций и предложенный на их основе ряд оценочных показателей и критериев технического уровня [1, 9, 10]. Однако, каждый критерий в отдельности недостаточно полно характеризует технический уровень АПГ. Кроме того, известно, что принятие значений совокупности параметров продукции, оптимизируемых в отдельности, не приводит к повышению технического уровня всего изделия в целом [1, 9, 10]. До настоящего времени отсутствует номенклатура критериев качества по групповым показателям служебных свойств и не разработан системный подход к исследованию технического уровня АПГ как сложной системы. Целью работы является разработка универсальных методов математического и компьютерного исследований, а также методов оптимизации параметров служебных свойств АПГ по групповым показателям (критериям) вибростойкости и экстремальной перегрузки.

Необходимо решить следующие задачи: на основе технических характеристик АПГ сформировать критерии вибростойкости и экстремальной перегрузки; разработать универсальные методы математического и компьютерного исследований предложенных критериев; методами оптимизации построить Парето-оптимальную диаграмму критериев, выбрать из нее область оптимальных значений технических характеристик и параметров распределителя АПГ.

Основная часть исследований

С учетом тенденций форсирования по давлению в АПГ «слабым» элементом становится распределитель с его профилем, геометрией поверхности, конструктивными особенностями перемычек, качеством контактных поверхностей. У существующих современных АПГ наибольшее распространение получили следующие виды двухоконных распределителей: сферический торцевой распределитель (СТР) со сферической торцевой поверхностью (рис. 1) и наклонный распределительный диск (НРД) с плоской наружной поверхностью.

Такие распределители имеют окна высокого и низкого давления (рис. 3).

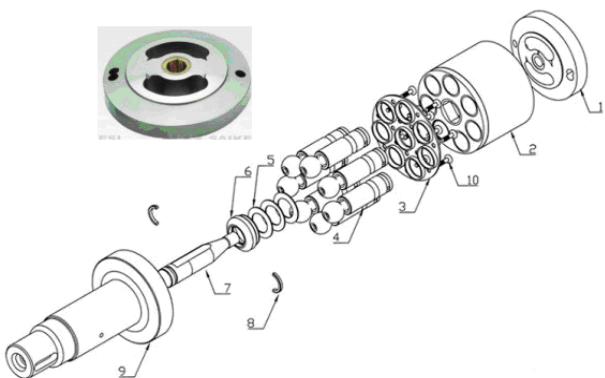


Рис. 1 – АПГ с СТР: 1 – распределитель; 2 – блок цилиндров; 3 – прижимная пластина; 4 – поршень; 5 – тарельчатая пружина; 6 – держатель тарельчатой пружины; 7 – центральный шип; 8 – сухарь; 9 – ведущий вал; 10 – крепеж пластины

Окно с высоким давлением загружено рабочим давлением p и действует на боковую поверхность распределителя по линейному закону.

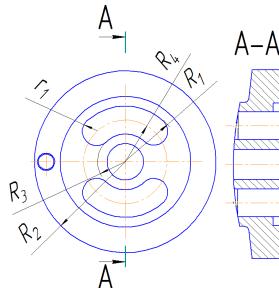


Рис. 2 – Распределители СТР, R_i – определяющие размерные радиусы

В результате анализа опыта эксплуатации и анализа характера повреждений распределителей АПГ, исследования условий возникновения и распространения усталостных трещин установлено, что наиболее нагруженными и опасными участками являются перемычки и наружная стенка окна (рис. 3) [10].

На основе анализа требований потребителей и выводов экспертов по действующим серийным конструкциям АПГ, документации производителей узлов и модулей в составе АПГ и результатов известных исследований технических характеристик установлено номенклатуру показателей качества типовых конструкций. Выделены соответствующие групповые показатели служебных свойств функционирования АПГ: функциональная эффективность, быстродействие, энергоемкость, вибонагружение, надежность. Прообразами групповых показателей являются единичные показатели в виде предложенных критериев.

Основными критериями, характеризующими свойство «вибонагружение», предлагаются: коммутационная частота, вибростойкость подсистемы

распределительного устройства и коэффициент экстремальной перегрузки.

Вибростойкость подсистемы распределителя АПГ, зависящую от соотношения показателя коммутационной частоты и первой главной частоты распределителя, предложено учитывать в виде следующего критерия

$$k_{\omega} = 2\pi n z / (60 \omega_1),$$

где n – частота вращения блока цилиндров, принималась на уровне (1500...3500) мин⁻¹; z – число поршней ($z=7$); ω_1 – зависящая от толщины распределителя первая главная частота распределителя, Гц.

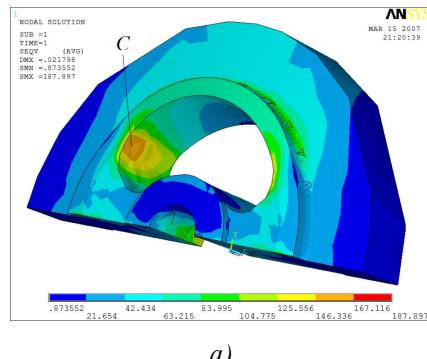
Коэффициент экстремальной перегрузки гидромашины предложено определять соотношением допустимого максимального давления в гидросистеме при заданной толщине распределителя к номинальному (рабочему) давлению

$$k_{ext} = p_{i\ddot{a}\delta} / ([n_{\sigma}] p_i),$$

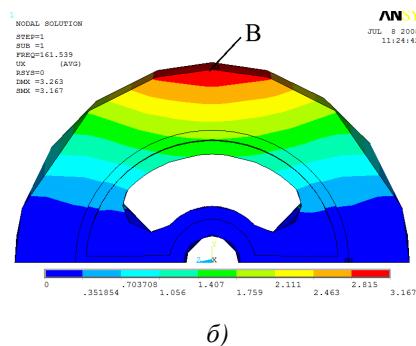
где p_{max} – максимальное давление, которое выдерживает конструкция распределителя с выбранной толщиной 11...26 мм; $[n_{\sigma}]$ – допустимый запас прочности детали, $[n_{\sigma}]=1,8$; p_i – номинальное давление для действующей модели, $p_i=(25...45)$ МПа.

Для исследования критериев вибростойкости и экстремальной перегрузки распределителей АПГ разработаны универсальные методы математического и компьютерного исследований технических характеристик с использованием метода конечных элементов (МКЭ) и реализацией в программных комплексах ANSYS и Autodesk Inventor (рис. 3) [4, 11]. В результате исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) распределителя типа СТР модели 306.112 производства завода «Стройгидравлика» (Одесса) выявлено, что максимальные значения эквивалентных напряжений находятся в переходной зоне окна (см. рис. 3а, точка C), а максимальные осевые перемещения – в середине окна распределения рабочей жидкости (см. рис. 3б, точка B). Результаты компьютерного моделирования НДС согласовываются с анализом причин отказов и разрушения распределителей.

Компьютерным моделированием установлено, что распределитель СТР модели 306.112 производства завода «Стройгидравлика» со стандартной толщиной



a)



б)

Рис. 3 – Результаты компьютерного моделирования распределителя СТР модели 306.112 производства завода «Стройгидравлика» (Одесса):

- a) – распределение эквивалентных напряжений, в точке C – максимум;
- б) – распределение осевых перемещений распределителя, в точке B – максимум

$t_0 = 26$ мм может удержать рабочее давление на уровне 40 МПа. Установлено, что коэффициент запаса прочности сферического распределителя завышен в 1,3 раза. Таким образом, вполне допустимой является эксплуатация АПГ с давлением РЖ на уровне 40 МПа. При эксплуатации АПГ при давлении 25 МПа вполне допустимым является изменение конструкции распределителя путем уменьшение его толщины.

Следовательно, толщину распределителя можно уменьшить без потери запаса прочности. Однако, при уменьшении толщины распределителя увеличивается его первая главная собственная частота, что одновременно увеличивает его вибростойкость в связи с увеличением коэффициента расстройки частот собственной и эксплуатационной (частотой вращения блока цилиндров). Для оптимизации параметров распределителя по двум критериям построена соответствующая диаграмма Парето (рис. 6).

На диаграмме Парето представлено семейство кривых для критерия k_{ext} экстремальной перегрузки распределителя. Компьютерным моделированием каждой толщине t_0 (11...26 мм) распределителя определялся спектр значений критерия k_{ext} (см. рис. 6, кривые – 6, 7, 8, 9) для множества значений номинальных давлений (25, 35, 40, 46) МПа.

При эксплуатации АПГ распределитель воспринимает переменные нагрузления с удвоенной частотой вращения блока цилиндров. Вынужденные колебания также являются причиной разрушения распределителей.

В программе ANSYS посредством модального анализа выполнено решение задачи о свободных колебаниях дискретной системы распределителя и определен спектр главных частот. Исходными данными для решения этой задачи являются граничные условия закрепления и материал распределителя. Аналогичным расчетом в

программном комплексе Autodesk Inventor получены значения собственных частот при 5 модах (рис. 4) [7].

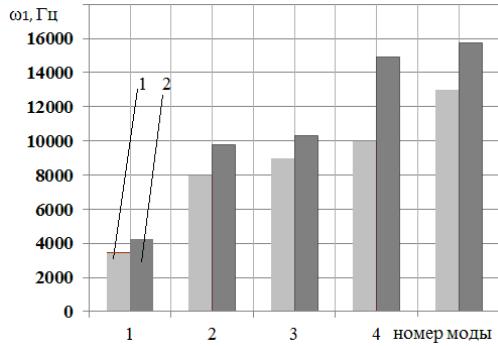


Рис. 4 – Главные частоты распределителя СТР модели 306.112 производства «Стройгидравлика» (Одесса) с толщиной t_0 :
1 – 26 мм; 2 – 16 мм

Расчетами установлено, что значение второй главной частоты для всех конструкций распределителей типовых АПГ значительно превышает значение угловой скорости вращения блока цилиндров и поэтому появление резонанса на этой частоте невозможно [7, 12]. Наиболее близкой к частоте вращения блока цилиндров является первая главная частота, которая и формирует критерий виброактивности k_ω подсистемы распределения жидкости. Показана возможность изменения собственной частоты ТР за счет изменения количества перемычек и толщины распределителя, что позволяет увеличить коэффициент рассогласования частот и отдалить систему от резонанса. Упругие колебания являются причиной нарушения симметричности проходных сечений окон, изменения дросселирования потока рабочей жидкости вследствие расширения или сужения окон СТР. На рис. 5 представлены результаты моделирования форм колебаний распределителя типа СТР модели 306.112 производства завода «Стройгидравлика» (Одесса). На диаграмме Парето представлено семейство кривых для критерия k_ω вибростойкости распределителя [13, 14]. Компьютерным моделированием каждой толщине t_0 (11...26 мм) распределителя определялся спектр значений критерия k_ω (см. рис. 6, кривые – 1, 2, 3, 4, 5) для множества значений чисел оборотов блока цилиндров соответственно (1500, 2000, 3000, 3500, 4000) мин⁻¹.

В результате анализа двухпараметрического семейства абсолютно непрерывных распределений выделена область, составляющая 20 % граничных значений параметров [15, 16]. Каждой точке выделенной области (затенено) соответствует набор оптимальных значений параметров и технических характеристик функционирования распределителей. Например, оптимальные значения для $t_0=18$ мм: $k_\omega = 0,15$; $k_{ext} = 0,15$ при $n = 2000$ мин⁻¹; $p_H = 35$ МПа

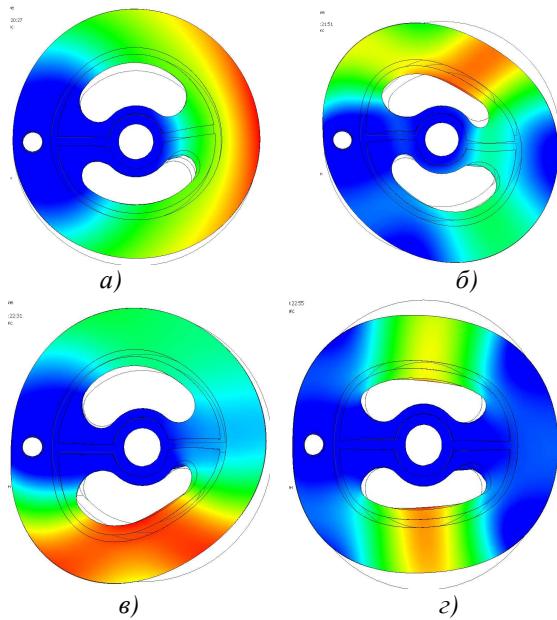


Рис. 5 – Результаты компьютерного моделирования форм колебаний распределителя: а) – 1-я; б) – 2-я; в) – 3-я; г) – 4-я

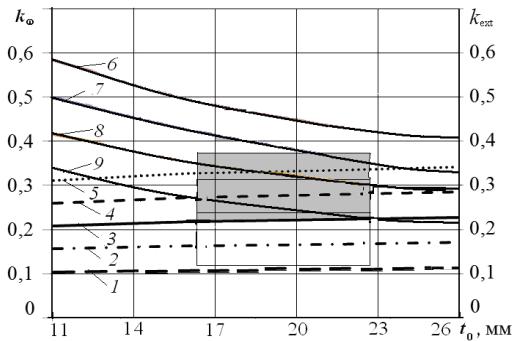


Рис. 6 – Диаграмма Парето-оптимальной области значений критериев k_ω и k_{ext} в пределах одной конструкции распределителя типа АПГ с СТР, 306.112: для k_ω : кривая 1 при $n = 1500$ мин⁻¹; 2 – 2000 мин⁻¹; 3 – 2500 мин⁻¹; 4 – 3000 мин⁻¹; 5 – 3500 мин⁻¹; для k_{ext} : кривая 6 при $p_H = 25$ МПа; 7 – 35 МПа; 8 – 40 МПа; 9 – 45 МПа.

Выводы

- Для исследования технического уровня АПГ предложено критерии вибростойкости и экстремальной перегрузки, характеризующие свойство «вибронагружение».
- Созданы компьютерные модели распределителя для исследования напряженно-деформированного состояния и спектра главных частот.
- В результате двухкритериальной оптимизации построена диаграмма Парето области определения значений технических параметров, обеспечивающих оптимальные критерии повышения технического уровня АПГ.

Список літератури

- 1 **Андренко, П. М.** Проектування гідроагрегатів обертання: монографія / П. М. Андренко, І. П. Гречка, М. С. Свинаренко. – НТУ «ХПІ», Харків, 2013. – 148 с.
- 2 Каталог продукції на ЧАО «Стройгидравлика» (Одеса, Україна). [Ел. ресурс]. Режим доступу: <http://stroygidravlika.com.ua/files/Catalog.pdf>.
- 3 Каталог Продукції ЧАО «Гидросила» (Кіровоград, Одеса, Україна). [Ел. ресурс]. Режим доступу <http://www.hydrosila.com/products/>.
- 4 **Жеглова, В. М.** Аналіз напруженого стану торцевих розподільників аксіально-поршневих гідромашин / В. М. Жеглова, І. В. Ніколенко, Ю. М. Хомяк // Дев'ятий міжн. симпозіум українських інж.-механіків у Львові. Праці. – Львів: КІНПАТРІ ЛТД. – 2009. – С. 38-39.
- 5 **Жеглова, В. М.** Аналіз прочності торцевих распределителей нерегулируемых гидромашин // В. М. Жеглова, Ю. М. Хомяк, И. В. Николенко // Тр. ОНПУ, вып. 1(33) – 2(34). – Одесса, 2010. – С. 39 - 45.
- 6 **Жеглова, В. М.** Численное моделирование напряженно-деформированного состояния торцевого распределителя гидромашин / В. М. Жеглова, И. В. Николенко, Ю. М. Хомяк // Міжвід. наук.-техн. зб. «Прикладна геометрія та інж. графіка». – КНУБА, 2009, №82, С.292-295.
- 7 **Жеглова, В. М.** Расчет собственных частот распределителей аксиально-поршневых гидромашин / В. М. Жеглова, В. Н. Тихенко // Зб. тез доп. IX Всеукр. молодіжн. наук.-техн. конф. „Машинобудування України очима молодих: Прогресивні ідеї наука – виробництво”–Запоріжжя: ЗНТУ. – 2009. – С. 120-122.
- 8 **Тихенко, В. Н.** Влияние геометрических параметров наклонного распределительного диска на его прочностные характеристики / В. Н. Тихенко, Ю. М. Хомяк, В. М. Жеглова // Матер. конф. – Вінниця: Вид-во «ГЛОБУС-ПРЕС», 2014. – С.78-79.
- 9 **Орлов, Ю. М.** Влияние фазораспределения на интенсивность пульсации давления аксиально-плунжерных гидромашин / Ю.М. Орлов // Гидропривод и гидропневмоавтоматика: Ресн. межвед. науч.- техн. сб., 1988, вып. 24, – С. 110 - 111.
- 10 **Пузанов А. В.** Оптимизация конструкции гидромашины в Advanced Simulation Technology Preview / А. В. Пузанов // САПР и графика.– 2009. – №6 – С.70-74.
- 11 **Gutryya, S.** Power evaluation of hydropneumatic shock-absorber at work / S. Gutryya, V. Yaglinsky, A. Siforov // MOTROL, Motorization and Power Industry in Agriculture. – Lublin. – 2008. – Volume 10A. – P. 52 - 59.
- 12 **Yaglinsky, V.** Multi-criterion optimization functional trajectories of industrial robots / V. Yaglinsky, S. Gutryya, O. Bezuglenko // Annals of DAAAM International. – Vienna, 2004. – P. 37 - 38.
- 13 **Zablonsky, K.** System Modeling of Gears Design Quality / K. Zablonsky, S. Gutryya, V. Yaglinsky // International Conference on Gears. – 2005. – P. 417 - 434.
- 14 **Yaglinsky V.** System criteria analysis and function optimization of industrial robots / V. Yaglinsky, S. Gutryya // TEKA Kom. Mol. Energ. Roln., – Lublin, 2006. 6A. – P. 70-81.
- 15 **Gutryya, S.** Comparacion de ejes huecos y solidos, con una grieta / S. Gutryya, Ariza De Miguel J., Ju. Khomiak // Ingenieria Mecanica (Revista electronica), Habana, Cuba, 2013, Vol. 18.
- 16 **Gutryya, S.** Tensiones en ejes huecos con una grieta superficial bajo flexion rotativa / S. Gutryya, Ariza De

Miguel J., Ju. Khomiak // Revista de Ingenieria DYNA, Bilbao, Spain, 2014, Vol. 89, №1.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Andrenko, P. M., Hreshka, I. P., Svinarenko, M. C.** Proektuvania hidroagrehativ obertania: monografia. – NTU «HPI», Kharkiv, 2013, 148.
- 2 Katalog produkciї CHAO «Strohidravlika» [Web] <http://stroygidravlika.com.ua/files/Catalog.pdf>.
- 3 Caralog produkciї CHAO «Hidrosila» [Web] <http://www.hydrosila.com/products/>.
- 4 **Jeglova, V. M., Nikolenko, I. V., Homiak, Ur. M.** Analiz naprujenoho stanu torzevych rospodilnykiv axialno-porschnevych hidromaschyn. Deviatyi mijn. symposium ukraainskych inj.-mechanikiv u Lvovi. Praci. Lviv, KINPATRI LTD, 2009, 38-39.
- 5 **Jeglova, V. M., Nikolenko, I. V., Homiak, Ur. M.** Analiz protschnosti torzevych raspredelitelei nerehuliruemych hidromaschyn. Tr. ONPU, 2010, 1(33)-2(34), 39 - 45.
- 6 **Jeglova, V. M., Nikolenko, I. V., Homiak, Ur. M.** Chislennoe modelirovanie naprjateno-deformirovanoego sostoiania torzevogo raspredelitelai hidromaschyn. Mijvid. nauk.-techn. zb. «Prykladna geometria ta injenernaya grafika». Kyiv, KNUBA, 2009, 82, 292-295.
- 7 **Jeglova, V. M., Tichenko, V. N.** Rastchet sobstvennykh chastot raspredelitelei axialno-porschnevych hidromaschyn. Zb. tez dop. IX Vseukr. molodij. nauk.-techn. konf. „Maschynobuduvannya Ukrayiny otschyma molodych: Progresivni idei nauka-vyrobnyztyo”, Zaporijjia, ZNTU, 2009, 120-122.
- 8 **Tichenko, V. N., Homiak, Ur. M., Jeglova, V. M.** Vliyanie geometritcheskich parametrov naklonnogo raspredelitelnogo diska na ego protschnostnye charakteristiki. Mater. konf. – Vinnytsia: Vyd-vo «GLOBUS-PRES», 2014, 78-79.
- 9 **Orlov, Ur. M.** Vliyanie fazoraspredeleniya na intensivnost pulsacii davlenija axialno-plunjernych hidromaschyn. Hidropriyvod I hidropnevmoavtomatika: Resp. meyved. nauk.-techn. zb., 1988, 24, 110 - 111.
- 10 Puzanov, A. V. Optimizacia konstrukcii hidromaschyny v Advanced Simulation Technology Preview. SAPR I grafika, 2009, 6, 70-74.
- 11 **Gutryya, S., Yaglinsky, V., Siforov, A.** Power evaluation of hydropneumatic shock-absorber at work. MOTROL, Motorization and Power Industry in Agriculture, Lublin, 2008, 10A, 52 - 59.
- 12 **Yaglinsky, V., Gutryya, S., Bezuglenko, O.** Multi-criterion optimization functional trajectories of industrial robots. Annals of DAAAM International, 2004, 37 - 38.
- 13 **Zablonsky, K., Gutryya, S., Yaglinsky, V.** System Modeling of Gears Design Quality. International Conference on Gears. VDI, Germany, 2005, 417 - 434.
- 14 **Yaglinsky, V., Gutryya, S.** System criteria analysis and function optimization of industrial robots. TEKA Kom. Mol. Energ. Roln., Lublin, 2006, 6A, 70 -81.
- 15 **Gutryya, S., Ariza De Miguel J., Khomiak, Ju.** Comparacion de ejes huecos y solidos, con una grieta. Ingenieria Mecanica (Revista electronica), Habana, Cuba, 2013, 18.
- 16 **Gutryya, S., Ariza De Miguel J., Khomiak, Ju.** Tensiones en ejes huecos con una grieta superficial bajo flexion rotativa. Revista de Ingenieria DYNA, Bilbao, Spain, 2014, 89(1).

Поступила (received) 18.10.2015

УДК 620.179.143.5

ФЕРОЗОНДОВИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ В ЗАСОБАХ АВТОМАТИЧНОГО КОНТРОЛЮ ЗАГАЛЬНОЇ МІЦНОСТІ СУДНА

O. P. ЗАВАЛЬНЮК

*Кафедра експлуатації суднового електрообладнання і засобів автоматики, Херсонська державна морська академія, м. Херсон. УКРАЇНА
email: olga-zavalnyuk@mail.ru*

АННОТАЦІЯ Розглянуто застосування ферозонду у засобах автоматичного контролю загальної міцності судна. Визначено розміри та особливості конструкції ферозондових перетворювачів для вимірювання залишкової намагніченості корпусів суден. Запропоновано використання ферозондів довжиною 100 мм з додатковими обмотками збудження по краях осердь напівелементів з метою досягнення їх максимальної чутливості. Визначено величину додаткових обмоток збудження. Для доведення максимальної чутливості ферозонду з додатковими обмотками збудження виконано чисельне моделювання його роботи.

Ключові слова: корпус судна, механічні напруження, залишкова намагніченість, ферозонд

АННОТАЦИЯ Рассмотрено применение феррозонда в средствах автоматического контроля общей прочности судна. Определены размеры и особенности конструкции феррозондовых преобразователей для измерения остаточной намагнченности корпусов судов. Предложено использование феррозонда длиной 100 мм с дополнительными обмотками возбуждения по краям сердечников полузлементов с целью достижения их максимальной чувствительности. Определена величина дополнительных обмоток возбуждения. Для доказательства максимальной чувствительности феррозонда с дополнительными обмотками возбуждения выполнено численное моделирование его работы.

Ключевые слова: корпус судна, механические напряжения, остаточная намагнченность, феррозонд

FLUXGATE TRANSDUCERS IN MEANS OF GENERAL HULL STRENGTH AUTOMATIC CONTROL

O. P. ZAVALNIUK

Department of operation of marine electrical equipment and automation, Kherson state maritime academy, Kherson, UKRAINE

ABSTRACT The application of the flux-gate in the means of general hull strength automatic control is considered. Because of the special and difficult operating conditions of the ship's hulls dimensions and design used flux-gates must be such as to achieve their maximum sensitivity. The objective of this research is to determine the dimensions and design features of flux-gates to measure the ship's hulls residual magnetization. The use of flux-gate with length of 100 mm with additional windings on the cores edges of half-cell to achieve their maximum sensitivity is proposed. This allows to measure the integral value of the magnetic field intensity for the whole length of the core. The value of additional windings, which is 0.3 of the length of flux-gate core on its each edges is determined. To prove the maximum sensitivity of flux-gate with additional windings the numerical simulation his work is carry out. The diagrams of amplitudes of the second harmonic of flux-gate output signal with additional windings and without are demonstrated. Using additional excitation windings allows to receive inhomogeneity of the field excitation over core length not more than 8-9%. Frequency range exciting voltage for flux-gates with long cores, which is in the range 70-120 kHz, which provides the greatest conversion coefficient of flux-gates is defined. The conversion coefficient of flux-gate with additional excitation windings is in 4,52-6,56 times more than without additional windings. The proposed design provides high stability and noise immunity of flux-gate during work directly on the surface of the ship's hull. Continuous monitoring of the ship's hulls in real time using magnetometric method of control mechanical stresses able to give the most objective view of their technical condition.

Keywords: ship's hull, mechanical stresses, residual magnetization, the flux gate

Вступ

Морське судно в ході експлуатації має витримувати без руйнувань зовнішні силові впливи протягом встановленого терміну служби при певних експлуатаційних умовах, тобто володіти міцністю. Зазвичай експлуатація суднового корпуса супроводжується тривалою дією постійно змінюваних зовнішніх навантажень. Характер та величини механічних напружень, виникаючих при цьому у корпусі, різноманітні та залежать

здебільшого від коректності проведення вантажних і баластних операцій, умов плавання, а також багатьох інших факторів. Як правило, пошкодження окремих корпусних конструкцій суден викликане недостатньою загальною та місцевою міцністю, через те, що під час експлуатації судна не враховується величина та розподілення механічних напружень, діючих в несучих суднових конструкціях. Саме тому морські судна вимагають підвищеної уваги в процесі їх експлуатації.

Основною складовою засобів автоматичного контролю загальної міцності судна [1] являються давачі механічних напружень несучих суднових корпусних конструкцій, які здебільшого будуються на явищі тензоефекту. Такі давачі через ряд причин [1] не знайшли широкого застосування на морських суднах.

Контроль суднових корпусів в режимі реального часу з використанням магнітометричного методу контролю механічних напружень здатний давати найбільш об'єктивну картину їх технічного стану [2]. Застосування цього методу контролю під час експлуатації морських суден можливе тільки в тому випадку, якщо величина магнітного поля, створюваного об'єктом контролю, достатня для його реєстрації існуючими магніточутливими елементами. При цьому полем, що намагнічує, є тільки магнітне поле Землі величиною 40-80 A/m. Така величина магнітного поля не може довести об'єкт контролю до стану, близького до насичення, тому контролюваній об'єкт має залишкову намагніченість, завдяки якій на його поверхні формується магнітне поле розсіювання.

Для вимірювання величини залишкової намагніченості на поверхні судна найбільш перспективними є магнітомодуляційні перетворювачі – ферозонди. Теорія ферозондів досить добре була розвинута Янусом Р.І., Табачником В.П., Афанасьевим Ю.В., Яковенком В.В., серед зарубіжних вчених відомі: Ф. Фюрстер, М. Акуна, П. Ріпка, Гао Зу-Ченг та багато інших. Ферозонди широко використовуються в магнітній дефектоскопії для реєстрації полів розсіювання дефекту. Ферозондові перетворювачі є пристроями активного типу. Процеси, які відбуваються у ферозондах [3-5], пов'язані з дією двох полів: додаткового допоміжного поля збудження і зовнішнього вимірюваного поля. Причому поле збудження формується за рахунок струму, який протікає в одній з обмоток перетворювача. Загалом, ферозондові перетворювачі [6] – «це пристрій для вимірювання напруженості магнітного поля, дія яких заснована на нелінійності кривих намагнічування осердя з магнітних матеріалів». Найбільш простою конструкцією ферозонду [6-7] є осердя з обмоткою збудження та індикаторною обмоткою. За допомогою першої обмотки формується поле збудження, в осерді виникає індукція, яка індукує магнітну електрорушійну силу (ЕРС).

У магнітних методах неруйнівного контролю найбільшого поширення набули диференціальні ферозонди з подовжнім збудженням, що являють собою два осердя, виготовлених з пермалою, з первинними обмотками збудження і вторинними вимірювальними обмотками на кожному осерді [8]. У ферозонді-полемірі первинні обмотки обох осердь живляться змінним струмом і сполучені диференціально, а вимірювальні – послідовно. У ферозонді-градіентометрі, навпаки, первинні обмотки сполучені послідовно, а вторинні – зустрічно.

Ферозонди-полеміри вимірюють абсолютне значення напруженості магнітного поля, тоді як ферозонди-градіентометри – приріст (градієнт) напруженості поля від однієї точки до іншої [6, 9]. Причому струм збудження в первинних обмотках ферозонду обирається таким чином, щоб ферозонд працював на лінійній частині своєї характеристики.

Мета роботи

Через особливі та складні умови експлуатації корпусів морських суден розміри та конструкція застосовуваних ферозондів має бути такою, щоб досягти їх максимальної чутливості. Метою даного дослідження є визначення розмірів та особливостей конструкції ферозондів для вимірювання залишкової намагніченості корпусів морських суден.

Викладення основного матеріалу

У роботі пропонується використовувати ферозондові перетворювачі довжиною 50-100 мм з додатковими обмотками збудження. На рис. 1 представлена схема конструктивного виконання ферозонду в режимі полеміра, де 1 – осердя; 2 – вихідна обмотка; 3 – обмотки збудження; 4.1, 4.2 – додаткові обмотки збудження; l – довжина обмотки збудження; l_0 – довжина додаткової обмотки збудження. На рис. 2 – електрична принципова схема ввімкнення обмоток ферозонду, де $W_{1.1}$; $W_{1.2}$ – обмотки збудження; $W'_{1.1}$; $W'_{1.2}$; $W''_{1.1}$; $W''_{1.2}$ – додаткові обмотки збудження; W_2 – вихідна обмотка.

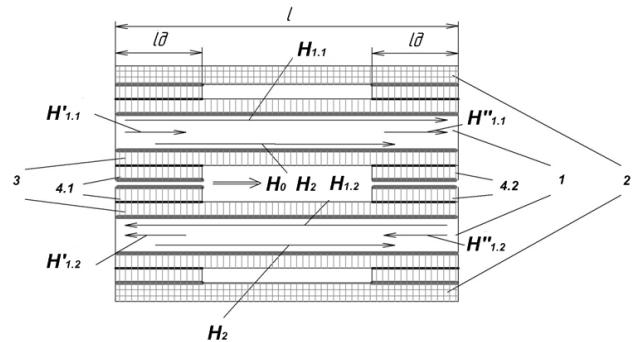


Рис. 1 – Ферозонд у режимі полеміра

Для осердь прямокутного перетину згідно з [10] величина намагніченості, a , відповідно, і коефіцієнт розмагнічування N (розмагнічувальний чинник) змінюються, тобто магнітне поле уздовж осердя розподіляється нерівномірно. Так для осердь, форма яких відрізняється від форми еліпсоїда [10], коефіцієнт розмагнічування залежить і від величини магнітної проникності речовини. Вказано магнітна характеристика спричиняє вплив на характер зміни величини індукції уздовж осердя.

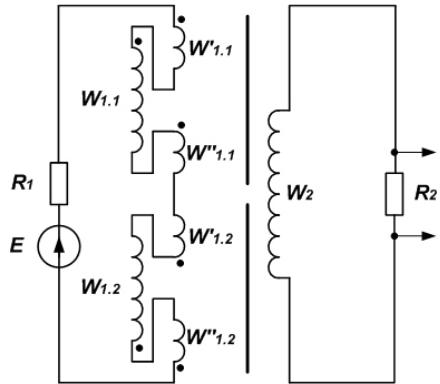


Рис. 2 – Схема ввімкнення обмоток ферозонду

Розподіл магнітної індукції уздовж ненасиченої стрижні, виготовленого з магнітом'якого матеріалу, при намагнічуванні в рівномірному магнітному полі згідно [10] описується формулою

$$B_x = B_0 \left(1 - C \frac{4x^2}{l^2} \right), \quad (1)$$

де B_0 – величина індукції у середньому перетині осердя; B_x – значення магнітної індукції у перетині, розташованому на відстані x від середнього перетину осердя (рис. 3). Для стрижнів прямокутного поперечного перетину відповідно [10] $C = 0,75$.

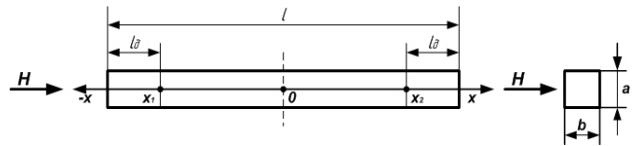


Рис. 3 – До визначення магнітних характеристик розімкнених осердь

Коефіцієнт розмагнічування розімкненого осердя визначається за формулою [10] $N = \frac{1}{m}$, де m – проникність форми розімкненого осердя. Разом з тим, проникність форми розімкненого осердя в його середньому перетині описується наступним виразом [10]:

$$m = \frac{\pi \cdot l^2}{4S \left(\ln \frac{kl}{a+b} - 1 \right)}, \quad (2)$$

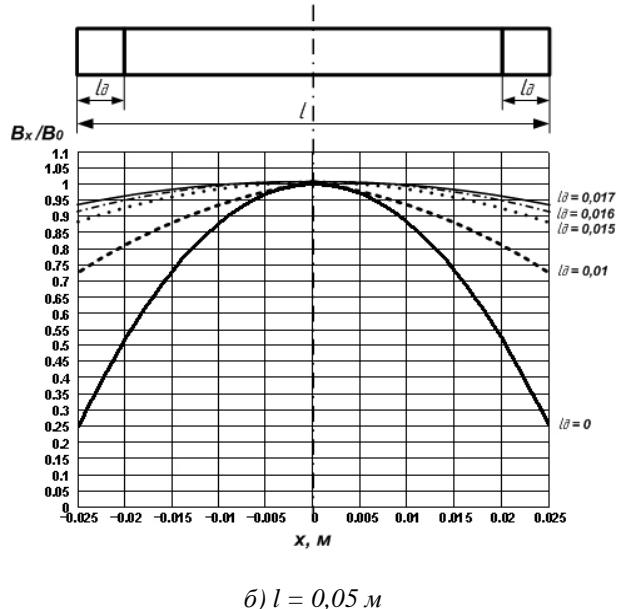
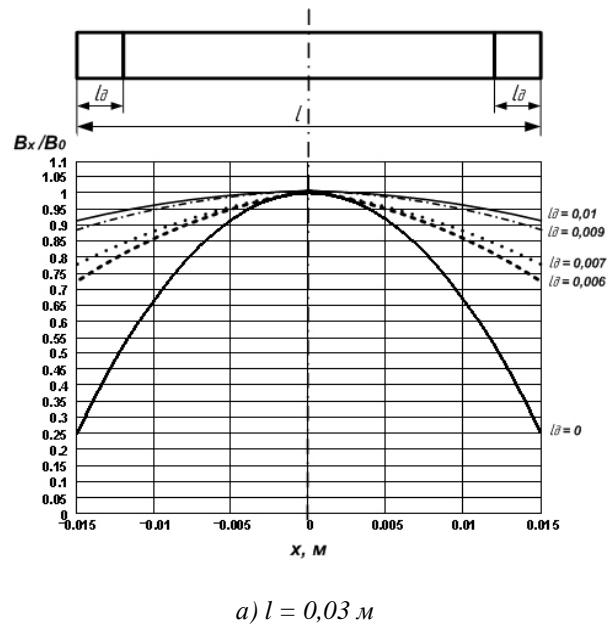
де S – площа поперечного перетину осердя; a, b – поперечні розміри осердя, $k = 3,6$ – коефіцієнт, що залежить від форми осердя.

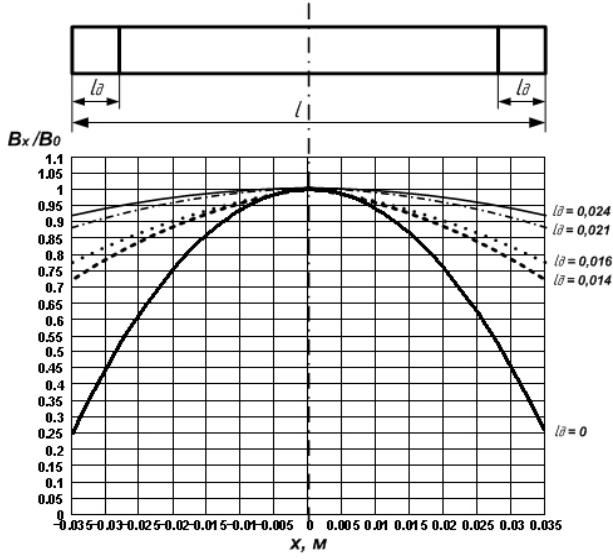
Проникність форми розімкненого осердя в перетині, розташованому на деякій відстані x від його середнього перетину обчислюється за формулою [10]:

$$m = \frac{\pi \cdot l^2 \left[1 - \frac{4C}{3l^2} (x_1^2 + x_1 x_2 + x_2^2) \right]}{4S \left(\ln \frac{kl}{a+b} - 1 \right)}. \quad (3)$$

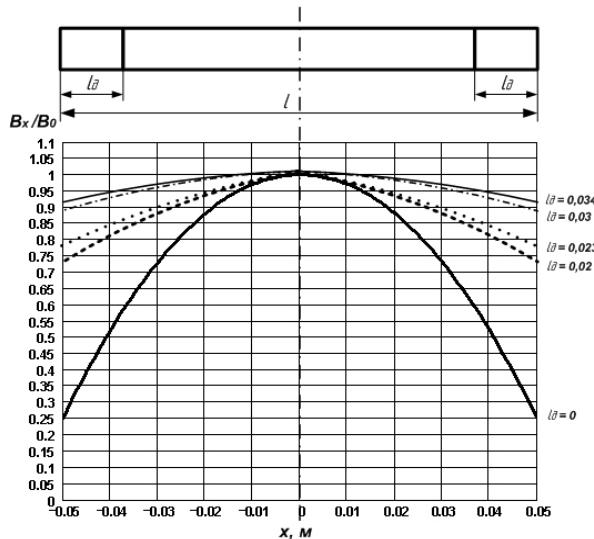
Таким чином, доцільно не змінюючи форму осердя, збільшити число витків по його краях, тобто ввести додаткові обмотки збудження, тим самим вирівнюючи магнітне поле уздовж осердя.

Результати розрахунків довжин ділянок додаткової обмотки збудження l_∂ для різних довжин осердя ферозонду: $l = 0,03 \text{ м}$, $l = 0,05 \text{ м}$, $l = 0,07 \text{ м}$, $l = 0,1 \text{ м}$ представлені вигляді графіків (рис. 4).





e) $l = 0,07 \text{ м}$



ε) $l = 0,1 \text{ м}$

Рис. 4 – До визначення довжин ділянок додаткової обмотки збудження

Таким чином, ґрунтуючись на результатах приведених вище розрахунків, найбільш оптимальною величиною додаткових обмоток збудження є довжина, яка складає 0,3 від довжини осердя ферозонду з його кожного краю.

Для доведення максимальної чутливості ферозонду з додатковими обмотками збудження необхідно виконати чисельне моделювання його роботи. Функція перетворення ферозонду є його головною характеристикою, яка є відношенням одного з параметрів вихідної напруги ферозонду до величини напруженості або індукції магнітного поля, яке вимірюється [3]. Як правило, у якості параметру вихідної напруги використовується амплітуда другої гармоніки вихідного сигналу ферозонду. Може також

застосовуватися [9] амплітудне або діюче значення вихідної напруги. В ході розрахунку функції перетворення ферозонду $U_{\text{aux}} = f(H_0)$ розсіюванням магнітного потоку осердь, а також впливом вихрових струмів можна знехтувати. Разом з тим передбачається, що електромагнітні процеси в осердях ферозонду протікають без гістерезису. Закон зміни ЕРС збудження, яка не містить вищих гармонік, – синусоїdalний.

Петля гістерезису апроксимується функцією арктангенса згідно [11-12]:

$$B = \frac{2B_s}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{\pi H}{2H_s} \right), \quad (4)$$

де B_s, H_s – відповідно індукція та напруженість насичення матеріалу осердь. Для сплаву марки 79НМ (високонікельовий пермалой): $B_s = 0,75 \text{ Tl}$, $H_s = 2500 \text{ A/m}$.

Для вхідного кола ферозонда (рис. 2), відповідно до другого закону Кірхгофа, можна записати наступну систему рівнянь:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \psi_{1,1} + \frac{d}{dt} \psi'_{1,1} + \frac{d}{dt} \psi''_{1,1} + \frac{d}{dt} \psi_{1,2} + I_1 R_1 &= E; \\ \frac{d}{dt} \psi_{2,1} - \frac{d}{dt} \psi_{2,2} + I_2 R_2 &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

де $\psi_{1,1}, \psi'_{1,1}, \psi''_{1,1}$ – потокозчеплення напівelemенту ферозонда первинної основної та додаткової обмоток відповідно; $\psi_{1,2}, \psi_{2,1}$ – коефіцієнти взаємного впливу обмоток; $\psi_{2,2}$ – потокозчеплення напівelemенту ферозонда вторинної обмотки. Потокозчеплення обмоток представляються у вигляді:

$$\begin{aligned} \psi_{1,1} &= W_{1,1} \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0); \\ \psi'_{1,1} &= W'_{1,1} \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0); \\ \psi''_{1,1} &= W''_{1,1} \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0); \\ \psi_{1,2} &= (W_{1,1} + W'_{1,1} + W''_{1,1}) \cdot S \times \\ &\times B(H_{1,2} + H'_{1,2} + H''_{1,2} - H_2 - H_0); \\ \psi_{2,1} &= W_2 \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0); \\ \psi_{2,2} &= W_2 \cdot S \cdot B(H_{1,2} + H'_{1,2} + H''_{1,2} - H_2 - H_0), \end{aligned} \quad (6)$$

де S – площа поперечного перетину осердя ферозонду; I_1, R_1 – струм та активний опір в обмотці збудження, що дорівнює сумі вихідного опору генератора збудження та активного опору провідника обмотки збудження; H_0 – напруженість вимірюваного поля; $H_{1,1}, H'_{1,1}, H''_{1,1}$ – напруженість поля, створювана струмом відповідно основної та додаткової обмоток збудження першого напівelemента; $H_{1,2}, H'_{1,2}, H''_{1,2}$ – напруженість поля, створювана струмом відповідно основної та додаткової обмоток збудження другого напівelemента; H_2 – напруженість поля, створювана струмом вторинної обмотки ферозонду; $W_{1,1}' = W_{1,1}'' = W_o$; I_2, R_2 – струм та опір вихідної

обмотки; $E = E_m \sin(\omega t)$ – ЕРС генератора, де E_m – амплітуда ЕРС генератора збудження.

Відповідно до закону повного струму для первинної та вторинної обмоток ферозонда справедливі наступні вирази:

$$I_1(W_{1,1} + W'_{1,1} + W''_{1,1}) = H_{1,1}l + H'_{1,1}l_\vartheta + H''_{1,1}l_\vartheta; \quad (7)$$

$$I_2W_2 = H_2l,$$

звідки струми первинної та вторинної обмоток збудження дорівнюють:

$$I_1 = \frac{H_{1,1}l + H'_{1,1}l_\vartheta + H''_{1,1}l_\vartheta}{W_{1,1} + W'_{1,1} + W''_{1,1}}; \quad (8)$$

$$I_2 = \frac{H_2l}{W_2}.$$

Враховуючи функцію апроксимації кривої намагнічування осердя ферозонду (4), а також

$$\frac{d}{dt} \operatorname{arctg}(f(t)) = \frac{\frac{d}{dt} f(t)}{1 + f(t)^2} \quad \text{для зміни величини}$$

магнітної індукції в часі справедливі вирази:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B &= \frac{d}{dt} \left(\frac{2B_s}{\pi} \operatorname{arctg} \left(\frac{\pi H}{2H_s} \right) \right) = \\ &= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} H}{1 + \left[\frac{\pi H}{2H_s} \right]^2}, \\ \frac{d}{dt} B(H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0) &= \\ &= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0)}{1 + \left[\frac{\pi (H_{1,1} + H'_{1,1} + H''_{1,1} + H_2 + H_0)}{2H_s} \right]^2}. \end{aligned} \quad (9)$$

Використовуючи метод накладення з метою виключення громіздкості обчислень, система рівнянь (5) може бути представлена у вигляді трьох систем диференціальних рівнянь для основної і додаткових обмоток збудження відповідно:

a)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \psi_{1,1} + \frac{d}{dt} \psi_{1,2} + I_1 R_1 &= E; \\ \frac{d}{dt} \psi_{2,1} - \frac{d}{dt} \psi_{2,2} + I_2 R_2 &= 0, \end{aligned} \quad (10)$$

де $\psi_{1,1} = W_{1,1} \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H_2 + H_0)$;

$\psi_{1,2} = W_{1,1} \cdot S \cdot B(H_{1,2} - H_2 - H_0)$;

$\psi_{2,1} = W_2 \cdot S \cdot B(H_{1,1} + H_2 + H_0)$;

$\psi_{2,2} = W_2 \cdot S \cdot B(H_{1,2} - H_2 - H_0)$;

$$I_1 = \frac{H_{1,1}l}{W_{1,1}}; \quad I_2 = \frac{H_2l}{W_2}.$$

б)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \psi'_{1,1} + \frac{d}{dt} \psi'_{1,2} + I'_1 R'_1 &= E; \\ \frac{d}{dt} \psi'_{2,1} - \frac{d}{dt} \psi'_{2,2} + I'_2 R'_2 &= 0, \end{aligned} \quad (11)$$

де $\psi'_{1,1} = W_\vartheta \cdot S \cdot B(H'_{1,1} + H'_2 + H_0)$;

$\psi'_{1,2} = W_\vartheta \cdot S \cdot B(H'_{1,2} - H'_2 - H_0)$;

$\psi'_{2,1} = W_2 \cdot S \cdot B(H'_{1,1} + H'_2 + H_0)$;

$\psi'_{2,2} = W_2 \cdot S \cdot B(H'_{1,2} - H'_2 - H_0)$;

$$I'_1 = \frac{H'_{1,1}l_\vartheta}{W_\vartheta}; \quad I'_2 = \frac{H'_2l}{W_2}.$$

в)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \psi''_{1,1} + \frac{d}{dt} \psi''_{1,2} + I''_1 R''_1 &= E; \\ \frac{d}{dt} \psi''_{2,1} - \frac{d}{dt} \psi''_{2,2} + I''_2 R''_2 &= 0, \end{aligned} \quad (12)$$

де $\psi''_{1,1} = W_\vartheta \cdot S \cdot B(H''_{1,1} + H''_2 + H_0)$;

$\psi''_{1,2} = W_\vartheta \cdot S \cdot B(H''_{1,2} - H''_2 - H_0)$;

$\psi''_{2,1} = W_2 \cdot S \cdot B(H''_{1,1} + H''_2 + H_0)$;

$\psi''_{2,2} = W_2 \cdot S \cdot B(H''_{1,2} - H''_2 - H_0)$;

$$I''_1 = \frac{H''_{1,1}l_\vartheta}{W_\vartheta}; \quad I''_2 = \frac{H''_2l}{W_2}.$$

Враховуючи вираз (9), а також $\frac{d}{dt}(H_0) = 0$, для основної і додаткової обмоток збудження справедливі вирази:

a)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B(H_{1,1} + H_2 + H_0) &= \\ &= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H_{1,1} + H_2)}{1 + \left[\frac{\pi (H_{1,1} + H_2 + H_0)}{2H_s} \right]^2}; \\ \frac{d}{dt} B(H_{1,2} - H_2 - H_0) &= \\ &= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H_{1,2} - H_2)}{1 + \left[\frac{\pi (H_{1,2} - H_2 - H_0)}{2H_s} \right]^2}. \end{aligned} \quad (13)$$

б)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B(H'_{1,1} + H'_2 + H_0) &= \\ &= \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt} (H'_{1,1} + H'_2)}{1 + \left[\frac{\pi (H'_{1,1} + H'_2 + H_0)}{2H_s} \right]^2}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B(H'_{1,2} - H'_2 - H_0) &= \\ = \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt}(H'_{1,2} - H'_2)}{1 + \left[\frac{\pi(H'_{1,2} - H'_2 - H_0)}{2H_s} \right]^2} &. \quad (14) \end{aligned}$$

в)

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} B(H''_{1,1} + H''_2 + H_0) &= \\ = \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt}(H''_{1,1} + H''_2)}{1 + \left[\frac{\pi(H''_{1,1} + H''_2 + H_0)}{2H_s} \right]^2} &; \\ \frac{d}{dt} B(H''_{1,2} - H''_2 - H_0) &= \\ = \frac{B_s}{H_s} \cdot \frac{\frac{d}{dt}(H''_{1,2} - H''_2)}{1 + \left[\frac{\pi(H''_{1,2} - H''_2 - H_0)}{2H_s} \right]^2} &. \quad (15) \end{aligned}$$

Сигнал на виході ферозонду визначається за наступною формулою:

$$U_{\text{out}} = -I_2 \cdot R_2 = -(H_2 + H'_2 + H'') \frac{IR_2}{W_2}. \quad (16)$$

Розв'язання диференціальних рівнянь, а також визначення вихідного сигналу ферозонду виконане в програмному середовищі MATLAB (Free Trial Download version) з використанням підсистеми візуального математичного моделювання Simulink [13].

Отримані аналітичні залежності дозволяють провести чисельні розрахунки вихідних параметрів ферозондів. Розрахунок було проведено для ферозондів, осередя яких виконані із сплаву марки 79НМ, з довжиною осередь: $l = 0,03 \text{ м}$, $l = 0,05 \text{ м}$, $l = 0,07 \text{ м}$, $l = 0,1 \text{ м}$ та довжинами додаткових обмоток, відповідно: $l_o = 0,01 \text{ м}$, $l_o = 0,017 \text{ м}$, $l_o = 0,024 \text{ м}$, $l_o = 0,034 \text{ м}$; площею поперечного перетину: $S = 5 \cdot 10^{-8} \text{ м}^2$, амплітудою ЕРС генератора збудження $E = 20 \text{ В}$.

Обговорення результатів

Проведений розрахунок вихідного сигналу дозволив отримати відповідні залежності для трьох частот збудження 50 кГц, 100 кГц, 200 кГц. Також був проведений розрахунок вихідного сигналу ферозонду без додаткових обмоток при частоті збудження 100 кГц (рис. 5). На рис. 5 представлено амплітуду другої гармоніки вихідного сигналу ферозонда (U_{2m} , мВ) з додатковими обмотками збудження: частота збудження 100 кГц. На рис. 6 зображені амплітуди другої гармоніки вихідного

сигналу ферозонда (U_{2m} , мВ) без додаткових обмоток збудження при частоті збудження 100 кГц. На рис. 5, 6 позначені наступні криві: 1 – $l = 0,03 \text{ м}$; 2 – $l = 0,05 \text{ м}$; 3 – $l = 0,07 \text{ м}$; 4 – $l = 0,1 \text{ м}$.

Знайдені (рис. 6) значення вихідного сигналу ферозонда без додаткових обмоток збудження відповідають з точністю 3-5% значенням, отриманим в [3, 5], що підтверджує достовірність запропонованої математичної моделі. Згідно з отриманими результатами, вихідний сигнал ферозонду з додатковими обмотками збудження у 7,1 – 13,3 разів більший, ніж без цих обмоток. Також розширенна лінійна ділянка вихідного сигналу до 1500 – 2000 А/м. Частотний діапазон збудження 70 – 120 кГц забезпечує стабільне значення вихідного сигналу ферозондів різної довжини при максимальному значенні крутизни лінійної ділянки вихідного сигналу.

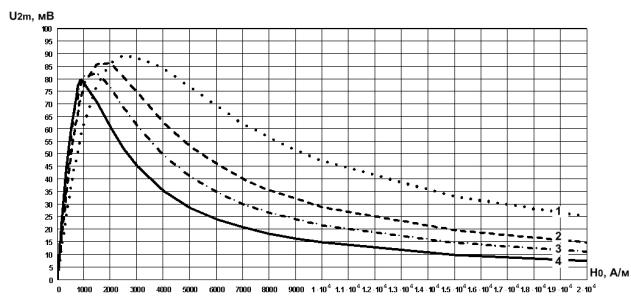


Рис. 5 – Амплітуда другої гармоніки вихідного сигналу ферозонду з додатковими обмотками збудження

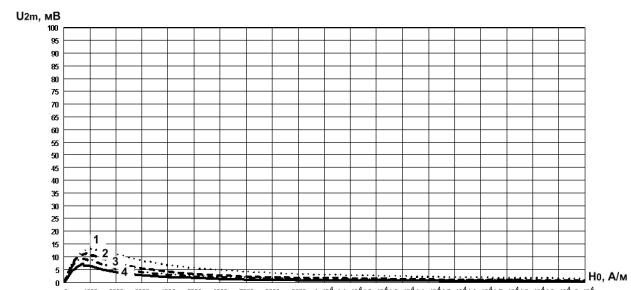


Рис. 6 – Амплітуда другої гармоніки вихідного сигналу ферозонду без додаткових обмоток збудження

Для даних довжин ферозондів діапазон зміни максимального значення функції перетворення без додаткових обмоток складає від 0,017 мВ/(А/м) до 0,025 мВ/(А/м), а для ферозонду з додатковими обмотками – від 0,077 мВ/(А/м) до 0,164 мВ/(А/м).

Висновки

При вимірюванні залишкової намагніченості корпусів морських суден запропоновано використовувати ферозонд завдовжки 100 мм, що дозволяє вимірювати інтегральне значення напруженості магнітного поля за всією довжиною

осердя. Для забезпечення достовірності інформації про магнітне поле суднового корпусу, отримуваної ферозондом, необхідно забезпечити рівномірне значення магнітної проникності осердя ферозонду по всій його довжині. Введення додаткових обмоток збудження по краях осердя напівелементів ферозондів дозволяє отримати неоднорідність поля збудження за довжиною осердя не більше 8-9%. Ферозонд з додатковими обмотками збудження дозволяє отримати амплітуду вихідного сигналу другої гармоніки на рівні 80-89 мВ, що в 7,1-13,3 разів більше, ніж амплітуда такого ж ферозонду без додаткових обмоток. Визначено діапазон частоти збуджуючої напруги для ферозондів з довгими осердями, який знаходиться в межах 70-120 кГц, що забезпечує найбільший коефіцієнт перетворення ферозонду. Коефіцієнт перетворення ферозонду з додатковими обмотками збудження в 4,52-6,56 разів більше, ніж без додаткових обмоток, що забезпечує ферозонду підвищену стабільність і перешкодостійкість при роботі безпосередньо на поверхні об'єкту контролю.

Список літератури

- 1 **Мирошников, В. В.** Контроль прочности корпуса судна / **В. В. Мирошников, О. П. Завальнюк, В. Б. Нестеренко.** – Херсон: Гринь Д. С., 2015. – 108 с.
- 2 **Завальнюк, О. П.** Магнитный контроль корпусов морских судов в процессе грузовых и балластных операций / **О. П. Завальнюк, В. В. Мирошников** // Вісник СНУ ім. В. Даля: Науковий журнал. – Луганськ: Видавництво СНУ ім. В. Даля. – № 18 (189). – С. 76 - 82.
- 3 **Афанасьев, Ю. В.** Феррозондовые приборы / **Юрий Васильевич Афанасьев.** – Л.: Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1986. – 188 с.
- 4 **Bonavolontà, C.** Detection of Magnetomechanical Effect in Structural Steel Using SQUIDs and Flux-gate Sensors / **C. Bonavolontà, G. Peluso, M. Valentino, A. De Iorio, F. Penta** // Journal of Superconductivity and Novel Magnetism. – Springer US, 2009. – № 22 (8). – P. 833 - 839.
- 5 **Bornhöfft, W.** Sensors Set: A Comprehensive Survey. Magnetic Field Sensors: Flux Gate Sensors / **Wolfgang Bornhöfft, Gerhard Trenkler** // Tübingen, FRG: Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Universität. – 2008. – P. 153-203.
- 6 **Клюев, В. В.** Неразрушающий контроль и диагностика: Справочник / **В. В. Клюев, Ф. Р. Соснин, А. В. Ковалев** и др.; Под ред. В.В. Клюева. 2-е изд., испр. и доп. – М.: Машиностроение. – 2003. – 656 с.
- 7 **Ripka, P.** Advances in Magnetic Field Sensors / **P. Ripka, M. Janosek** // IEEE Sensors Journal. – Manchester: IEEE Sensors Council. – 2010. – Vol. 10(6). – P. 1108 - 1116.
- 8 **Leong, C. S.** The development of fluxgate magnetometer for non-destructive measurement / **Chew Soon Leong, Rashdi Shah Ahmad, Rosly Jaafar** // Journal Technology. – Skudai: University Technology Malaysia. – 2001. – № 34(C). – P. 9 - 16.
- 9 **Романов, И. О.** Физические основы неразрушающих методов контроля / **И. О. Романов, Д. В. Строителев,** **В. М. Макиенко** – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2008. – 126 с.
- 10 **Розенблат, М. А.** Магнитные элементы автоматики и вычислительной техники / **Моисей Аронович Розенблат.** – М.: Наука, 1966. – 720 с.
- 11 **Мельгуй, М. А.** Формулы для описания нелинейных и гистерезисных свойств ферромагнетиков / **М. А. Мельгуй** // Дефектоскопия. – Екатеринбург: Изд-во «Наука», 1987. – № 11. – С. 3 - 10.
- 12 **Harrison, R. G.** Positive-Feedback Theory of Hysteretic Recoil Loops in Hard Ferromagnetic Materials / **Robert G. Harrison** // IEEE Transactions on Magnetics. – Boulder (USA): National Institute of Standards and Technology. – 2011. – № 47(1). – P. 175 - 191.
- 13 **Giordano, A. A.** Getting Started with Simulink, in Modeling of Digital Communication Systems Using Simulink / **Giordano A. A., Levesque A. H.** – Hoboken: John Wiley & Sons, 2015. – 260 p.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Miroshnikov, V. V., Zavalniuk, O. P., Nesterenko, V. B.** Control of the general hull's strength. – Kherson: Grin' D. S., 2015, 108 p.
- 2 **Zavalniuk, O. P., Miroshnikov, V. V.** Magnetic control of ship hulls during cargo and ballast operations. Visnik of the Volodymyr Dahl East Ukrainian National University, 2012, 18(189), 76-82.
- 3 **Afanas'ev, Yu. V.** Ferroprobe devices. – Leningrad, USSR: Energoatomizdat, 1986, 188 p.
- 4 **Bonavolontà, C.** Detection of Magnetomechanical Effect in Structural Steel Using SQUIDs and Flux-gate Sensors. Journal of Superconductivity and Novel Magnetism, 2009, 22(8), 833 - 839.
- 5 **Bornhöfft, W., Trenkler, G.** Sensors Set: A Comprehensive Survey. Magnetic Field Sensors: Flux Gate Sensors. – Tübingen, FRG: Institut für Physikalische und Theoretische Chemie der Universität, 2008, 153-203.
- 6 **Klyuyev, V. V., Sosnin, F. R., Kovalev, A. V.** Non-destructive testing and diagnostics: Handbook. – Moscow: Mashinostroyeniye, 2003, 656 p.
- 7 **Ripka, P., Janosek, M.** Advances in Magnetic Field Sensors. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(6), 1108 - 1116.
- 8 **Leong, C. S., Rashdi, S. A., Rosly, J.** The development of fluxgate magnetometer for non-destructive measurement. Journal Technology, 2001, 34(C), 9 - 16.
- 9 **Romanov, I. O., Stroitelev, D. V., Makienko, V. M.** Physical basis of non-destructive methods of control. – Khabarovsk: Izd-vo DVGUPS, 2008, 126 p.
- 10 **Rozenblat, M. A.** Magnetic elements of automation and computer technology. – Moscow: Nauka, 1966, 720 p.
- 11 **Mel'guy, M. A.** The formulas for describing of nonlinear and hysteresis properties of ferromagnetic materials. Defektoskopiya, 1987, 11, 3 - 10.
- 12 **Harrison, R. G.** Positive-Feedback Theory of Hysteretic Recoil Loops in Hard Ferromagnetic Materials. IEEE Transactions on Magnetics, 2011, 47(1), 175 - 191.
- 13 **Giordano, A. A.** Getting Started with Simulink, in Modeling of Digital Communication Systems Using Simulink. – Hoboken: John Wiley & Sons, 2015, 260 p.

Надійшла (received) 22.09.2015

УДК 539.53:620.178.15

ДОСЛІДЖЕННЯ РОЗПОДІЛУ МОДУЛЯ ПОЗДОВЖНЬОЇ ПРУЖНОСТІ МЕТАЛУ ВУЗЛА ПАРОГЕНЕРАТОРА ЗІ ЗВАРНИМ ШВОМ №111 І ЙОГО НАВКОЛОШОВНОЇ ЗОНИ

O. A. КАТОК

Відділ чисельних і експериментальних методів дослідження конструкційної міцності, Інститут проблем міцності ім. Г. С. Писаренка НАН України, м. Київ, УКРАЇНА
email: Katok_O@ukr.net

АНОТАЦІЯ Представлено розподіл модуля поздовжньої пружності металу зварного шву тепlostійкої сталі 10ГН2НМФА по геометрії вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору з патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР1000, отриманих методом інструментованого індентування. Для оцінки модуля пружності металу зварного шву використано методику, приведену в міжнародному стандарті ISO 14577 і відповідне для її реалізації обладнання, яке розроблене в Інституті. Отримані результати можуть бути використані для проведення досліджень особливостей деформування вузла парогенератора зі зварним з'єднанням №111 з врахуванням реального розподілу характеристик металу з метою прогнозування работоспособності всього вузла.

Ключові слова: Неруйнівний контроль, метод інструментованого індентування, зварне з'єднання, діаграма індентування, модуль поздовжньої пружності.

АННОТАЦИЯ Представлено распределение модуля продольной упругости металла сварного шва тепlostійкой стали 10ГН2МФА по геометрии узла сварного соединения «горячего» коллектора с патрубком парогенератора АЭС с ВВЭР 1000, оцененного методом инструментированного индентирования. Для оценки модуля упругости металла сварного шва использовали методику, приведенную в международном стандарте ISO 14577 и соответствующее для ее реализации оборудование, разработанное в Институте. Полученные результаты могут быть использованы для проведения исследований особенностей деформирования узла парогенератора со сварным соединением №111 с учетом реального распределения характеристик металла с целью прогнозирования работоспособности всего узла.

Ключевые слова: Неразрушающий контроль, метод инструментированного индентирования, сварное соединение, диаграмма индентирования, модуль продольной упругости

INVESTIGATION INTO THE DISTRIBUTION OF THE LONGITUDINAL MODULUS OF ELASTICITY IN THE METAL OF WELDED JOINT NO. 111 AND ITS HEAT-AFFECTED ZONE IN A STEAM GENERATOR

O. A. КАТОК

Department of Numerical and Experimental Methods for Structural Strength Analysis, G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The investigation of the metal of the hot collector-to-nozzle welded joint in a steam generator at NPP with WWER-1000 is performed by the instrumented indentation test after the service life. This weldment is composed of a segment of circumferential weld No. 111 and the base metal of pressure vessel structural steel 10GN2MFA. To assess the elastic modulus of the welded joint metal, the procedure described in the International Standard ISO 14577 and the proper equipment developed at the Institute that is required for its implementation were used.

The distribution of the longitudinal modulus of elasticity in the welded joint metal of heat-resistant steel 10GN2MFA was obtained for the first time from the geometry of the weldment using the indentation curves. It is shown that the modulus of elasticity changes slightly in the thickness of the heat affected zone in the upper part of the steam generator nozzle (within 1%) for a mean value of 196880 MPa. A spread in the values of the elasticity modulus equal to 11 % is observed on the intersecting surfaces and the surfaces formed by the layer-by-layer removing in the area of the welded joint in the direction from the bottom of the collector pocket to the steam generator nozzle. The results obtained by the instrumented indentation test are supported by the tensile testing results. A departure of values of the modulus of elasticity determined using the results obtained by the instrumented indentation tests from those obtained in tensile tests does not exceed 6 %. The obtained results can be used to conduct the investigations of the features of deformation in hot collector-to-nozzle welded joint No. 111 with consideration of the actual distribution in the characteristics of the metal for the purposes of predicting the serviceability of the entire weldment.

Keywords: Nondestructive testing, instrumented indentation test, welded joint, indentation curve, longitudinal modulus of elasticity.

Вступ

Надійна експлуатація, а також продовження ресурсу обладнання АЕС значною мірою залежить від

коректності і точності величин механічних характеристик матеріалів, що отримані в результаті механічних випробувань, для визначення його деградації в процесі експлуатації. Тому актуальним є

отримання нових даних про деформування і руйнування матеріалів корпусів реакторів та іншого відповідального обладнання АЕС з урахуванням реальних умов їх експлуатації, визначення їх пошкоджуваності в процесі експлуатації.

Останнім часом в світовій практиці все більше використовують випробування матеріалів індентуванням кульки із твердого сплаву з записом діаграм в координатах навантаження F – глибина вдавлювання індентора h , що відомі як методи інструментованого індентування (instrumented indentation methods), і дозволяють отримувати більш повну інформацію щодо характеристик механічних властивостей металів [1 – 5].

В Інституті проблем міцності імені Г.С. Писаренка НАН України проведено комплекс досліджень, направлених на розвиток неруйнівних методів контролю поточного стану конструкційних матеріалів за методом інструментованого індентування та розробку обладнання для проведення таких випробувань в лабораторних та промислових умовах з використанням різноманітних режимів статичного та циклічного навантажувань в макродіапазоні навантажень від 2 до 10000 Н [6-8].

Із використанням удосконалених методик і створеного експериментального обладнання для випробувань металів методом інструментованого індентування отримано нові дані для ряду конструкційних сталей щодо їх міцності у вихідному стані та після експлуатаційного напрацювання [8-10]. В роботі [10] методом інструментованого індентування вперше було визначено розподіл характеристик міцності тепlostійкої сталі 10ГН2МФА по геометрії вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС.

Мета роботи

В даній роботі приведені результати досліджень розподілу модуля поздовжньої пружності металу вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000, після експлуатаційного напрацювання, виконаних методом інструментованого індентування. Отримані результати доповнюють результати отримані в роботі [10] і можуть бути використані при проведенні досліджень особливостей деформування вузла парогенератора ПГВ-1000М зі зварним з'єднанням №111 з врахуванням реального розподілу характеристик металу з метою прогнозування роботоздатності всього вузла.

Матеріал, обладнання, методи випробувань

Випробовували фрагмент вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору з патрубком парогенератора [10], що складається із відрізка

кільцевого зварного шва №111 і основного металу – корпусна конструкційна сталь 10ГН2МФА. Темплет вирізали із парогенератора, знятого із експлуатації після напрацювання 12 тис. год. Схему парогенератора з місцем вирізки темплету показано на рис. 1.

Для визначення модуля поздовжньої пружності металу вузла зварного з'єднання було використано методику приведену в міжнародному стандарті ISO 14577 [1]. Вибір і обґрунтування методики описано в роботі [11].

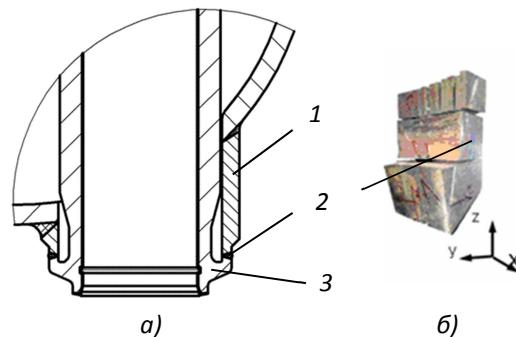


Рис. 1 – Схема вузла зварного з'єднання (а) «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000: 1 – патрубок парогенератора Ду 1200; 2 – зварне з'єднання №111; 3 – колектор і вигляд темплету для випробувань (б).

Згідно із цією методикою модуль пружності визначається за рівнянням:

$$E = \frac{1 - \mu^2}{\frac{2 \cdot C \cdot \sqrt{A_p}}{\sqrt{\pi}} - \frac{1 - \mu_1^2}{E_1}} \quad (1)$$

де C – коефіцієнт податливості, A_p – площа проекції невідновленої лунки, яка дорівнює:

$$A_p = \pi \cdot h_c \cdot (D - h_c) \quad (2)$$

де D – діаметр індентора; h_c – глибина вдавлювання, протягом якої відбувається контакт між індентором і матеріалом після повного навантажування до F_{max} .

Реєстрацію кривої індентування проводили у відповідності до вимог міжнародного стандарту [1] кулькою діаметром 2,5 мм на установці UTM – 20 НТ (рис. 2) [6]. Швидкість переміщення індентора складала 0,05 мм/хв. В установці передбачено можливість без переустановлення об'єкту випробувань виконати послідовність індентувань, що дозволяє оцінити зміну властивостей металу продовж лінії, наприклад, упоперек зварного шва.



Рис. 2 – Універсальна випробувальна машина UTM – 20 НТ для індентування металів кулькою із твердого сплаву

Випробовування проводили по довжині поверхні перерізу вузла зварного з'єднання (в окружному напрямку) і по висоті зовнішньої поверхні цього ж вузла (в радіальному напрямку), а також з пошаровим зняттям зовнішньої поверхні товщиною 3 і 40 мм. Вибір розмірів товщини знятого шару пов'язаний з місцем розташування ліній індентування на поверхні перерізу. Зовнішній вигляд темплету після випробувань методом індентування приведено на рис. 3, де точками показано місця вдавлювання індентора.

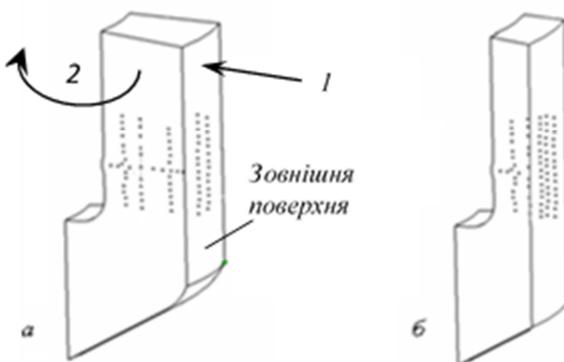


Рис. 3 – Схема місць індентування темплету по висоті вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору с патрубком парогенератора до (а) і після (б) зняття зовнішньої поверхні товщиною 40 мм: радіальний (1) і окружний (2) напрямки;

Результати досліджень та їх обговорення

За даними випробувань методом інструментованого індентування із використанням

методики [1] визначали модуль поздовжньої пружності металу вузла зварного з'єднання. Розподіл модуля пружності по довжині поверхні перерізу вузла зварного з'єднання колектору із патрубком парогенератора показано на рис. 4. На рис. 5 побудовано розподіл модуля пружності по довжині поверхонь утворених пошаровим зняттям зовнішньої поверхні досліджуваного вузла.

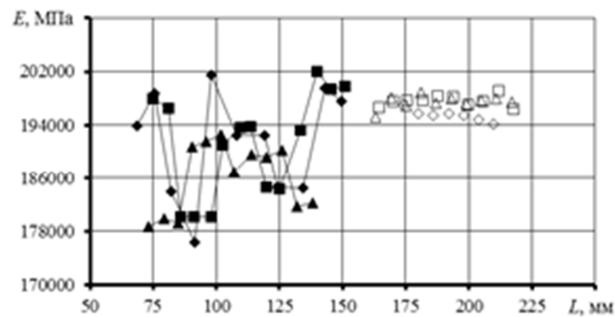


Рис. 4 – Зміна модуля поздовжньої пружності E тепlostійкої сталі 10ГН2МФА по довжині поверхні перерізу вузла зварного з'єднання L «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000 після експлуатаційного напрацювання. ▲, ♦, ■ – метал зварного шва №111; △, □ – патрубок парогенератора Да 1200; ▲, ♦, ■ – відстань від зовнішньої поверхні зварного з'єднання, становить 14, 40 і 50 мм відповідно.

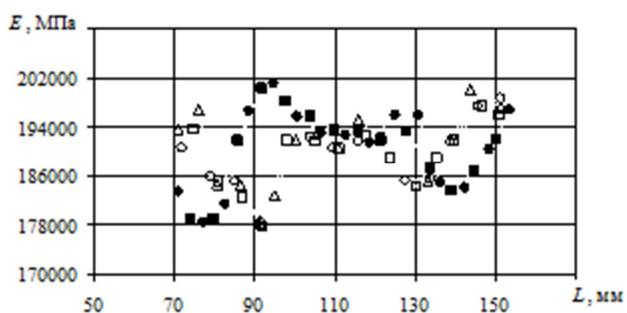


Рис. 5 – Зміни модуля пружності E по довжині поверхні утвореної пошаровим зняттям зовнішньої поверхні вузла зварного з'єднання L «гарячого» колектору із патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000 товщиною 3 (■, ●) і 40 мм (○, △, □): індентування на відстані від поверхні перерізу: ■ – 18 мм; ● – 26 мм; ○ – 14 мм; △ – 25 мм і □ – 31 мм.

Як показали дослідження, модуль пружності по товщині зони термічного впливу верхньої частини патрубка парогенератора змінюється несуттєво (в межах 1 %) при середній величині 196880 МПа. На поверхні перетину і поверхнях створених пошаровим зняттям в районі зварювального з'єднання, в напрямку від дна «карману» колектору до патрубка

парогенератора, спостерігається розкид величини модуля пружності рівний 11 %. Даний розкид можна пояснити наявністю різних за структурою ділянок у зварувальному шві: метал зони термічного впливу нижньої і верхньої частин патрубка; ділянка перегріву металу зони термічного впливу нижньої частини патрубку; прошарки, що прилягають до зони термічного впливу (верхня і нижня); центральний шар металу шва; ділянка перегріву металу зони термічного впливу верхньої частини патрубку [10].

Різну орієнтацію точок максимумів і мінімумів на кривих розподілу модуля пружності можна пояснити трапеціоподібною формою шва. При віддалені від зовнішньої поверхні крива розподілу механічних характеристик більш розвернута.

Зіставлення значень модуля пружності металу поверхні перерізу (в окружному напрямку на відстані 40 мм від зовнішньої поверхні) і поверхні утвореної пошаровим зняттям зовнішньої поверхні товщиною 40 мм (в радіальному напрямку) демонструє рис. 6. Незважаючи на те, що зварувальне з'єднання має різні за структурою ділянки, характер розподілу модуля Юнга в окружному і радіальному напрямках, на відстані 40 мм від зовнішньої поверхні, подібний. Аналогічні результати було отримано при зіставленні результатів випробувань на поверхні перерізу на відстані 3 мм і поверхні утвореної пошаровим зняттям зовнішньої поверхні товщиною 3 мм.

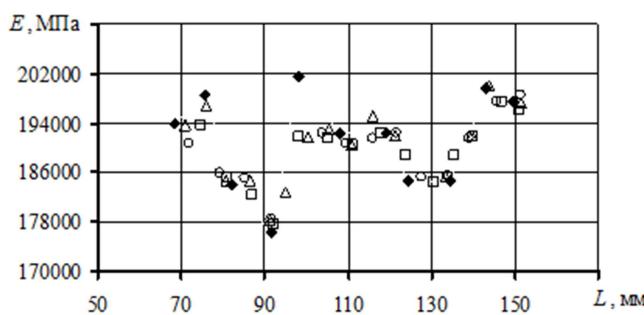


Рис. 6 – Порівняльні результати визначення методом інструментованого індентування модуля пружності на поверхні перерізу (♦) і поверхні утвореної з пошаровим зняттям зовнішньої поверхні товщиною 40 мм (○, Δ, □)) зварного шва №111: ♦ – індентування на відстані 40 мм від зовнішньої поверхні; індентування на відстані від поверхні перетину: ○ – 14 мм; Δ – 25 мм i □ – 31 мм.

Середнє значення модуля пружності зони термічного впливу верхньої частини патрубка парогенератора, визначені за діаграмами індентування за допомогою методики [1], і їх відхилення від результатів випробувань на розтяг приведені в таблиці. Видно, що розкид значень модуля пружності визначених за результатами випробувань методом інструментованого індентування, від таких, що

отримані при випробуванні на розтяг, не перевищує 6 %.

Таблиця – Значення модуля поздовжньої пружності сталі 10ГН2МФА, МПа, які отримані при випробуванні на одновісний розтяг і інструментоване індентування за допомогою методики [1]

Випробування на розтяг (ГОСТ 1497-84)	Випробування методом інструментованого індентування (ISO 14577)	Відхилення Δ, %
208600	196880	5,6

Висновки

Методом інструментованого індентування вперше визначено розподіл модуля поздовжньої пружності металу по геометрії вузла зварного з'єднання «гарячого» колектору з патрубком парогенератора АЕС з ВВЕР-1000, після експлуатаційного напрацювання. Показано, що на досліджуваних поверхнях в напрямку від дна карману колектору до патрубка парогенератора розподіл модуля пружності носить складний немонотонний характер. Різниця між максимальним і мінімальним значеннями модуля сягає 11 %.

В результаті експериментальних досліджень встановлено, що розподіл модуля пружності на поверхні перетину і поверхнях утворених пошаровим зняттям різної товщини зовнішньої поверхні вузла зварного з'єднання мають подібний характер.

Результати отримані методом інструментованого індентування підтвердженні результатами випробувань на розтяг. Розкид значень модуля пружності визначених за результатами випробувань методом інструментованого індентування, від таких, що отримані при випробуванні на розтяг, не перевищує 6 %.

Список літератури

- ISO 14577-1:2002 – ISO 14577-3:2002. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.
- Бакиров, М. Б. Исследование возможности восстановления диаграмм деформирования с помощью нейросетевого подхода / М. Б. Бакиров, О. А. Мишулина, И. А. Киселев, И. А. Круглов // Завод. лаб. – 2010. – Том 76. – № 7. – С. 42 - 48.
- Haggag, F. V. Innovative SSM Technology Determines Structural Integrity of Metallic Structures: Example Applications for Pressure Vessels and oil and Gas Pipelines / F. V. Haggag // International Journal of Pure and Applied Physics. – 2007. – vol. 3. – № 1. – P. 91-108.
- Oliver, W. C. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advanced in understanding and refinements to methodology / W. C.

- Oliver, G. M. Pharr // *Journal of Materials Research.* – 2004. – vol. 19. – № 1. – P. 3-20.
5. Lee, H. A numerical approach to special indentation techniques for material property evaluation / H. Lee, J. H. Lee, G. M. Pharr // *J.Mech. Phys. Solids.* – 2005. – № 54. – P. 2037-2069.
6. Харченко, В. В. Установка для определения механических характеристик конструкционных материалов методом инструментированного индентирования / В. В. Харченко, Н. П. Рудницкий, О. А. Каток, А. Н. Неговский, А. В. Дроздов, В. В. Кутняк // *Надійність і довговечність машин і споруд.* – 2007. – Вип. 28. – С. 140 - 147.
7. Харченко, В. В. Переносний прилад для визначення характеристик міцності металів методом інструментованого ідентування / В. В. Харченко, О. А. Каток, О. В. Дроздов та і ін. // *Надійність і довговічність машин і споруд.* – 2009. – Вип. 32. – С. 162 - 168.
8. Каток, О. А. Определение механических свойств сталей методом непрерывного индентирования / О. А. Каток, В. В. Харченко, А. В. Дроздов, О. В. Панасенко // *Надежность и долговечность машин и сооружений.* – 2009. – Вып. 31. – С. 208 - 213.
9. Каток, О. А. К определению механических характеристик сталей по результатам испытаний на твердость / О. А. Каток, Н. П. Рудницкий, В. П. Швец, В. В. Харченко, А. В. Бажуков, П. Е. Мельник // *Проблемы прочности.* – 2014. – № 6. – С 66 - 70.
10. Харченко, В. В. Исследование прочностных характеристик сварного шва парогенератора после эксплуатационной наработки методом индентирования / В. В. Харченко, О. А. Каток, А. В. Панасенко, Н. П. Рудницкий, А. В. Бажуков, П. Е. Мельник // *Проблемы прочности.* – 2013. – № 3. – С 58 - 65.
11. Каток О.А., Макаев А.Г., Панасенко О.В., Харченко В.В. Визначення модуля пружності сталей методом інструментованого індентування / О. А. Каток, А. Г. Макаев, О. В. Панасенко, В. В. Харченко // *Надійність і довговічність машин і споруд.* – 2012. – Вип. 35. – С. 209 - 213.
2. Bakirov, M. B., Mishulina, O. A., Kiselev, I. A., Kruglov, I. A. Studyof the Possibility of Reconstruction Strain Diagrams Using Neural Network Approach. *Industrial laboratory. Diagnostics of materials*, 2010, 7(76), 42 - 48.
3. Haggag, F. V. Innovative SSM Technology Determines Structural Integrity of Metallic Structures: Example Applications for Pressure Vessels and oil and Gas Pipelines. *International Journal of Pure and Applied Physics*, 2007, 1(3), 91 - 108.
4. Oliver, W. C., Pharr, G. M. Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advanced in understanding and refinements to methodology. *Journal of Materials Research*, 2004, 1(19), 3 - 20.
5. Lee, H., Lee, J. H., Pharr, G. M. A numerical approach to special indentation techniques for material property evaluation. *J.Mech. Phys. Solids*, 2005, 54, 2037-2069.
6. Kharchenko, V. V., Rudnitskii, N. P., Katok, O. A., Negovsky, A. N., Drozdov, A. V., Kutnyak, V. V. An instrumented sindentation machine for determination mechnical characteristics of structural materials. *Reliability and life of machines and structures*, 2007, 28, 140 - 147.
7. Kharchenko, V. V., Katok, O. A., Drozdov, A. V. An instrumentedindantation portable device for determining strength characteristics of metals. *Reliability and life of machines and structures*, 2009, 32, 162 - 168.
8. Katok, O. A., Kharchenko, V. V., Drozdov, A. V., Panasenko, A. V. Determination of the mechanical properties of steels by the instrumented indetation test method. *Reliability and life of machines and structures*, 2008, 31, 208 - 213.
9. Katok, O. A., Rudnitskii, N. P., Kharchenko, V. V., Bazhukov, A. V., Melnik, P. E. On the Determination of the Mechanical Characteristics of Steels from Hardness Test Results. *Strength of materials*, 2014, 6(46), 773 - 776.
10. Kharchenko, V. V., Katok, O. A., Panasenko, A. V., Rudnitskii, N. P., Bazhukov, A. V., Melnik, P. E. Study of Steam Generator Weld Strength Characteristics after Operating Period by the Instrumental Indentation Method. *Strength of materials*, 2013, 3(45), 295 - 300.
11. Katok, O. A., Makaev, A. G., Panasenko, A. V., Kharchenko, V. V. Determination of elastic modulus for steels by instrumented indentation test. *Reliability and life of machines and structures*, 2012, 35, 209 - 213.

Bibliography (transliterated)

- 1 ISO 14577-1:2002 – ISO 14577-3:2002. Metallic materials – Instrumented indentation test for hardness and materials parameters.

Надійшла (received) 08.10.2015

УДК 539.4

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСПЫТАНИЙ ДИСКОВЫХ ОБРАЗЦОВ ПРИ ТЕРМОШОКЕ В 3Д ПОСТАНОВКЕ

E. A. КОНДРЯКОВ

*Інститут проблем прочності им. Г. С. Писаренка НАНУ, г. Київ, УКРАЇНА
email: kondryakov@ipp.kiev.ua*

АНОТАЦІЯ Було проведено чисельне моделювання випробувань дискових зразків з тріщиною при термошоці в тривимірній постановці методом скінчених елементів з використанням моделі пошкоджуваності матеріалу Гарсона-Твергарда-Нідлмана. Проведено аналіз кінетики напруженно-деформованого стану у вершині тріщини при її зародженні та розповсюджені в матеріалі дискового зразка. Побудовані залежності швидкості розповсюдження тріщини від часу для двох варіантів початкової довжини тріщини $a_0 = 12.5$ мм і 20 мм.

Ключові слова: дисковий зразок, метод скінчених елементів, модель пошкоджуваності матеріалу Гарсона-Твергарда-Нідлмана

АННОТАЦИЯ Было проведено численное моделирование испытаний дисковых образцов с трещиной при термошоке в трехмерной постановке методом конечных элементов с использованием модели повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нидлмана. Проведен анализ кинетики напряженно-деформированного состояния в вершине трещины при ее зарождении и распространении в материале дискового образца. Построены зависимости скорости распространения трещины от времени для двух вариантов начальной длины трещины $a_0 = 12.5$ мм и 20 мм.

Ключевые слова: дисковый образец, метод конечных элементов, модель повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нидлмана

NUMERICAL SIMULATION OF DISK-SHAPED SPECIMENS TESTS AT THERMAL SHOCK IN THREE-DIMENSIONAL FORMULATION

I. KONDRIAKOV

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT *Purpose.* The object of the presented work is the investigation of crack initiation and propagation processes in disk-shaped specimens at thermal shock using finite element method at three-dimensional formulation.

Design/methodology/approach. The search for additional strength reserves stimulates the development and improvement of various numerical and experimental techniques for analyzing the behavior (including crack propagation and arrest) of structural elements with cracks under thermal shock loading. Methods for testing small specimens such as precracked disk-shaped specimens have recently been developed. The results of these tests can be used to estimate the strength and durability of large-scale structures. Numerical simulation of disk-shaped specimens under thermal shock can give more information about the features of crack initiation and propagation in materials under thermal loading.

Findings. Numerical modelling in 3D formulation of disk-shaped specimens tests at thermal shock was performed using Gurson-Tvergaard-Needleman (GTN) damage material model. According to the results of numerical simulation an analysis of stress-strain-state in the crack tip was carry out. Crack propagation velocities for two cases of initial crack length were calculated.

Originality/value. The results of numerical modelling of disk-shaped specimens tests at thermal shock can be used to evaluate the strength and life time of construction elements.

Keywords: disk-shaped specimen, finite element method, Gurson-Tvergaard-Needleman damage material model

Введение

В связи с поиском дополнительных резервов прочности при решении вопросов продления сроков эксплуатации корпусов реакторов АЭС в настоящее время продолжают развиваться и совершенствоваться различные численные и экспериментальные методики анализа поведения трещин при термошоке, в том числе при их распространении и остановке.

Проведение экспериментов по термошоку на крупногабаритных конструкциях является весьма затруднительным, поэтому в последнее время разрабатываются методики проведения полунатурных

испытаний дисковых образцов с трещиной в условиях термошока [1, 2]. Такие испытания являются сравнительно простыми и недорогими, а также позволяют исследовать особенности распространения и остановки трещины при термошоке.

С развитием вычислительной техники кроме экспериментов проводится и численное моделирование таких испытаний. Использование локальных критериев разрушения материала позволяет получить больше информации об особенностях зарождения и распространения трещины в материале. Главной особенностью этих подходов является переносимость результатов с

образца на конструкцию, так как параметры модели не должны зависеть от геометрии. В последнее время во многих работах используется модель повреждаемости материала Гарсона-Твергарда-Нидлмана (GTN) [3, 4].

В Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины была разработана методика проведения испытаний дисковых образцов с выращенной усталостной трещиной в условиях термошока [5]. При этом были использованы современные системы высокоскоростной регистрации деформаций и температуры. В результате были получены данные об изменении температуры как на внутренней поверхности дискового образца, так и в вершине трещины. Также были проведены металлографические исследования поверхностей изломов образцов, которые позволили определить характерные зоны распространения трещины.

Результаты экспериментальных исследований были использованы в качестве начальных условий при численном моделировании дисковых образцов с трещиной в условиях термошока с использованием модели повреждаемости материала GTN. Проведен анализ кинетики НДС в вершине трещины при её распространении.

Цель работы

Основной задачей данной работы является исследование процессов зарождения и распространения трещины в дисковых образцах с трещиной в условиях термошока при численном моделировании методом конечных элементов в трехмерной постановке.

Изложение основного материала

Численное моделирование испытаний на термошок дисковых образцов проводилось на программном комплексе Abaqus/CAE, основанном на методе конечных элементов (КЭ). В качестве материала использовалась теплостойкая легированная сталь 15Х2НМФА. В расчете использовалась истинная диаграмма деформирования, которая была получена по результатам испытаний гладких образцов на одноосное растяжение.

Для моделирования процесса распространения трещины использовалась модель повреждаемости материала GTN, которая позволяет моделировать как процессы вязкого, так и квазихрупкого разрушения материала. Параметры модели GTN определялись по результатам испытаний гладких образцов на одноосное растяжение и ударных испытаний образцов Шарпи, а также их сопоставления с результатами численного моделирования [6, 7].

Ранее в работе [6] было проведено численное моделирование распространения и остановки трещины в дисковом образце при термошоке в двумерной постановке. При этом были получены

результаты, хорошо согласующиеся с экспериментальными данными. Для того чтобы учесть влияние неравномерного разогрева по толщине образца и объёмного напряженного состояния в вершине трещины в данной работе было проведено численное моделирование такой задачи в трехмерной постановке.

Дисковый образец (рис. 1) представляет собой кольцо с внутренним диаметром 60мм и внешним 110мм, толщина 10мм. На внешней грани в направлении центра образца была выращена усталостная трещина, длина которой варьировалась.

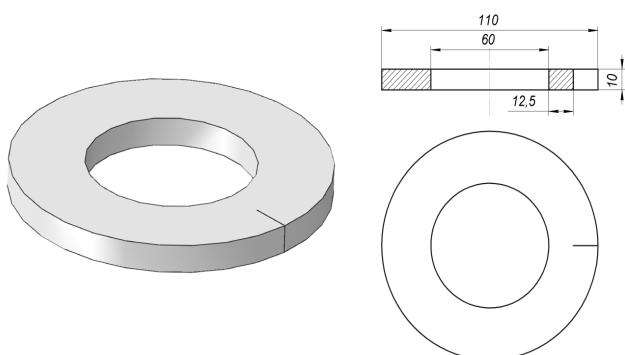


Рис. 1 – Дисковый образец.

При испытаниях резкий нагрев внутренней поверхности образца происходит путем заливки расплава жидкого свинца в полость диска [5]. При этом во время проведения эксперимента была измерена температура на нижней и верхней поверхностях образца в нескольких точках. На нижней поверхности градиент температур выше, чем на верхней.

Изменение температуры по толщине было получено путем осреднения экспериментальных данных. Также был задан теплообмен с внешней средой по наружной грани образца, температура которой 25°C , коэффициент теплообмена $20 \text{ Вт}/(\text{м}^2\text{K})$.

Для экономии расчетного времени были использованы свойства симметрии задачи, и рассматривалась $\frac{1}{4}$ часть образца. На плоскостях разреза были заданы ограничения на перемещение по нормали к плоскости, а также вращение вокруг осей, лежащих в плоскости разреза. Были использованы восьми-узловые конечные элементы линейной аппроксимации с дополнительной степенью свободы для температуры. На рис. 2 показана геометрия и КЭ сетка модели.

Одним из важнейших факторов, влияющих на результаты численного моделирования в случае применения модели GTN [8], является размер конечных элементов в области у вершины трещины. Для оценки влияния размеров элементов было построено две расчетные схемы с размерами конечных элементов 50 мкм и 100 мкм у вершины трещины и вдоль фронта её распространения.

Отличия в полученных результатах для двух вариантов конечно-элементного разбиения незначительны. В дальнейших расчетах использовалась расчетная схема с минимальным размером элементов 50 мкм. Общее количество элементов составляет 15510.

Расчеты проводились для двух вариантов, которые отличаются между собой длиной выращенной трещины – 12.5 мм и 20 мм соответственно.

Обсуждение результатов

По результатам численного моделирования были получены данные о напряженно-деформированном состоянии, а также температурные поля для двух вариантов расчета с разными длинами трещин. Как видно из рис.3, перепад температуры по толщине образца наблюдается только вблизи внутренней поверхности и уже на середине поверхности распространения трещины температура полностью выравнивается. Этот эффект хорошо виден на рис. 4, где показано распределение температур по фронту трещины при различных её длинах. При длине трещины $a_0=12.5\text{мм}$ перепад температур по толщине образца практически отсутствует.

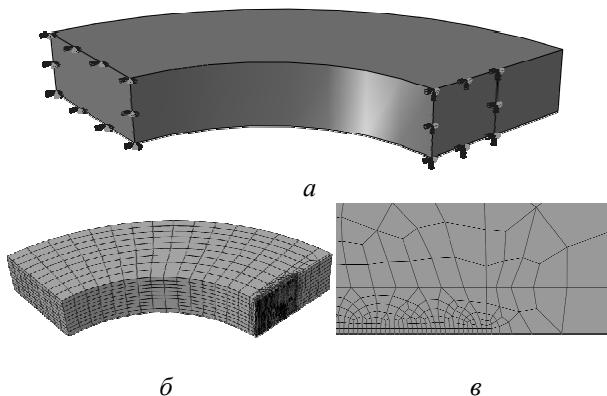


Рис. 2 – КЭ модель дискового образца: а) геометрия модели; б) разбиение на конечные элементы; в) разбиение в вершине трещины

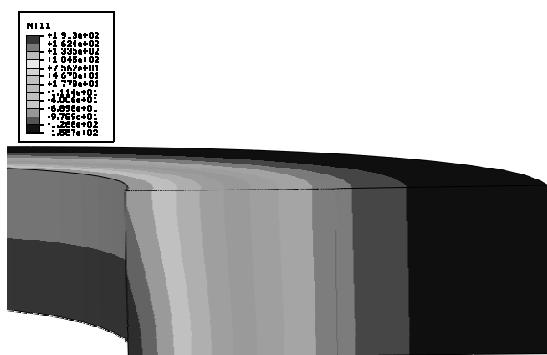


Рис. 3 – Температурные поля при $a_0=12.5\text{мм}$

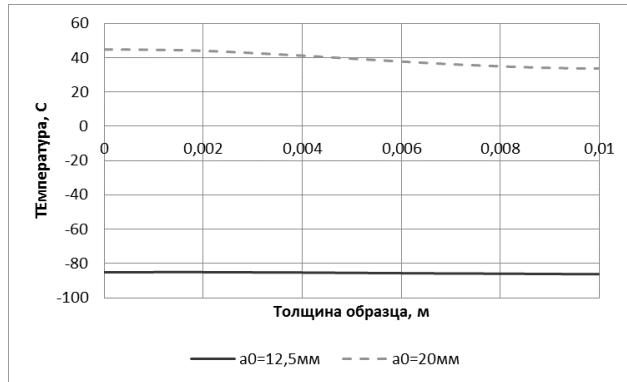


Рис. 4 – Температура по фронту трещины при её длине 12.5 мм и 20 мм.

Вблизи вершины трещины нормальные напряжения имеют характерный экстремум (рис. 5). Напряжения достигают своего максимума на расстоянии примерно 0,2мм. В момент старта трещины напряжения равномерно уменьшаются с увеличением расстояния от вершины, а во время продвижения трещины на диаграмме заметно резкое снижение напряжений.

На рис. 6 и 7 показано состояние трещины в разные моменты времени, а также отображены поля нормальных к плоскости трещины напряжений σ_y при $a_0=12.5\text{мм}$ и 20 мм соответственно.

Как видно из рис.6-7, распространение трещины происходит симметрично по толщине образца, что также говорит о несущественном влиянии перепада температуры по фронту трещины.

Также были рассчитаны скорости распространения трещин для двух вариантов расчета (рис. 8). Видно, что на начальной стадии скорость трещины резко увеличивается, затем снижается и устанавливается на уровне 100-200 м/с, после чего останавливается в области стесненного напряженного состояния. При этом характер изменения скорости распространения трещины подобен тому, который был получен при испытаниях как дискового образца при термошоке [9], так и образцов Шарпи при ударном нагружении [9,10].

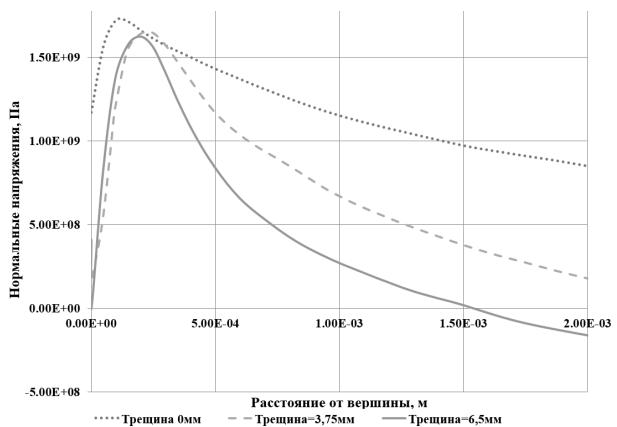


Рис. 5 – Напряжения σ_y вблизи вершины трещины при $a_0=20\text{мм}$

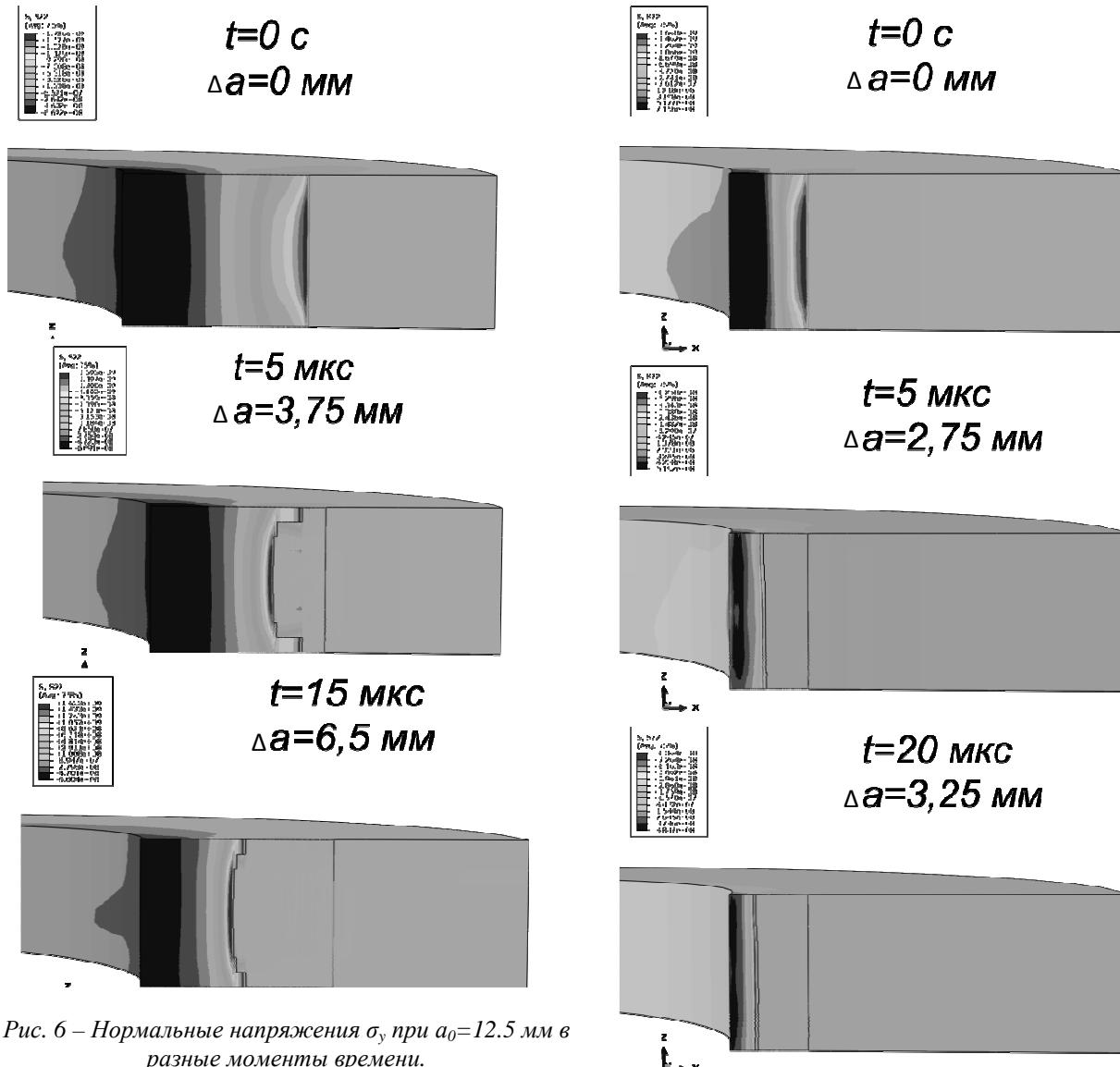


Рис. 6 – Нормальне напруження σ_y при $a_0=12.5$ мм в різні моменти часу.

Выводы

Проведено численное моделирование испытаний на термошок дисковых образцов с трещиной из стали 15Х2НМФА в 3D постановке с использованием модели повреждаемости материала GTN. Проведен анализ кинетики НДС в окрестности вершины трещины при её распространении для двух вариантов её начальной длины $a_0=12.5$ мм и 20мм. Оценено изменение скорости распространения трещины в дисковом образце при термошоке. Показано подобие характера изменения скорости распространения трещины в дисковых образцах при термошоке и в образцах Шарпи при ударном нагружении.

Рис. 7 – Нормальне напруження σ_y при $a_0=20$ мм в різні моменти часу.

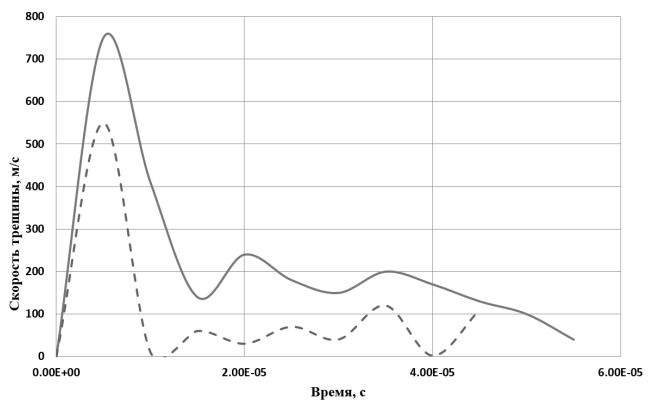


Рис. 8 – Залежність швидкості розповсюдження трещини в дисковому образці при термошоке при $a_0=12.5$ мм и 20мм.

Список літератури

- 1 **Prabel, B.** Using the X-FEM method to model the dynamic propagation and arrest of cleavage cracks in ferritic steel / **B. Prabel, S. Marie, A. Combescure** // *Eng. Fr. Mec.* – 2008. – Vol. 75, №10. – P. 2984-3009.
- 2 **Berdin, C.** Local approach to fracture for cleavage crack arrest prediction / **C. Berdin, M. Hajjaj, Ph. Bompard** [et al.] // *Eng Fract Mech.* – 2008. – Vol. 75, №11. – P. 3264-3275.
- 3 **Gurson, A. L.** Continuum theorie of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I–Yield criteria and flow rules for porous ductile media / **A. L. Gurson** // *J. Eng. Mater. Tech.* – 1977. – Vol. 99, №1. – P. 2-15.
- 4 **Tvergaard, V.** Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar / **V. Tvergaard, A. Needleman** // *Acta Metall.* – 1984. – Vol. 32, №1. – P. 157-169.
- 5 **Панасенко, О. В.** Експериментальна методика дослідження особливостей розповсюдження та зупинки тріщини в дискових зразках при термошоці / **О. В. Панасенко, Є. О. Кондряков, В. В. Харченко та ін.** // *Вісник тернопільського національного технічного університету*. – №1 (77). – 2015. – С. 30-35.
- 6 **Кондряков, Е. А.** Численное моделирование распространения трещины в дисковом образце при термошоцке / **Е. А. Кондряков** // Сборник «Надежность и долговечность машин и сооружений». – №32. – 2009. – С. 194-201.
- 7 **Emrich, A.** Indirect measuring of crack growth by means of a key-curve-method in pre-cracked Charpy specimens made of nodular cast iron / **A. Emrich, U. M. Mühlisch, M. Kuna** [et al.] // *Int. J. Fract.* – 2007. – Vol. 145. – P. 47-61.
- 8 **Bernauer, G.** Micro-mechanical modeling of ductile damage and tearing – results of a European numerical round robin / **G. Bernauer, W. Brocks** // *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* – 2002. – Vol. 25, № 4. – P. 363-384.
- 9 **Харченко, В. В.** Особенности распространения трещины в сталях при испытаниях образцов Шарпи и дисковых образцов / **В. В. Харченко, Е. А. Кондряков, А. В. Панасенко** // *Вопросы атомной науки и техники*, Харьков, ХФТИ. – №2(84). – 2013. – С.31-38.
- 10 **Кондряков, Е. А.** Численное моделирование ударных испытаний образцов Шарпи в двухмерной и трехмерной постановке / **Е. А. Кондряков** // *Вісник НТУУ «КПІ»*. Серія: *Машинобудування*. – 2014. – №2(71). – С. 110-113.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Prabel, B., Marie, S., Combescure, A.** Using the X-FEM method to model the dynamic propagation and arrest of cleavage cracks in ferritic steel. *Eng. Fr. Mec.* 2008, **10**(75), 2984-3009.
- 2 **Berdin, C., Hajjaj, M., Bompard, Ph.** [et al.] Local approach to fracture for cleavage crack arrest prediction. *Eng Fract Mech*, 2008, **11**(75), 3264-3275.
- 3 **Gurson A.L.** Continuum theorie of ductile rupture by void nucleation and growth: Part I–Yield criteria and flow rules for porous ductile media. *J. Eng. Mater. Tech*, 1977, **1**(99), 2-15.
- 4 **Tvergaard, V., Needleman, A.** Analysis of the cup-cone fracture in a round tensile bar. *Acta Metall*, 1984, **1**(32), 157-169.
- 5 **Panasenko, O. V., Kondryakov, E. A, Kharchenko, V. V** [at al.] Experimental method of investigation of crack propagation and arrest in disk-shape specimen under thermal shock. *Scientific Journal of the Ternopil National Technical University. ISSN 1727-7108 Ternopil Ivan Puluj National Technical University*, 2015, **1**(77), 30-35.
- 6 **Kondryakov, E. A.** Numerical simulation of crack propagation in disk-shape specimen under thermal shock. *Int. scien. & tec. J “Reliability and life of machines and structures”*, 2009, **32**, 194-201.
- 7 **Emrich, A., Mühlisch, U. M., Kuna, M.** [et al.] Indirect measuring of crack growth by means of a key-curve-method in pre-cracked Charpy specimens made of nodular cast iron. *Int. J. Fract*, 2007, **145**, 47-61.
- 8 **Bernauer, G., Brocks, W.** Micro-mechanical modeling of ductile damage and tearing – results of a European numerical round robin. *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct*, 2002, **4**(25), 363-384.
- 9 **Kharchenko, V. V., Kondryakov, E. A., Panasenko, O. V.** Crack propagation peculiarities in steels at Charpy and disc-shaped specimens tests. *Problems of atomic science and technology*, NSC KIPT, 2013, **2**(84), 31-38.
- 10 **Kondryakov, E. A.** Numerical simulation of charpy specimens impact tests in the two-dimensional and three-dimensional formulation. *Journal of mechanical engineering* ntuu «Kyiv Polytechnic Institute», 2014, **2**(71), 110-113.

Поступила (received) 08.10.2015

УДК 620.178.5

ВАРИАНТЫ УЧЕТА КОНТАКТНОГО ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ В БАНДАЖНЫХ ПОЛКАХ ПРИ РАСЧЕТАХ СОБСТВЕННЫХ КОЛЕБАНИЙ ЛОПАТОЧНОГО ВЕНЦА МЕТОДОМ КОНЕЧНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Я. Д. КРУГЛИЙ

Отдел вибрационной прочности, Институт проблем прочности им. Г.С. Писаренко НАН Украины, Киев, УКРАИНА
email: yanademuz@gmail.com

АННОТАЦІЯ Приведені результати обчислювальних експериментів з визначення закономірностей впливу скінченоелементного моделювання контактної взаємодії бандажних поліць на спектр власних частот коливань лопаткових вінців робочих коліс турбін. Встановлено, що незалежно від умов експлуатації двигуна і співвідношення геометрических розмірів лопаток спосіб моделювання не має суттєвого впливу на власні частоти коливань.

Ключові слова: лопатковий вінець, бандажна полка, скінчений елемент, власна частота коливань.

АННОТАЦІЯ Приведены результаты вычислительных экспериментов по определению закономерностей влияния конечноэлементного моделирования контактного взаимодействия бандажных полок на спектр собственных частот колебаний лопаточных венцов рабочих колес турбин. Установлено, что независимо от условий эксплуатации двигателя и соотношения геометрических размеров лопаток способ моделирования не оказывает существенного влияния на собственные частоты колебаний.

Ключевые слова: лопаточный венец, бандажная полка, конечный элемент, собственная частота колебаний

VARIANTS OF THE CONSIDERATION OF THE CONTACT INTERACTION IN THE SHROUDS FOR THE MODAL ANALYSIS OF THE TURBINE BLADING BY FINITE ELEMENT METHOD

YA. D. KRUGLII

G. S. Pisarenko Institute for Problems of Strength of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT This paper presents the computational investigation on the influence of the finite element simulation method of contact interaction between shrouds on the natural frequency spectrum of blade rows.

In the simulation of blade rows we assumed their structural rotational symmetry. The problem is solved using the finite element method. Three approaches to taking into account the contact interaction between shrouds are considered: 1. Applying of the compatibility conditions of nodal displacements at the nodes where non-zero contact pressures are observed; 2. Development of elastic elements (the values of the stiffness coefficient correspond to those of the contact pressure at the corresponding nodes); 3. Combination of the first and second approaches.

Based on the performed computational experiments, the regularities of influence of the simulation method of contact interaction between blade shrouds on the natural frequency spectrum of turbine blade rows have been established, which are characterized by different twists of airfoils and different ratio of its length L to the chord b of the end section. It has been found that the type of simulation of contact interaction between shrouds and the aspect ratio of blades slightly affect the values of natural frequencies of the considered blade rows, and their maximum difference under the operating conditions chosen does not exceed 5.6%.

Keywords: blade assembly, shroud, finite element, natural frequency of vibration

Введение

В современном турбостроении полочное бандажирование рабочих лопаток турбин получило широкое применение как способ повышения надежности и работоспособности их венцов за счет уменьшения чувствительности к возбуждению колебаний путем объединения лопаток в замкнутую на круг систему или пакеты.

При решении задачи о колебаниях венцов с полочной бандажной связью лопаток необходимо учитывать возможность нестабильности их динамических свойств. От конкретно реализующегося

в этом случае характера контактного взаимодействия полок существенно зависит спектр собственных колебаний исследуемого лопаточного венца.

В настоящее время при изучении вибрационных характеристик лопаточных венцов в силу дорогостоящих натурных их испытаний, более широкое применение получил вычислительный эксперимент, который основывается на использовании метода конечных элементов. В работах [1-10] использовались модели лопаточных венцов, основанные на трехмерных конечных элементах, которые могут наиболее точно описать сложную их геометрию. Однако при этом остается

открытым вопросом: как правильно задать контактное взаимодействие в бандажной связи лопаток при расчетах собственных частот колебаний, ведь присутствие контактных элементов приводит к нелинейности задачи? как линеаризовать систему? Анализ представленных в указанных работах моделей показывает, что существует три варианта моделирования контактного взаимодействия бандажных полок: 1 - накладывание условий совместности перемещений на узлы, в которых имеет место ненулевое контактное давление [2, 3, 5, 9]; 2 - накладывание этих же условий на всю контактную поверхность, предполагая, что все узлы входят во взаимодействие [3]; 3 - создание между узлами упругих элементов [1, 4, 10].

Цель работы

Расчетное исследование влияния способа конечно-элементного моделирования контактного взаимодействия бандажных полок на спектр собственных частот колебаний лопаточных венцов.

Изложение основного материала

В качестве объектов исследований были выбраны лопаточные венцы 4-й ступени цилиндра низкого давления паровой турбины (венец 1) и турбины среднего давления (ТСД) АГТД Д-18Т (венец 2), лопатки которых снабжены Z-образными бандажными полками. Такой выбор венцов объясняется следующими обстоятельствами. Во-первых, их лопатки характеризуются существенной разницей отношения длины L пера к хорде b концевого сечения. Во-вторых, в [3] представлены некоторые данные расчетных и экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния (НДС) рассматриваемых венцов, что позволяет провести сравнение получаемых в данной работе результатов исследований с приведенными в указанных работах.

Рассмотрим некоторые конструктивные особенности выбранных венцов, фрагменты которых приведены на рис.1.

Венец 1 состоит из 90 лопаток, перо которых длиной 628 мм характеризуется большой закруткой. Венец 2 включает 136 лопаток с длиной пера 117 мм незначительной закрутки. Отношение L/b для лопаток выбранных венцов равно 6.3 и 3.7 соответственно.

При моделировании выбранных лопаточных венцов предполагалась их конструктивная поворотная симметрия. В этом случае определение их характеристик НДС, в том числе и спектра собственных колебаний, осуществляется на основе рассмотрения отдельного периода в виде одной или нескольких лопаток с соответствующими граничными условиями. В данном случае рассматривался период, состоящий из одной лопатки (рис.2).

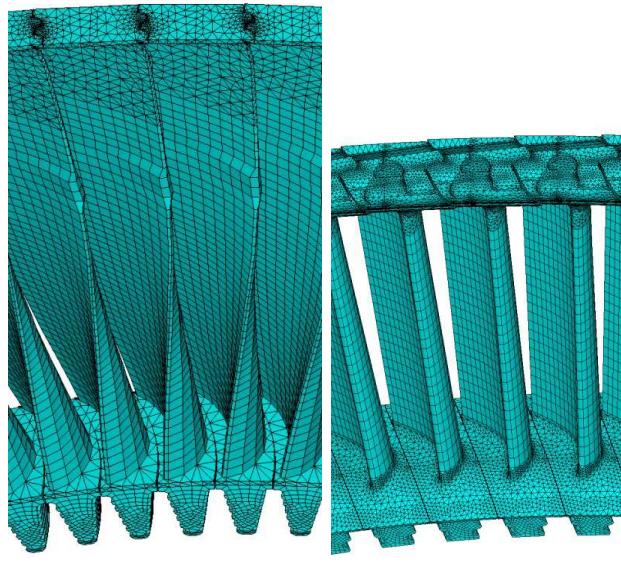


Рис.1 – Фрагменты лопаточных венцов 1 (а) и 2 (б) с конечно-элементной сеткой

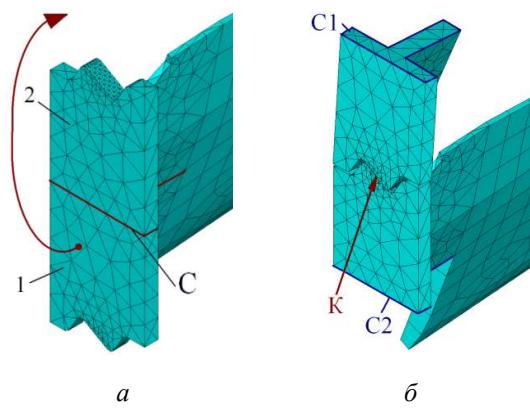


Рис. 2 – Схемы разреза бандажной полки (а) и моделирования сопряжения контактных поверхностей соседних полок (б)

В предположении жесткой заделки лопаток в диске определяющим моментом в определении граничных условий является моделирование бандажной связи лопаток, а именно: сопряжения контактных поверхностей K соседних бандажных полок. Для моделирования бандажной связи лопаток использовалась методика, описанная в [3]. Продемонстрируем это на примере Z-образной бандажной полки. Она разрезается как показано на рис. 2,а таким образом, чтобы узлы ее частей 1 и 2 на поверхности разреза C совпадали. Затем часть 2 перемещалась в цилиндрической системе координат на угол, равный $2\pi/N$, где N – число лопаток венца, что на рис. 2,а показано стрелкой. Таким образом обеспечивался натяг по контактным поверхностям K бандажных полок, а на поверхностях разреза $C1$ и $C2$ задавались условия сопряжения (рис. 2, б). Общий

вид КЭ моделей периодов рассматриваемых лопаточных венцов приведен на рис. 3.

Как показали исследования, проведенные в работе [11] использование 8-узловых конечных элементов обеспечивает необходимую точность расчетов при сгущении КЭ-сетки. Ввиду сложности геометрии бандажной полки, для создания ее КЭ модели в программном комплексе ANSYS были использованы тетраэдрические модификации SOLID45. Как видно из рис. 3, КЭ сетка бандажной полки в целом является равномерной, однако в зоне контакта она измельчалась.

Первым этапом расчета является определение контактного давления в бандажном соединении путем решения статической контактной задачи с использованием конечного элемента типа «поверхность-поверхность», который позволяет получить характеристики НДС периода, возникающего при взаимодействии двух поверхностей. В результате решения указанной задачи кроме давлений, возникающих на контактных поверхностях, можно определить такие характеристики при соответствующих условиях сопряжения полок: зазор – нулевые контактные давления; натяг – проникновение поверхностей и значения контактных давлений; скольжение и трение – поля трения и скольжения.

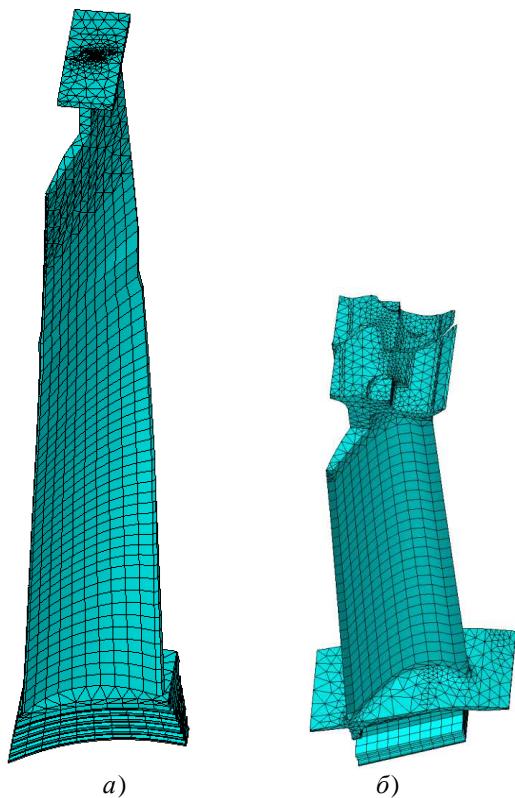


Рис.3 – Вид КЭ модели периодов лопаточных венцов 1 (а) и 2 (б)

В результате решения статической контактной задачи определены распределения контактных давлений в бандажном соединении при различных условиях эксплуатации двигателя, пример которых для выбранных лопаточных венцов приведен на рис. 4.

Из представленных на рис. 4 (а) распределений контактных давлений в бандажной полке следует, что при отсутствии центробежных сил для венца 1 ненулевые контактные давления сосредоточены в очень узкой зоне верхней кромки полки, и их значения невысокие. При учете центробежных сил площадь контактирования и значения давлений для этого венца существенно увеличивается (см. рис.4 (б)).

Из представленных на рис. 4 (а) распределений контактных давлений в бандажной полке следует, что при отсутствии центробежных сил для венца 1 ненулевые контактные давления сосредоточены в очень узкой зоне верхней кромки полки, и их значения невысокие. При учете центробежных сил площадь контактирования и значения давлений для этого венца существенно увеличивается (см.рис.4 (б)).

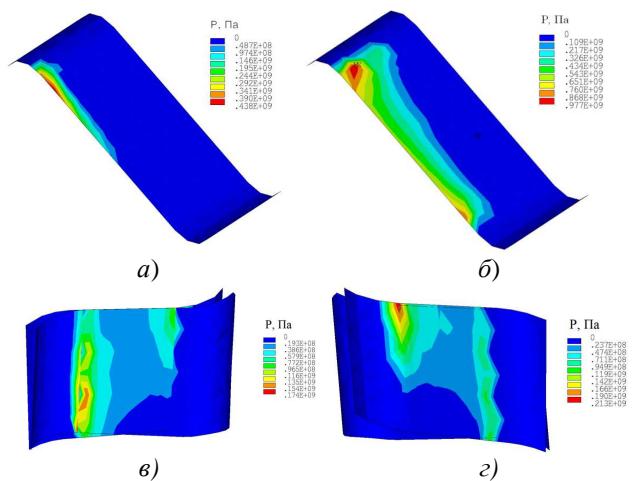


Рис.4 – Распределение контактного давления для венцов 1 (а,б) и 2 (в,г) при скорости вращения рабочего колеса ω , равной 0 (а,в); 50 об/с (венец 1) (б) и 612 об/с (венец 2) (г)

Для венца 2 при учете действия центробежных сил происходит перераспределение максимальных значений контактного давления с нижней части полки к верхней ее кромке. При этом площадь контакта остается примерно такой же, как в случае отсутствия центробежной силы, а значения контактного давления возрастают.

Вторым этапом исследования является задание условий контактного взаимодействия бандажных полок. В данной работе, учитывая ее постановку, были рассмотрены указанные выше три варианта моделирования контактного взаимодействия полок. Для их реализации осуществлялось следующее:

Вариант 1. Накладывание условий совместности перемещений с использованием процедуры COUPLING (команда CP) в программном комплексе ANSYS по всем направлениям в узлах поверхностей бандажных полок, в которых наблюдается ненулевое значение контактного давления (см. рис. 4).

Вариант 2. Создание упругих элементов типа COMBIN14 в программном комплексе ANSYS между узлами, в которых наблюдаются ненулевые контактные давления. Значения коэффициента жесткости каждого такого элемента соответствует значениям контактного давления в соответствующих узлах. При этом предполагается возможность растяжения и сжатия по всем осям декартовой системы координат.

Вариант 3. Комбинированный способ применения COMBIN14 и COUPLING, который предполагает создание упругих элементов между узлами по двум степеням свободы (UX и UY). Величины коэффициента жесткости каждого элемента совпадают со значениями контактного давления в соответствующих узлах. Также производилось накладывание условий совместности перемещений в радиальном направлении (вдоль пера лопатки, UZ) на узлы, в которых наблюдается ненулевое значение контактного давления.

Обсуждение результатов

С использованием разработанных КЭ моделей периодов выбранных лопаточных венцов были проведены вычислительные эксперименты по установлению влияния варианта моделирования контактного взаимодействия бандажных полок на спектр собственных частот колебаний.

Полученные значения собственных частот колебаний p_{mn} рассматриваемых венцов, где m , n – число узловых диаметров и окружностей соответственно, для $n=0$ при некоторых частотах вращения рабочего колеса приведены в таблицах 1 и 2. Здесь же указаны значения параметра

$$\varepsilon_m = \frac{p_{m0}^{(1)} - p_{m0}^{(2)}}{p_{m0}^{(1)}} \cdot 100\% , \quad (1)$$

характеризующего различие собственных частот колебаний, определенных с использованием вариантов 1 и 2.

Анализ полученных данных вычислительных экспериментов позволяет сделать следующие выводы:

Во-первых, собственные частоты каждой из рассматриваемых форм колебаний исследуемых лопаточных венцов несущественно зависят от способа моделирования контактного взаимодействия бандажных полок. При этом, за исключением отдельных форм колебаний, например соответствующих $m=0$, наиболее высокие значения собственных частот имеют место при использовании варианта 1, а наиболее низкие – варианта 2.

Во вторых, не установлено влияние соотношения геометрических размеров лопаток на различие собственных частот колебаний венцов. Так, например если для венца 1 при отсутствии центробежных сил максимальное значение параметра ε_m равно 2,5%, то для венца 2 – 1,8%.

Таблица 1 – Значения собственных частот колебаний p_{m0} в Гц исследуемых лопаточных венцов, определенные с использованием различных вариантов моделирования контактного взаимодействия, при $\omega=0$

m	Венец 1			Венец 2			ε_m , %	
	Вариант			ε_m , %	Вариант			
	1	2	3		1	2		
0	89,95	89,7	90	0,05	543	539	539	0,76
1	120,3	117	118,6	1,45	611	607	607	0,74
2	149,4	147,6	148,3	0,75	745	739	740	0,82
3	157,8	156,8	157,3	0,27	843	837	837	0,72
4	161,7	161,2	161,5	0,14	892	885	885	0,85
5	164,9	164,5	164,7	0,09	918	911	911	0,82
6	168,2	167,8	168	0,08	935	927	928	0,9
7	171,8	171,3	171,6	0,11	948	941	941	0,83
8	175,8	175,2	175,5	0,14	961	953	953	0,86
9	180,2	179,5	179,9	0,18	973	965	966	0,92
10	185,2	184,1	184,7	0,25	987	979	979	0,86
15	214,7	212,8	216,2	1,6	1080	1070	1070	0,9
20	248,1	244,5	250,7	2,5	1232	1217	1218	1,2
25	267,9	264,3	269,6	1,95	1444	1421	1423	1,6
30	269,4	266,1	270	1,45	1687	1658	1660	1,75
35	264	260,6	264,3	1,4	1888	1862	1864	1,37
45	258,7	254,9	258,8	1,5	1990	1977	1979	1,4

Таблица 2 – Значения собственных частот колебаний p_{m0} в Гц исследуемых лопаточных венцов, определенные с использованием различных вариантов моделирования контактного взаимодействия, при $\omega=50$ об/с (венец 1) и 612 об/с (венец 2)

m	Венец 1			Венец 2			ε_m , %	
	Вариант			ε_m , %	Вариант			
	1	2	3		1	2		
0	135,67	130,95	130,69	3,5	596	595	595	0,17
1	167,95	162,69	165,17	3,1	658	650	651	1,2
2	189,91	186,96	187,43	1,5	783	767	767	2,0
3	195,53	192,92	192,64	1,3	877	863	864	1,6
4	199,23	196,16	195,71	1,5	925	916	917	0,97
5	203,07	199,19	198,76	1,9	951	945	945	0,6
6	207,52	202,62	202,3	2,3	968	963	963	0,5
7	212,77	206,68	206,55	2,8	981	977	978	0,4
8	218,88	211,5	211,65	3,3	993	990	990	0,3
9	225,9	217,16	217,6	3,9	1006	1003	1003	0,3
10	233,8	223,7	224,65	4,3	1019	1016	1016	0,3
15	281,88	267,22	271,03	5,5	1112	1101	1101	0,99
20	318,11	306,49	310,88	3,6	1301	1268	1269	2,5
25	326,18	318,15	321,24	2,4	1472	1421	1423	3,5
30	325,09	316,85	319,29	2,5	1714	1643	1690	4,1
35	320,93	312,63	314,74	2,6	1919	1851	1888	3,5
45	315,53	307,67	309,56	2,5	2039	2013	2020	1,3

В третьих, учет центробежных сил приводит к возрастанию различия собственных частот колебаний рассматриваемых венцов. Так, в этом случае максимальное значение параметра ε_m для венца 1 равна 5,5%, а венца 2 – 4,1%. Такое явление можно объяснить тем, что центробежные силы обуславливают увеличение площади контакта, а для варианта 1 и количества узлов, на которые накладываются связи, что приводит к ужесточению модели лопаточного венца.

Рассмотрим теперь частотные функции $p_{mn} = f(m)$, которые были построены и приведены на рис. 5-6. Видно, что их вид для венцов, характеризующихся различной величиной L/b , не зависит от варианта моделирования контактного взаимодействия бандажных полок, что хорошо согласуется с известными данными [3,5,11].

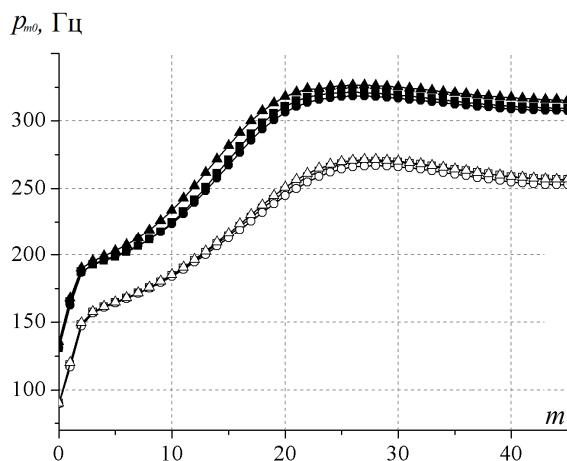


Рис. 5 – Частотная функция венца 1 при 1 (▲,Δ), 2 (□,■) и 3(○,●) вариантах моделирования контактного взаимодействия для скорости вращения рабочего колеса ω , равной 0 (□,○,Δ); 50 об/с (■,●,▲)

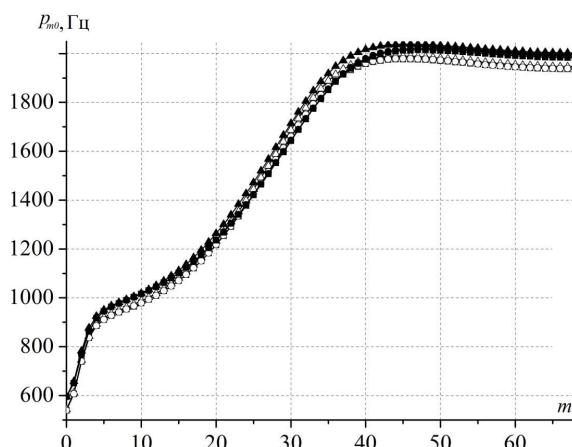


Рис. 6 – Частотная функция венца 2 при 1 (▲,Δ), 2 (□,■) и 3(○,●) вариантах моделирования контактного взаимодействия для скорости вращения рабочего колеса ω , равной 0 (□,○,Δ); 612 об/с (■,●,▲)

Выводы

На основании выполненных вычислительных экспериментов установлены закономерности влияния способа моделирования контактного взаимодействия бандажных полок лопаток на спектр собственных частот колебаний венцов турбин, характеризующихся различными закруткой пера лопаток и отношением его длины L к хорде b концевого сечения.

Установлено, что вариант моделирования контактного взаимодействия бандажных полок не влияет на значения собственных частот рассматриваемых венцов, а максимальная их разница при выбранных условиях эксплуатации не превышает 5,6%.

Исходя из результатов анализа данных вычислительных экспериментов можно сделать заключение, что для определения спектра собственных частот колебаний бандажированных лопаточных венцов более приемлемым и физически обоснованным является способ моделирования контактного взаимодействия полок, основанный на комбинированном использовании COMBIN14 и COUPLING в программном комплексе ANSYS.

Список литературы

1. Воробьев, Ю. С. Моделирование колебаний охлаждаемых лопаток газовых турбин / Ю. С. Воробьев, К. Ю. Дьяконенко, С. Б. Кулишов, А. Н. Скрицкий // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – Вип. 9/45. - С. 12 - 15.
2. Ларин, А. А. Исследование вынужденных колебаний лопаточных аппаратов со случайной технологической расстройкой по модели одного сектора / А. А. Ларин, В. А. Жовдак // Вестн. НТУ «ХПИ». – Харків: НТУ«ХПІ». – 2009. – №42. – С. 89-99.
3. Zinkovskii, A. P. Effect of identity violations of contact interaction between shrouds on the static and dynamic stress state characteristics of blade rings / A. P. Zinkovskii, Ya. D Krugli // Strength of Materials. – 2012. – Vol. 44, № 2. – P. 144-150.
4. Firrone, C. M. Modelling friction contacts in structural dynamics and its application to turbine bladed disks / C. M. Firrone, S. Zucca // Numerical Analysis – Theory and Application. – Rijeka. – 2011. – C. 301 - 334.
5. Савченко, К. В. Влияние условий сопряжения бандажных полок на спектр собственных частот колебаний лопаточного венца / К. В. Савченко // Вібрації в техніці і технологіях. – 2015. – № 1 (77). – С. 111 - 116.
6. Fan Jiang Research on structural design and optimization of the turbine blade shroud / Fan Jiang, Le Han, Rongqiao Wang, Xiuli Shen, Weiwei Zang, Zhipeng Chang // Proc of ASME Gas Turbine India Conference. – New York. – 2012. – P. 657 - 663.
7. Bachschmid, N. On impulsive vibration tests of shrouded blade row / N. Bachschmid, E. Pesatori, S. Bistolfi, M. Ferrante, S. Chatterton // Proc of the 6th International Conference Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques: 25-26 October 2011. – Compiègne: 2011. – P. 1-10.

8. Herzog, A. Nonlinear vibrations with friction: a multiharmonic approach / A. Herzog, L. Panning // *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*. – 2010. – Vol. 10. – № 1. – P. 245-246.
9. Zinkovskii, A. P. Influence of the Orientation of Shroud Contact Surfaces on the Static Stress State of Turbine Rotor Blades / K. V. Savchenko, A. P. Zinkovskii, I. G. Tokar, Ya. D. Kruglii // *Strength of Materials*. – 2014. – Vol. 46. – № 4. – P. 493-502.
10. Chen, Z. N. Finite element analysis on collision-vibration characteristics of shrouded blades based on ANSYS/LS-DYNA / Z. N. Chen, X. X. Lu, L. P. Li, Z. J. Huang, F. H. Jin // *Dongli Gongcheng Xuebao / Journal of Chinese Society of Power Engineering*. – 2013. – Vol. 33. – № 3. – P. 189-193.
11. Зиньковський, А. П. Вплив характеристик конечноділятальної моделі лопаточного венца на результати розрахунку його спектра власних частот коливань / А. П. Зиньковський, Д. В. Петришин, Я. Д. Круглій // *Вибрації в техніці і технологіях*. – 2014. – № 3(75). – С. 77- 83.
12. Иванов В. П. Колебания рабочих колес турбомашин. – М.: Машиностроение. – 1983. – 224 с.
4. Firrone, C. M., Zucca, S. Modelling friction contacts in structural dynamics and its application to turbine bladed disks. *Numerical Analysis – Theory and Application*. Rijeka, 2011, 301 - 334.
5. Savchenko, K. V. Vliyanie uslovij sопryazheniya bandazhnyh polok na spektr sobstvennyh chastot kolebanij lopatochnogo venga. *Vibracii v tehnici i texnologiyax*, 2015, 1(77), 111 - 116.
6. Fan Jiang, Le Han, Rongqiao Wang, Xiuli Shen, Weiwei Zang, Zhipeng Chang Research on structural design and optimization of the turbine blade shroud, *Proc of ASME Gas Turbine India Conference*. New York, 2012, 657 - 663.
7. Bachschmid, N., Pesatori, E., Bistolfi, S., Ferrante, M., Chatterton, S. On impulsive vibration tests of shrouded blade row. *Proc of the 6th International Conference Acoustical and Vibratory Surveillance Methods and Diagnostic Techniques*, Compiègne, 2011, 1-10.
8. Herzog, A., Panning, L. Nonlinear vibrations with friction: a multiharmonic approach. *Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics*, 2010, 10(1), 245-246.
9. Savchenko, K. V., Zinkovskii, A. P., Tokar, I. G., Kruglii, Ya. D. Influence of the Orientation of Shroud Contact Surfaces on the Static Stress State of Turbine Rotor Blades. *Strength of Materials*, 2014, 46(4), 493-502.
10. Chen, Z. N., Lu, X. X., Li, L. P., Huang, Z. J., Jin, F. H. Finite element analysis on collision-vibration characteristics of shrouded blades based on ANSYS/LS-DYNA. *Dongli Gongcheng Xuebao / Journal of Chinese Society of Power Engineering*, 2013, 33(3), 189-193.
11. Zinkovskii, A. P., Petrishin, D. V., Kruglii, Ya. D. Vliyanie harakteristik konechno-elementnoj modeli lopatochnogo venga na rezultaty rascheta ego spektra sobstvennyh chastot kolebanij. *Vibracii v tehnike i texnologiyah*, 2014, 3(75), 77- 83.
12. Ivanov, V. P. Kolebaniya rabochikh koles turbomashin, Moskow, Mashinostroenie, 1983, 224 p.

Bibliography (transliterated)

- 1 Vorobev, Ju. S., Djakonenko, K. Ju., Kulishov, S. B., Skrickij, A. N. Modelirovanie kolebanij ohlazhdaemyh lopatok gazovyh turbin. *Aviacionno-kosmicheskaja tekhnika i tehnologija*. 2007, 9/45, 12-15.
- 2 Larin, A. A., Zhovdak, V. A. Issledovanie vynuzhdennyx kolebanij lopatochnyh apparatov so sluchajnoj tehnologicheskoy rassstrojkoy po modeli odnogo sektora. *Vest. NTU «KhPI»*, Xarkiv: NTU «KhPI», 2009, 42, 89-99.
3. Zinkovskii, A. P., Kruglii, Ya. D. Effect of identity violations of contact interaction between shrouds on the static and dynamic stress state characteristics of blade rings. *Strength of Materials*. 2012, 44(2), 144-150.

Поступила (received) 22.09.2015

УДК 539.388.1:678

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ОПОРУ ВТОМІ ГУМОВИХ СУМІШЕЙ, ЩО ВХОДЯТЬ ДО СКЛАДУ ЕЛЕМЕНТІВ ПНЕВМАТИЧНИХ ШИН ПІСЛЯ ШТУЧНОГО СТАРІННЯ МАТЕРІАЛУ

О. О. ЛАРИН

Кафедра динаміки та міцності машин, Національний Технічний Університет «ХПІ», Харків, УКРАЇНА
email: AlexeyA.Larin@gmail.com

АННОТАЦІЯ У роботі визначаються показники опору втомі гумової суміші матриці каркасу пневматичних шин та закономірності їх зміни внаслідок старіння. Дослідження проводиться експериментально з плоскими зразками на розтяг із циклічним завданням деформацій. окрім досліджувалися зразки матеріал до та після старіння. Старіння задавалось штучно шляхом тривалої витримки зразків в термокамері на фіксованій підвищенні температурі. Проведено порівняльний аналіз зміни параметрів кривих утоми з часом в наслідок старіння. В роботі також запропоновано апроксимацію зміни базового числа циклів до відмови з часом внаслідок старіння.

Ключові слова: зразки гуми, старіння, експериментальні тести на втому, каркас пневматичної шини.

АННОТАЦИЯ. В работе определяются показатели сопротивления усталости резиновой смеси матрицы каркаса пневматических шин и закономерности их изменения в результате старения. Исследования проводятся экспериментально с плоскими образцами на растяжение. Отдельно исследовались образцы материала до и после старения. Старение проводилось искусственно путем длительной выдержки образцов в термокамере на фиксированной повышенной температуре. Проведен сравнительный анализ изменения параметров кривых усталости со временем в результате старения. В работе также предложено аппроксимацию изменения базового числа циклов до отказа со временем в результате старения.

Ключевые слова: образцы резины, старения, экспериментальные тесты на усталость, каркас пневматической шины.

AN INVESTIGATION OF THE PNEUMATIC TIRE'S RUBBER COMPOUNDS ON THE FATIGUE RESISTANCE AFTER ARTIFICIAL AGING OF THE MATERIALS

O. LARIN

Dynamics and Strength of machines department, National Technical University "KhPI", Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The paper defines parameters of the fatigue resistance of the rubber mixture for matrix of pneumatic tire's carcass (belt) layers and the regularity of their changes due to aging. The research was conducted experimentally using a modern measuring system INSTRON. Tests has been carried out with flat specimens on cyclic tensile deformation in a displacement control condition. The amplitudes of deformation was fixed and the specimens cycles around the set middle level of deformation, that avoids the effect of specimen buckling. The results of the tests on cyclic deformation up to failure at different amplitudes of the load have been approximated by the straight lines in a double logarithmic coordinates, i.e. classical Wohler fatigue curves were obtained. The specimens before and after aging have been studied independently.

The aging of samples was gained artificially using the procedure of thermal prolonged exposure in a heat chamber at a fixed temperature. Based on the recommendations given in the literature, the samples were kept for 6 days at 80 °C, that corresponds to the natural aging of this material at a room temperature during the 2 years.

Comparative analysis of fatigue curves obtained for samples of the material before and after artificial aging shows that the slope of Wohler curves does not change over the time, but the basic number of cycles to failure is significantly reduced. The paper also proposed to use a hyperbolic relation for approximation of the changes in the base number of cycles to failure over a time due to aging. The parameters of the approximations for fatigue curves obtained relatively of the amplitudes of strains and Cauchy true stresses have been found independently for the rubber specimens of the pneumatic tire's carcass (belt) layers.

Keywords: rubber specimens, aging, experimental fatigue tests, carcass layers of the pneumatic tire.

Вступ

Однією з важливих особливостей еластомірних матеріалів, зокрема гумових сумішей, є прояв ефекту природного старіння [1–4]. Відомо, що гумоподібні матеріали здатні істотно змінювати свої фізико-хімічні властивості з часом. При чому такі характеристики, як статична міцність та опір утомі

можуть змінюватись в декілька разів за номінальний термін експлуатації конструкції для гумових елементів навіть, які не знаходяться в роботі (наприклад, під час зберігання) [5, 6]. Пружна поведінка та дисипативні властивості еластомірів також здатні істотно змінюватись з часом. Для пневматичних шин легкових автомобілів термін гарантованого зберігання (навіть не експлуатації)

© О. О. ЛАРИН, 2015

складає 5-6 років, після яких компанії виробники не рекомендують використовувати шини через низьку їх надійність, оскільки властивості гуми суттєво деградували [1-3]. Отже аналіз закономірностей зміни властивостей гумових матеріалів з часом є такою самою важливою проблемою, як і дослідження початкових характеристик цих матеріалів.

На процеси старіння впливає велика кількість зовнішніх факторів, серед яких найбільш суттевими є термічне старіння, озонування (насичення киснем), вплив хімічних речовин (зокрема дуже агресивну дію реалізують нафтопродукти та сольові розчини), ультрафіолетове опромінення тощо [7-9]. Враховуючи означені фактори, сучасні елементи конструкцій, що мають гумові частини виготовляють з тим аби уникнути безпосереднього впливу зазначених факторів на несучі елементи конструкцій, тобто їх покривають захисними елементами. Наприклад, пневматичні шини мають в якості основних несучих елементів: каркас, брекер та бортову зону, які покриті із зовнішнього боку м'якою гумовою бічною частиною та протектором, які з точки зору міцності виконують функції захисту від впливу зовнішніх факторів, а з внутрішньої сторони сучасні шини покривають шаром герметику, який не пропускає кисень. Таким чином, за належного зберігання та правильної експлуатації особливий вплив на старіння відбувається переважно через механізми термічного старіння (решта факторів у будь-якому разі вносить свій певний вклад, наприклад, завжди присутнє дифузійне проникнення кисню у гуму) [10].

Термічне старіння – це процес зміни фізичних та хімічних характеристик гуми під дією температури [11]. Слід відзначити, що даний процес протикає за будь-яких позитивних значень температури (навіть за кімнатних) відбуваються процеси старіння. Звичайно, деградація є тим більш інтенсивною чим більшою є температура. Даний факт покладено в основу проведення прискорених випробувань гуми на механічну поведінку у штучно зістареному стані.

Слід наголосити на тому, що старіння впливає також і на показники опору втомі для цих матеріалів. При чому в літературі є досить обмежена інформація щодо впливу старіння на ці характеристики, а більшість відомих досліджень описують зміну у часі пружних параметрів та показників міцності. Проте саме зміна характеристик втоми даних матеріалів лежить в основі оцінки надійності елементів конструкцій, що складаються з гумоподібних матеріалів та гумокордних композитів.

Мета роботи

Метою даного дослідження є експериментальне визначення закономірностей зміни показників опору втомі гумової суміші каркасу пневматичних шин внаслідок їх штучного старіння.

Методика проведення процедури штучного старіння гумових матеріалів

Для штучного старіння зразки гуми витримувались тривалий час на фіксованій підвищений температурі. Для цієї процедури використовувалась термо-камера (лабораторний сушильна шафа) литовського виробництва SNOL 44/200 LNP з примусовою конфекцією, яка оснащена мікропроцесорним контролером OMRON E5CK. Данна сушильна шафа надає можливість формувати програмний режим для створення та утримання рівномірного по камері температурного стану. Шафа дозволяє досить швидко (блізько 3-х хвилин) виходити на стабільний температурний режим до 200 °C та утримувати його тривалий час на фіксованому рівні (під час роботи шафи можлива невелика варіація температури ± 2 °C за 2-3 години). На рис. 1 показана шафа, що використовувалась.

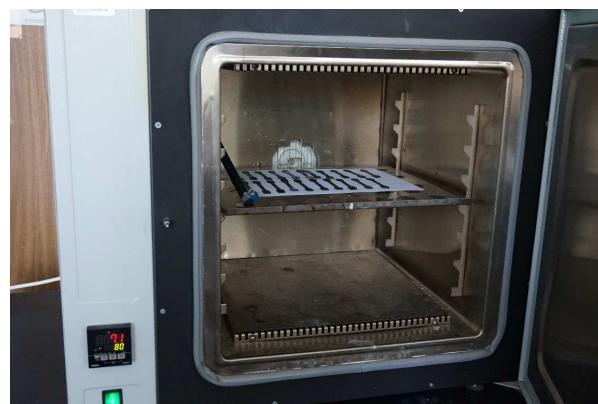


Рис. 1 – Зовнішній вигляд лабораторного сушильної шафи SNOL 44/200 LNP

Відомі в літературі дані, щодо штучного старіння пневматичних шин загалом та штучного старіння їх окремих елементів вказує на те що використання термо-камери з фіксованим рівнем температури 70 °C пришвидшує процеси старіння по характеристикам міцності у (30-40) разів [6]. Отже, звичайне старіння пневматичної шини за межі гарантованого терміну зберігання у 5 років еквівалентне перебуванню елементів шини в термо-камері із повітрям без додаткового тиску на температурі 70 °C (6,5 – 7,5) тижнів. У зазначених довідкових джерелах та рекомендаціях по пришвидшенному штучному старінню гумових матеріалів зазначається, що процедури штучного старіння слід проводити не перевищуючи температури 100 °C, а оптимальним вважається значення в межах (60-70) °C. Такі обмеження пов’язані із можливістю виникнення сторонніх хімічних реакцій у гумі за високих температур, і таким чином отримані результати не будуть відповідати природному старінню. Тим не менше в літературі є приклади дослідження старіння шинних

гум на температурі 90 °C, а також слід відмітити, що в пневматичних шинах під час експлуатації можливе підвищення температури в межах 100 °C, тобто гумові суміші, що застосовуються в шинах є термостійкими в межах 100 °C.

З метою пришвидшення штучного старіння при дослідженнях, що проводились в даній роботі використовувалось старіння на температурі 80 °C. Еквівалентні значення по часу зберігання (експлуатації) шин в звичайних умовах можна визначити з моделі Арреніуса для розрахунку коефіцієнту зміщення:

$$k = \exp\left[\frac{E_0}{R}\left(\frac{1}{T_1} + \frac{1}{T_2}\right)\right], \quad (1)$$

де k – коефіцієнту зміщення, який показує у скільки разів менше часу необхідно витримати зразок в умовах з температурою T_1 для того щоб його властивості міцності змінились так само як для зразку матеріалу який перебуває у температурі T_2 ; E_0 – енергія активізації хімічних реакцій (або фізичних процесів, наприклад дифузії) в матеріалі, R – універсальна газова стала ($R = 8,31446 \text{ Дж/(моль}\cdot\text{К)}$); T_1 та T_2 – температуру для станів що порівнюються, які задані в Кельвінах.

Енергія активізації E_0 є емпіричним параметром, який необхідно визначити з порівняння певної характеристики визначененої після витримки заданий час на різних температурах. Так, наприклад, для характеристик міцності гумових сумішей пневматичних шин відомо, що найбільший коефіцієнт зміщення складає 40 для матеріалу, що знаходиться при температурі 70 °C у порівнянні до матеріалу, який є у звичайних умовах. Використання формули (1) для окреслених вище параметрів дозволяє визначити енергію активізації для процесу деградації властивостей міцності гумових зразків пневматичних шин $E_0 = 105 \text{ кДж/моль}$.

Використовуючи отримане значення для енергії активізації, можна розрахувати коефіцієнт зміщення для гумових зразків витриманих і за більшої температури. В даній роботі для прискореного старіння було використано витримку зразків 3 та 6 діб у термо-камері на температурі 80 °C, що відповідає перебуванню цього матеріалу в нормальніх умовах протягом 1 та 2 років.

Експериментальні визначення показників кривих утоми для гумових матеріалів до та після штучного старіння

В даній роботі було проведено серію експериментальних випробувань на циклічну втрати статичної стійкості деформування зразків було без стискання. Таким чином проводилось циклічне деформування при жорсткому навантаженні (задавались деформації) із фікованими середнім

Для досліджень було використано зразки гуми геометрія яких відповідає вимогам стандартів, щодо механічних випробувань гумоподібних матеріалів ISO 527 1BA (рис. 2).

Зразки мали наступні фактичні геометричні параметри: товщина: $h = 1 \pm 0,1 \text{ мм}$; ширина: $b = 5,4 \text{ мм}$; довжина робочої частини: $L=58 \text{ мм}$; загальна довжина: $L_{sp} = 80 \text{ мм}$. Товщина зразків мала 10% варіацію внаслідок виробничих допусків, що існують при виготовленні гумового листу. Решта параметрів мала чіткі значення оскільки усі зразки було отримано шляхом вирублення їх одним і тим самим штампом стандартного розміру. На рис. 2 наведено ескізне креслення геометрії зразків.

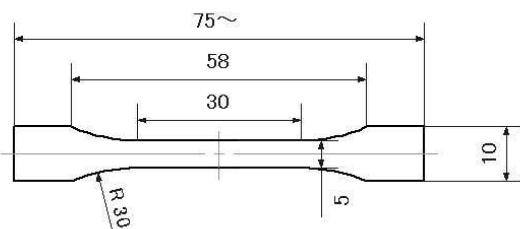


Рис. 2 – Геометрія зразків для випробувань

Зразки жорстко фіксувались у пневматичних затискачах, як показано на рис. 3. Пневматичні затискачі дозволяють утримувати фіксоване значення зусилля, що утримує зразок навіть при зменшенні його товщини внаслідок прояву ефекту Пуассона при великих деформаціях еластовимірних матеріалів. При випробуваннях на втому задавалось жорстке циклічне навантаження, тобто задавались фіксовані значення деформації зразку, при цьому вимірювалось зусилля, що виникає у нижньому затискачі (використовувався стандартний сенсор даної машини із максимально можливим зусиллям у $3 \text{ кН} \pm 0,01 \text{ Н}$).



Рис. 3 – Фіксація зразків у вимірювальному комплексі INSTRON E3000 для проведення циклічних тестів

З метою уникнення прояву ефекту втрати статичної стійкості деформування зразків було без стискання. Таким чином проводилось циклічне деформування при жорсткому навантаженні (задавались деформації) із фікованими середнім

рівнем деформації в циклі (100 %) та з різними амплітудами: 80 %, 66 % та 50 %. Частота циклів складала 5 Гц. Дане значення було знайдено з міркувань забезпечення відсутності динамічної складової у поведінці зразку (деформації проходила квазістатично), а також забезпечувало відсутність помітного нагріву зразків (при більших значеннях спостерігались вібрації випробувальної машини та складна полігармонічна поведінка зразків).

Крім того тести на втомну довговічність проводились для стабілізованого матеріалу, тобто спочатку виконувалось 10 циклів деформації зразка з якого після цього знімалось повністю навантаження. Така попередня процедура дозволяла позбавитись впливу ефекту Маліна на подальші результати.

Експериментальні точки було апроксимовано прямою лінією у подвійних логарифмічних координатах, тобто відповідно до рівняння Велера:

$$\sigma_a^m \cdot N = \sigma_{-1}^m \cdot N_0, \quad (2)$$

де N – кількість циклів деформації до відмови по

втомі при амплітуді напружень σ_a ; m – показник нахилу кривої Велера, N_0 – базове число циклів до відмови, σ_{-1} – теоретична (умовна) границя втоми, тобто під σ_{-1} розумітимуться амплітуди напружень за яких відмова зразку буде спостерігатись через базове число циклів (N_0).

В даній роботі було проведено апроксимації таким чином, що було зафіксовано базовий рівень амплітуд деформування на рівні 50% і при цьому параметрами кривої Велера, що підлягають визначенню вважались показник нахилу цієї кривої m та кількість циклів N_0 до руйнування зразку.

На рис. 4 представлена криві втоми для зразків гумової суміші каркасу (брекеру) пневматичних шин після їх штучного старіння (6 діб в термо-камері при температурі 80 °C) в порівнянні до приведених кривих утоми цього ж матеріалу до старіння. На рисунках верхні криві та сині точки відповідають даним отриманим для зразків до старіння, а нижні криві та червоні точки відповідно – кривим утоми після штучного старіння.

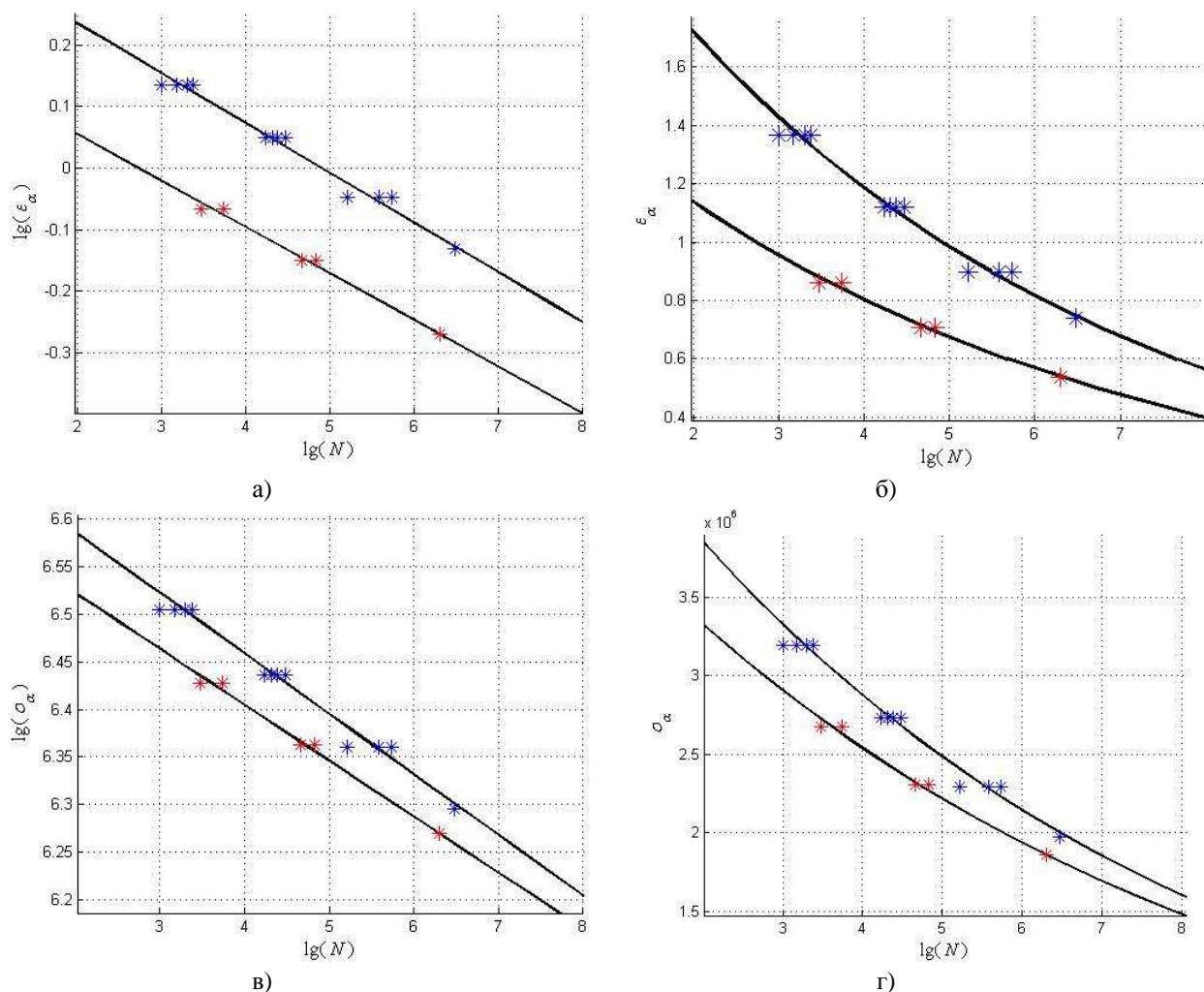


Рис. 4 – Криві утоми гумової суміші матриці каркасу (брекеру) пневматичних шин до (верхні криві) та після штучного старіння (6 діб в термо-камері на температурі 80 °C) представлені для амплітуд деформацій (а, б) та істинних напружень (в, г).

Порівняння кривих утоми побудованих окремо для амплітуд деформацій та істинних напружень Коші для гумової суміші каркасу пневматичних шин до та після штучного старіння показує, що показник нахилу кривої втоми не зазнає вираженої зміни і може вважатись сталим. Також очевидним є якісний висновок, щодо того, що спостерігається суттєве зменшення кількості циклів до відмови, яке може витримати даний матеріал після старіння.

Порівняльний аналіз показує, що базове число циклів до відмови на фіксованому рівні амплітуд деформацій у 50 % зменшилось у 80 разів, а аналогічне зменшення по кривим, що побудовані для істинних напружень спостерігається у 35 разів. В таблиці 1 наведено дані по характеристикам кривих утоми до та після старіння.

Таблиця 1 – Параметри кривих утоми для гумової суміші матриці каркасу (брекеру) пневматичних шин до та після штучного старіння

матеріал	параметри кривої втоми			
	для деформацій		для істинних напружень	
	m	N_0	m	N_0
у первісному стані	13	$4 \cdot 10^8$	16	$6,3 \cdot 10^8$
після штучного старіння	13	$5 \cdot 10^6$	17	$1,8 \cdot 10^7$

В даній роботі пропонується вважати, що старіння призводить до зменшення кількості циклів до відмови на фіксованому рівні амплітуд навантаження аналогічно як відбувається зміна характеристик міцності – за гіперболічною залежністю, яку можна представити рівнянням:

$$N_0 = \frac{N_{00}}{(1 + \gamma \cdot t)} , \quad (3)$$

де N_{00} – початкове значення, тобто кількість циклів до відмови на фіксованому рівні навантаження (відповідає деформуванню із амплітудами деформацій у 50%) для матеріалу, що не зазнав старіння; γ – коефіцієнти спаду (швидкість зміни) внаслідок старіння кількість циклів до відмови на фіксованому рівні навантаження. Використовуючи дані з таблиці 1 було визначено наступні параметри апроксимації (3): $N_{00} = 4 \cdot 10^8$; $\gamma = -0.109$ – для кривої Велера, яка побудована відносно деформацій, а також $N_{00} = 6,3 \cdot 10^8$; $\gamma = -0.0875$ – для кривої Велера, яка побудована відносно істинних напружень Коші. На рис. 5 графічно наведено залежності (3).

Точками позначені експериментальні дані, які є приведеними у часі до нормального старіння відповідно до моделі Арреніуса. На рисунках

приведено залежності зміни логарифму кількості циклів до відмови внаслідок старіння від часу.

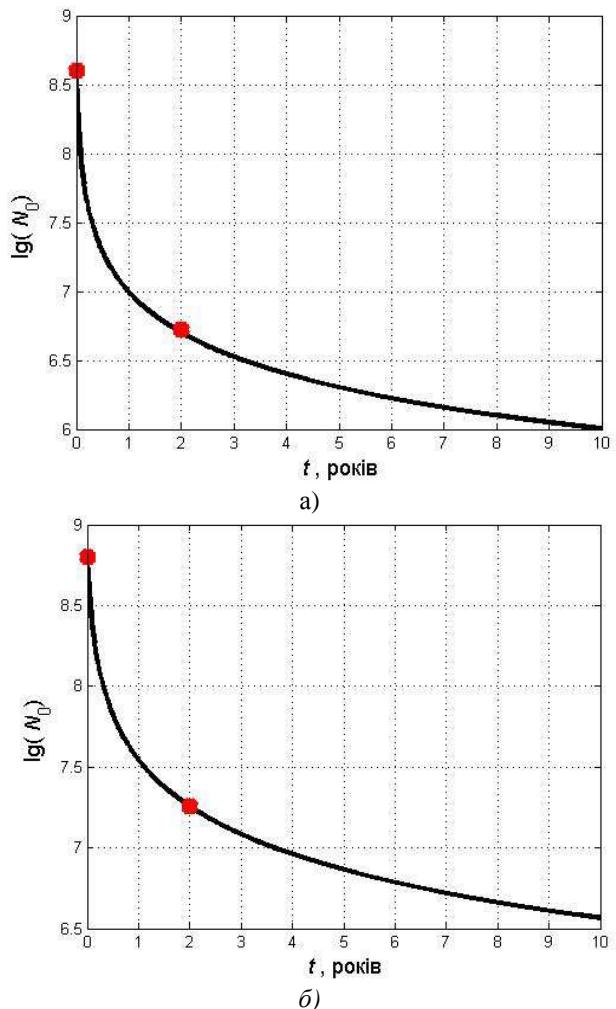


Рис. 5 – Криві зміни характеристик втоми (кількості циклів до відмови при фіксованому жорсткому навантаженні із амплітудою деформацій 50%) при старінні гумових зразків з матриці каркасу (брекеру) в пневматичних шинах для кривої Велера, яка побудована відносно деформацій (а) та істинних напружень Коші (б)

Із представлених залежностей можна побудувати екстраполяцію зміни характеристики опору втомі даного матеріалу на більший термін роботи (або зберігання). Аналіз графіків показує, що за 10 років базове число циклів до відмови змінюється більш ніж на 2 порядки.

Висновки

В роботі проведено комплекс експериментальних випробувань гумових зразків матриці каркасу (брекеру) пневматичних шин легкових автомобілів на втомну міцність до та після їх штучного старіння. Процедура старіння

проводились шляхом витримки зразків у термокамері на фіксовані температурі 80 °C протягом 6 діб. Встановлено за моделлю Арреніуса, що така витримка для даного матеріалу відповідає його природному старінню протягом 2x років.

В рамках дослідження побудовані криві втоми (криві Велера) по деформаціям та істинним напруженням Коші для зразків гуми каркас пневматичних шин до та після процедури штучного старіння. Порівняльний аналіз отриманих результатів показує, що показник нахилу кривих утоми не змінюється через старіння в той час як базове число циклів до відмови суттєво зменшилось (більш ніж на порядок). Так, за два умовних роки базове число циклів до відмови гумових зразків матриці каркасу (брекеру) пневматичних шин зменшилось у 80 та 35 разів відповідно для кривих утоми побудованих відносно деформацій та істинних напружень Коші. З метою узагальнення результатів в роботі проведено апроксимацію зміни у часі базового числа циклів до відмови в наслідок старіння матеріалу за гіперболічною залежністю.

Список літератури

- 1 **Юрченко, А. Н.** Автомобильные шины (требования, эксплуатация, износ) / А. Н. Юрченко.– Харьков: ДП ХМЗ «ФЭД». – 2003. – 115 с.
- 2 **Clark, S. K.** Mechanics of Pneumatic Tires, US Department of Transportation, Dot HS 805952, Washington, DC,2006.
- 3 **Ларин, А. А.** Исследование закономерностей деформирования пневматических шин в контакте с дорогой у учетом наличия эксплуатационной деградации материала / Ю. В. Арефин, А. А. Ларин // Механика та машинобудування: Наково-технічний журнал. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2011.– №2. – С. 52–57.
- 4 **Овчаров, В. И.** Свойства резиновых смесей и резин: оценка регулирование, стабилизация / В. И. Овчаров, М. В. Бурмистр, А. Г. Смирнов, В. А. Тютин, В. В. Вербас, А. П. Науменко. – М.: «САНТ–ТМ» . – 2001.– 400 с.
- 5 **Baldwin, J. M.** Rubber aging in tires. part 1: field results / J. M. Baldwin, D. R. Bauer, K. R. Ellwood // Polymer Degradation and Stability. – 2007. – Vol. 92, No. 1. – P. 103-109.
- 6 **Bauer, D. R.** Rubber aging in tires. part 2: accelerated oven aging tests / D. R. Bauer, J. M. Baldwin, K. R. Ellwood // Polymer Degradation and Stability. – 2007. – Vol. 92, No. 1. – P. 110-117.
- 7 **Choi, J.-H.** Heat aging effects on the material property and the fatigue life of vulcanized natural rubber, and fatigue life prediction equations / J.-H. Choi, H. Jin Kang, H.-Y. Jeong [et al.] // Journal of Mechanical Science and Technology. – 2005. – Vol. 19, No. 6. – P. 1229-1242.
- 8 **Huang, D.** Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds i. cyclic aging / D. Huang, B. J. LaCount, J. M. Castro, F. Ignatz-Hoover // Polymer Degradation and Stability. – 2001. – Vol. 74, No. 2. – P. 353-362.
- 9 **Hansaka, M.** Investigation on aging of train rubber hose. / M. Hansaka, M. Ito, N. Mifune // Quarterly Report of RTRI. – 1999. – Vol. 40, No. 2. – P. 105-111.
- 10 **LaCount, B. J.** Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds ii. design and development of an accelerated outdoor aging simulator / B. J. LaCount, J. M. Castro, F. Ignatz-Hoover // Polymer Degradation and Stability. – 2002. – Vol. 75, No. 2. – P. 213-227.
- 11 **Woo, C. S.** Heat-aging effects on the material properties and fatigue life prediction of vulcanized natural rubber / C. S. Woo, W. D. Kim // e-Journal of Soft Materials. – 2006. – Vol. 2. – P. 7-12.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Yurchenko, A. M.** Car tires (rudiments, exploitation and wear). Kharkiv: DP HMZ «FED», 2003, 115 p.
- 2 **Clark, S. K.** Mechanics of Pneumatic Tires, US Department of Transportation, Dot HS 805952, Washington, DC,2006.
- 3 **Larin, O. O., Arefin, Yu. V.** Investigation of regularities of deformation pneumatic tires in contact with the road takes into account an availability of operational material degradation, *Mehanika ta mashinobuduvannya: Naukovo-tehnichniy gurnal*, Kharkiv: NTU “KhPI”, 2011, 2, 52-57.
- 4 **Ovcharov, V. I., Burmistr, M. V., Smirnov, A. G., Tutin, V. A., Verbas, V. V., Naumenko O. P.** The properties of rubber and rubber compounds: estimation, regulation and stabilization, Moskow:«SANT–TM», 2001, 400 p.
- 5 **Baldwin, J. M., Bauer, D. R., Ellwood, K. R.** Rubber aging in tires. part 1: field results, *Polymer Degradation and Stability*, 2007, 92(1), 103-109.
- 6 **Bauer, D. R., Baldwin, J. M., Ellwood, K. R.** Rubber aging in tires. part 2: accelerated oven aging tests, *Polymer Degradation and Stability*, 2007, (92)1, 110-117.
- 7 **Choi, J.-H., Jin Kang, H., Jeong, H.-Y.** [et al.] Heat aging effects on the material property and the fatigue life of vulcanized natural rubber, and fatigue life prediction equations, *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2005, 19(6), 1229-1242.
- 8 **Huang, D., LaCount, B. J., Castro, J. M., Ignatz-Hoover, F.** Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds i. cyclic aging, *Polymer Degradation and Stability*, 2001, 74(2), 353-362.
- 9 **Hansaka, M., Ito, M., Mifune, N.** Investigation on aging of train rubber hose. *Quarterly Report of RTRI*, 1999, 40(2), 105-111.
- 10 **LaCount, B. J., Castro, J. M., Ignatz-Hoover, F.** Development of a service-simulating, accelerated aging test method for exterior tire rubber compounds ii. design and development of an accelerated outdoor aging simulator. *Polymer Degradation and Stability*, 2002, 75(2), 213-227.
- 11 **Woo, C. S., Kim, W. D.** Heat-aging effects on the material properties and fatigue life prediction of vulcanized natural rubber. *e-Journal of Soft Materials*, 2006, 2, 7-12.

Надійшла (received) 15.10.2015

УДК 677.017.636

МОДЕЛЮВАННЯ РЕАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ ПРОХОДЖЕННІ РІДИНИ КРІЗЬ МАТЕРІАЛИ

М. Л. РЯБЧИКОВ

Кафедра технологій і дизайну, Українська інженерно педагогічна академія, Харків, УКРАЇНА
*email: nikolryab@rambler.ru

АННОТАЦІЯ Традиційно вважається, що процес сорбції характеризується константою дифузії матеріалу. Запропоновано вважати коефіцієнтом дифузії лінійною функцією від концентрації рідини в матеріалі. У цьому випадку для опису процесу сорбції необхідні дві константи матеріалу. Диференціальне рівняння сорбції в цьому випадку стає нелінійним. У статті розроблені методи вирішення такого рівняння. Наведено рішення для краївих умов абсолютноного змочування з одного боку матеріалу. Отримане рішення повністю відповідає всім відомим експериментальним даним. Воно може застосовуватися для опису процесу сорбції в довільному матеріалі.

Ключові слова: сорбція, коефіцієнт дифузії, нелінійне рівняння, концентрація рідини.

АННОТАЦИЯ Традиционно считается, что процесс сорбции характеризуется константой диффузии материала. Предложено считать коэффициент диффузии линейной функцией от концентрации жидкости в материале. В этом случае для описания процесса сорбции необходимы две константы материала. Дифференциальное уравнение сорбции в этом случае становится нелинейным. В статье разработаны методы решения такого уравнения. Приведено решение для краевых условий абсолютноного смачивания с одной стороны материала. Полученное решение полностью соответствует всем известным экспериментальным данным. Оно может применяться для описания процесса сорбции в произвольном материале.

Ключевые слова: сорбция, коэффициент диффузии, нелинейное уравнение, концентрация жидкости.

SIMULATION OF THE REAL PROCESS OF PASSING WATER THROUGH THE MATERIAL

M. L. RIABCHYKOV

Department of technology and design, Ukrainian engineer and pedagogic academy, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The use of materials subject to the sorption of water recently expanded. Distribution of these materials is hampered by lack of theoretical bases of their creation and operation. Traditionally it is considered that the sorption process is characterized by the diffusion constant of the material. Experimental data demonstrate the dependence of the concentration of water in the material times. Another characteristic is the dependence of the concentration rate over time. In this paper the technique of solving the linearized differential equation of sorption is developed. The solution is obtained in the form of concentration versus depth and time. Analysis of the solution showed a partial agreement with the experimental data. It has been suggested to represent diffusion coefficient as a linear function of the concentration of liquid in the material. In this case the description of sorption process requires two material constants. The first line corresponds to the diffusion coefficient. The second factor corresponds to changes during the accumulation of moisture sorption in the material. The differential equation of sorption in this case becomes nonlinear. The paper developed methods for solving this equation. The solution for the boundary conditions for the absolute wetting one side of the material is presented. The solution comprises two constants that are analogues of diffusion constants. The resulting solution is fully consistent with all known experimental data. It can be used to describe the adsorption in arbitrary material. Using this equation also allows to predict the time of accumulation of moisture in the material and to select the material with predetermined properties sorption.

Keywords: sorption, diffusion coefficient, nonlinear equation, the concentration of the liquid.

Introduction

Analysis of global trends in textile materials demonstrates the high priority research and development related to production of modern textile engineering purposes. A significant number of technical textile materials used as a geotextile material (drainage, insulation, separation), materials for construction (noise isolation, interior - to absorb the noxious fumes in hospitals and public buildings), medical supplies (operational textile linings for severe patients) etc. [1-3].

In this regard, there are some questions about the impact of the commodity composition and structure of textile fabrics for heat and mass transfer processes including the appointment of products.

Innovative line of multifunctional materials - combining in one package type of "sandwich" of materials with different capillary-porous structure that allows mass transfer purpose fully change processes, including adjust the intensity of heat transfer, humidity, noise. This gives ample opportunity to vary the properties

of textile composites by the individual properties of each functional layer [4, 5].

The mechanisms of water absorption described in a number of studies [6, 7]. However, a reliable mathematical models for them have not been established. Such models can significantly develop the perspectives of materials by absorbing water.

The proposed calculation model [8, 10] built on a linear basis and does not correspond to the actual experimental data.

Aim of the work

Develop a model of the passage of moisture through the material, based on the account of non-linear effects, which most closely matches the experimental data to predict the process of water absorption in any case.

Development of the methodic

Creating multifunctional multilayer materials with predictable properties requires determination of individual properties of each element of the package and taking into account when designing a product designation. This necessitates the study of structure and regularity water absorption and other physical properties of individual source of textile fabrics, depending on their structure and fiber composition.

Typical dependence of water absorption occasionally shown in Fig. 1, 2.

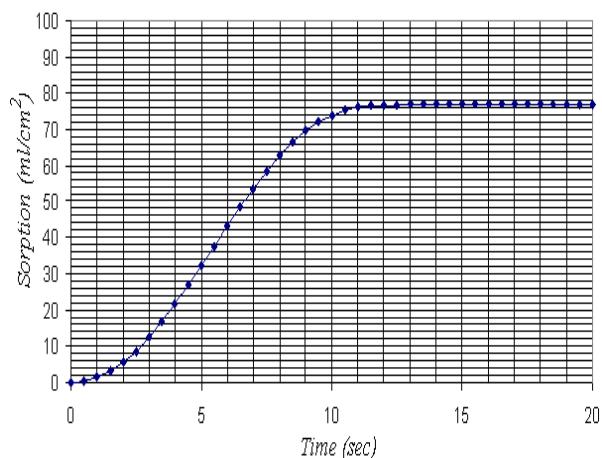


Fig.1 – Typical dependence of water sorption

For all indicators studied paintings U_{max} ; V_{max} and, $V_{30.70\%}$ determined with an accuracy of 3-6%, 12.7% and 12.7% respectively.

Data from the kinetic curves of water absorption are fairly complete description of sorption properties of textile materials. We can assume that such characteristics of water absorption as U_{max} ; V_{max} ; t_{max} for each textile material is its constants.

Note that these curves show data macroexperiments in which sorption parameters obtained

for the entire material layer. It remains an unknown question, what happens inside the material.

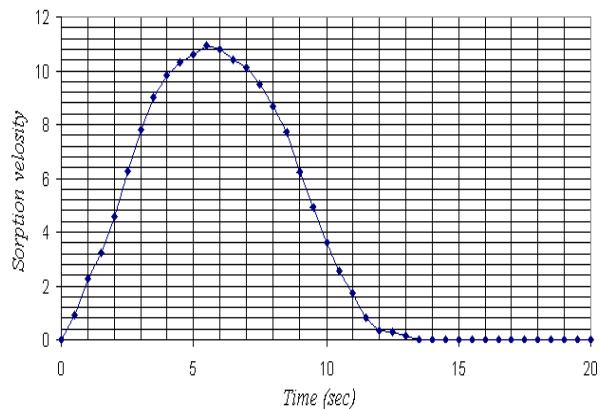


Fig.2 – Typical dependence of water sorption velocity

The answer to this question is important in the mathematical prediction of sorption through several layers of material (Fig. 3)

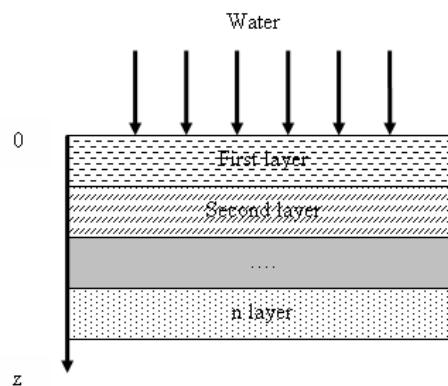


Fig.3 – Scheme of passage of moisture through the layers of material

To determine the total sorption need to know the function of the concentration change of moisture through the thickness of each material.

Differential equation of moisture passing through the material has the form [10].

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left\{ D(U, z) \frac{\partial U}{\partial z} \right\}, \quad (1)$$

where U - the concentration of moisture;

z - coordinate that goes from the top to the bottom surface of the material,

t - time;

D - diffusion coefficient.

As we know from many experimental studies [8-10], diffusion coefficient of liquid in porous body depends on its concentration. But to understand and simplify the process of finding solutions of (1) conventionally, in a first approximation, taking the

coefficient of diffusion constant value. Then the differential equation becomes:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D \frac{\partial^2 U}{\partial z^2}. \quad (2)$$

To solve the problem let's get to dimensionless coordinates:

- coordinate z varies from zero to one,
- concentration varies as a function of time unit on a surface in contact with moisture, to a certain current value to its opposite surface.

Imagine searched concentration in a series that is the product of two functions:

$$u = \sum_{i=1}^{\infty} V_i \cdot W_i, \quad (3)$$

where V_i - a function of concentration, depending only on time;

W_i - a function of concentration, depending only on coordinates,

i - the number of Fourier series.

Given boundary conditions, a single member of several functions W , which depends only on coordinates, represented as

$$W_i = C_i \left(1 - \sin \frac{\pi z (2i-1)}{2} \right), \quad (4)$$

where C_i - constant that appears at integration.

Approximate solution in this case has form

$$U = 1 - \sum_{i=0}^{\infty} \frac{4e^{-\frac{D\pi^2(2i-1)^2 t}{4}} \cdot \sin\left(\frac{\pi z (2i-1)}{2}\right)}{\pi(2i-1)}. \quad (5)$$

Let's give the diffusion coefficient of some arbitrary value and build some graphs that reflects the changes in the concentration of moisture in the material as a function of time

Specific concentration around the layer of material:

$$\bar{U}(t) = \int_0^1 U(z, t) dz. \quad (6)$$

After the integration process, we get:

$$U(t) = \left[z + \sum_{i=1}^{\infty} \frac{8e^{-\frac{D\pi^2(2i-1)^2 t}{4}} \cdot \cos\left(\frac{\pi z (2i-1)}{2}\right)}{\pi^2 \cdot (2i-1)^2} \right] \Big|_0^1. \quad (7)$$

Substituting the boundary, we get the equation of moisture absorption layer material:

$$U(t) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{8e^{-\frac{D\pi^2(2i-1)^2 t}{4}}}{\pi^2 \cdot (2i-1)^2} \quad (8)$$

and the equation of concentration change in thickness (absorption rate):

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} 2De^{-\frac{D\pi^2(2i-1)^2 t}{4}} \quad (9)$$

Calculated curve of moisture absorbing of material layer in time can be presented graphically dependence curve Fig. 4, and speed of absorption of moisture - in Fig. 5.

Comparison of calculated curves of the form (Fig. 4 and Fig. 5) and experimental [8-10] shows that the mathematical model with constant coefficient of diffusion is not the real data. But this assumption is made exclusively for us finding ways of solving equations of fluid motion, taking into account the nonlinearity of the process. Finding and solving an equation of the liquid in the general case when the diffusion coefficient depends on the amount of accumulated fluid will be shown below.

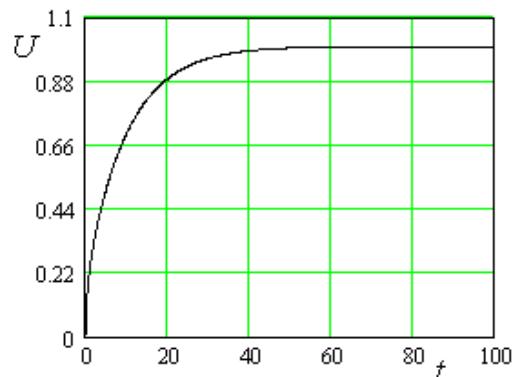


Fig.5 – The curve of material moisture absorbing for the model with constant diffusion coefficient

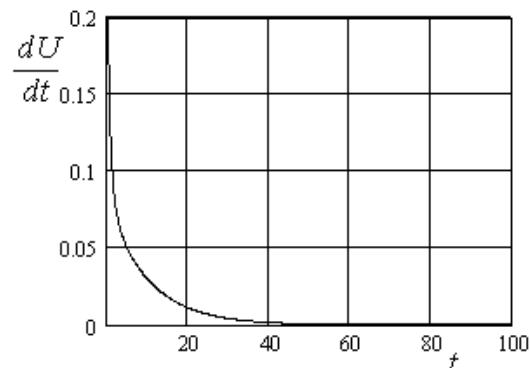


Fig.6 – Curve speed of material moisture absorption for the model with constant diffusion coefficient

Analysis of nonlinear model

Let's go back to the main form of transmission of moisture (1).

In a number of sources [2, 10] determined that the diffusion coefficient can be represented as:

$$D(U) = D_0(1 + \sigma U), \quad (10)$$

where U - the concentration of moisture at some point the material layer;

x - coordinate of a point at a time;

t - time;

D - diffusion coefficient;

D_0 - the initial diffusion coefficient;

σ - coefficient of nonlinearity.

In this case equation (8) rewritten as:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = \frac{\partial D}{\partial x} \cdot \frac{\partial U}{\partial x} + D \frac{\partial^2 U}{\partial x^2}. \quad (11)$$

We get the solution of equation in form

$$U(z, t) = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4 \cdot e^{-A(2i-1)t^B}}{\pi(2i-1)} \cdot \sin\left[\frac{(2i-1)\pi z}{2}\right]. \quad (12)$$

The unknown coefficients A and B are in explicit form in the equation (12), allowing them to operate freely. In particular, taking the specific meaning, you can find a function of concentration changes depending on the thickness and time (Fig. 7 and Fig. 8)

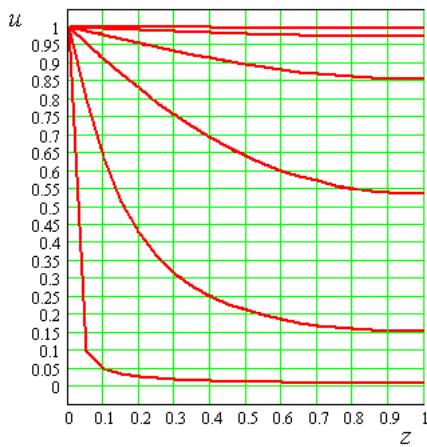


Fig. 7 – Changing the concentration of moisture in the layer thickness of material for different times ($t_1 < t_2 < \dots < t_6 < \dots \leq t_{max}$)

Change of concentration rate in thickness as a function of time, you can find during differentiation of expression (12) for concentration:

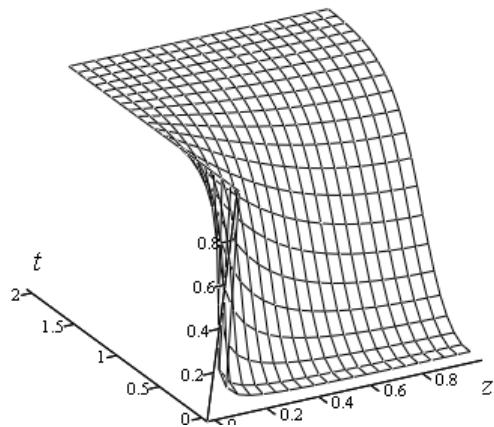


Fig. 8 – Dependence of concentration of moisture in the material coordinates and time

$$\frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{\pi} A \cdot B \cdot e^{B-1} \cdot e^{-A(2i-1)t^B} \cdot \sin\left[\frac{(2i-1)\pi z}{2}\right]. \quad (13)$$

For some material, characterized by specific values of coefficients A and B , depending on location and speed time is shown in Figure 2.

Since the coefficients obtained in explicit form, you can find the dependence of concentration and speed since the average thickness

$$U(t) = \int_0^1 U(z, t) dz = 1 - \sum_{i=1}^{\infty} \frac{8e^{-A(2i-1)t^B}}{\pi^2 \cdot (2i-1)^2}, \quad (14)$$

$$V(t) = \frac{dU}{dt} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{8ABt^{B-1}e^{-A(2i-1)t^B}}{\pi^2 \cdot (2i-1)}. \quad (15)$$

Charts that show the dependence of these randomly selected coefficients A and B are shown in Figure 8, Figure 9. Qualitatively they are close to experimental.

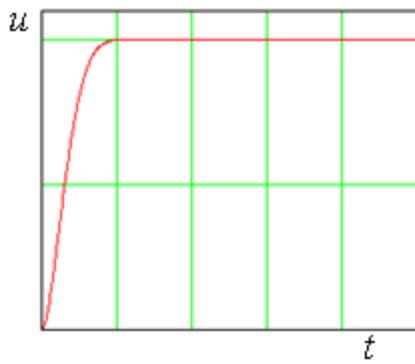


Fig. 9 – Change of moisture concentration for a single layer of material

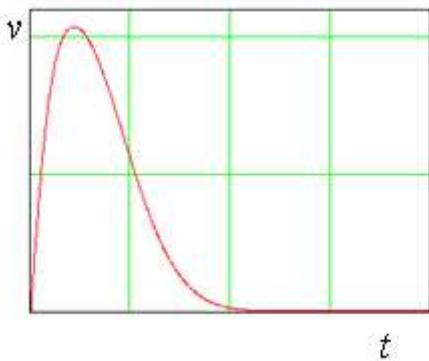


Fig. 10 – Speed change of water sorption for one layer of material

These nonlinear relationships are very close to the experimental data. This fact allows to recommend methodology of nonlinear expressions (14, 15) to describe the water absorption in material.

Conclusions

It is shown that the solution of linear equations of fluid passage does not match experimental data.

A non-linear equations of unsteady transfer of moisture perpendicular to the plane textile material is proposed, which takes into account the dependence of the diffusion coefficient of moisture content in the material at any given time at a given point. The equation contains two constants (A and B), which are the characteristics of the material and take into account the braking process water sorption during the accumulation of moisture.

References

1. *Handbook of Textiles*. Technomic: Publish Co, 1995. – 832 p.
2. **Aronjo M.** Developing fibrous material structured for technical applications [Текст] / **Aronjo M., Fangiero R., Geraldes M.J.** // *AUTEX Research Journal*. – vol. 5. – No 1. – March 2005. – P. 49–54.
3. **Celik A.** Photovoltaic application for textiles [Текст] / **Celik A., Demir A., Bozkart Y.** // *III Intern. Technical Textiles Congress*, 2007, Istanbul, 1-2 December 2007. – P. 291–299.
4. **Yilmaz H.** Some interesting examples about the solution of the geotechnical problems using geosynthetics [Текст] / **Yilmaz H.R., Eskisar T.** // *III Intern. Technical Textiles Congress*, 2007, Istanbul, 1-2 December 2007. – P. 418–425.
5. **Grabowska B.** Application of measurement of liquid sorption in the evaluation of textile fabrics finishing processes [Текст] / **Grabowska B.** // *Fibers and Textiles in Eastern Europe*. – 1997. – April/June. – P. 48–50.
6. **Li Y., Luo Z.X.** Physical Mechanisms of Moisture Diffusion into Hygroscopic Fabrics during Humidity Transients // *Journal of the Textile Institute*. – 2000. – Vol. 91, No 2. – p. 302–316.
7. **Das B.** Studies on moisture transmission properties of PV-blended fabrics [Текст] / **Das B., Das A., Kothari V.K., Fangueiro R., M de Araujo** // *Journal of the Textile Institute*. – 2009. – Vol. 100, No 7. – p. 588–597.
8. **Riabchikov N.** Linear mathematical model of water uptake perpendicular to fabric plane / **N. Riabchikov, V. Vlasenko, S. Arabuli** [Текст] / **Riabchikov N., Vlasenko V., Arabuli S.** // *Vlakna a textil*. - 2011. – №2 Rochik 18.- P. 24-29
9. **Suprun N.P.** Modeling of masstransfer processes in textiles [Текст] / **Suprun N.P.** // *Vlakna a textil*. – 2001. – №2. – P. 125.
10. **Yoneda M., Mizuno Y., Yoneda J.** Measurment of water absorption perpendicular to fabric plane in two- and multi-layered fabric systems // *Textile Res. J.* – 1993. – №29(12). p. 940–949.

Bibliography

1. *Handbook of Textiles*. Technomic: Publish Co, 1995. – 832P.
2. **Aronjo M., Fangiero R., Geraldes M.J.** Developing fibrous material structured for technical applications // *AUTEX Research Journal*. – vol. 5. – No 1. – March 2005. – P. 49–54.
3. **Celik A., Demir A., Bozkart Y.** Photovoltaic application for textiles // *III Intern. Technical Textiles Congress*, 2007, Istanbul, 1-2 December 2007. – P. 291–299.
4. **Yilmaz H.R., Eskisar T.** Some interesting examples about the solution of the geotechnical problems using geosynthetics // *III Intern. Technical Textiles Congress*, 2007, Istanbul, 1-2 December 2007. – P. 418–425.
5. **Grabowska B.** Application of measurement of liquid sorption in the evaluation of textile fabrics finishing processes // *Fibers and Textiles in Eastern Europe*. – 1997. – April/June. – P. 48–50.
6. **Li Y., Luo Z.X.** Physical Mechanisms of Moisture Diffusion into Hygroscopic Fabrics during Humidity Transients // *Journal of the Textile Institute*. – 2000. – Vol. 91, No 2. – p. 302–316.
7. **Das B., Das A., Kothari V.K., Fangueiro R., M de Araujo** Studies on moisture transmission properties of PV-blended fabrics // *Journal of the Textile Institute*. – 2009. – Vol. 100, No 7. – p. 588–597.
8. **Riabchikov N., Vlasenko V., Arabuli S.** Linear mathematical model of water uptake perpendicular to fabric plane // *Vlakna a textil*. - 2011. – №2 Rochik 18.- P. 24-29
9. **Suprun N.P.** Modeling of masstransfer processes in textiles // *Vlakna a textil*. – 2001. – №2. – P. 125.
10. **Yoneda M., Mizuno Y., Yoneda J.** Measurment of water absorption perpendicular to fabric plane in two- and multi-layered fabric systems // *Textile Res. J.* – 1993. – №29(12). p. 940–949.

Надійшла (received) 15.10.2015

УДК 621.317.332

УТОЧНЕНИЕ ЕКВИВАЛЕНТНОЇ ЕЛЕКТРИЧЕСКОЇ СХЕМЫ ОРГАНІЗМА ДЛЯ БІОІМПЕДАНСОМЕТРІИ ПРИ УЛЬТРАФІЛЬТРАЦІІ

Б. В. ТКАЧУК^{1,2*}, Р. С. ТОМАШЕВСКИЙ¹, Е. И. СОКОЛ¹, В. Н. ЛЕСОВОЙ²

¹ Кафедра Промышленной и биомедицинской электроники, ЛБМЭ, НТУ «ХПІ», Харьков, Украина

² Областной клинический центр урологии и нефрологии им. В. И. Шаповалы, Харьков, Украина

*e-mail: bog.tkachuk@gmail.com

АННОТАЦІЯ У даній статті описана проблематика застосування методу біоімпедансометрії в умовах процедури гемодіалізу. Запропоновано нову еквівалентну електричну схему організму для методу біоімпедансометрії, в якій враховані всі рідинні сектори, обсяги яких змінюються під час ультрафільтрації. Також, у даній схемі, виділені елементи відповідні обсягам видаленого в режимі «реального часу» ультрафільтрату, розподіленого в інтерстиціальному і судинному секторах. Проведено комп’ютерне моделювання та експериментальні дослідження, які показали адекватність розробленої еквівалентної схеми.

Ключові слова: ультрафільтрація, гемодіаліз, еквівалентна електрична схема, біоімпеданс, «суха вага», інтерстиціальний сектор, судинний сектор

АННОТАЦИЯ В данной статье описана проблематика применения метода биоимпедансометрии в условиях процедуры гемодиализа. Предложена новая эквивалентная электрическая схема организма для метода биоимпедансометрии, в которой учтены все жидкостные сектора, объемы которых изменяются в ходе ультрафильтрации. Также, в данной схеме, выделены элементы соответствующие объемам удаленного в режиме «реального времени» ультрафильтрата, распределенного в интерстициальном и сосудистом секторах. Проведено компьютерное моделирование и экспериментальные исследования, которые показали адекватность разработанной эквивалентной схемы.

Ключевые слова: ультрафильтрация, гемодиализ, эквивалентная электрическая схема, биоимпеданс, «сухой вес», интерстициальный сектор, сосудистый сектор

ELABORATION THE BODY EQUIVALENT ELECTRICAL CIRCUIT FOR BIOIMPEDANCEMETRY DURING ULTRAFILTRATION

B. TKACHUK^{1,2}, R. TOMASHEVSKY¹, Y. I. SOKOL¹, V. N. LESOVOY²

¹ Department of industry and biomedical electronics, LBME, NTU «KPI», Kharkiv, UKRAINE

² V. I. Shapoval's regional clinical center of urology and nephrology, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT This article presents the problems of the use of bioimpedance method (BIM) under hemodialysis. The classic theory of the liquid sectors in BIM is described. The necessity of the development of the equivalent electrical circuit (EEC) for controlling ultrafiltration during hemodialysis has been shown.

As a result, the new EEC for the body patient for bioimpedance method that has all the liquid sectors, whose volumes vary during the ultrafiltration is proposed. Also, in this scheme, the element corresponding to the volume deleted in "real time" excess fluid distributed in interstitial and vascular sectors has been entered. It is shown that the elements of an equivalent electrical circuit corresponding to the vascular and interstitial sectors are connected in parallel, and the constant and variable (removing liquid) part of these sectors - connected in series. The calculation of the electrical parameters of the new EEC and computer modeling of the parameters of the EEC has been done. Alignment the parameters of the developed scheme with basic EEC Hanai and De Lorenzo have been checked.

Experimental investigations bioimpedance patients during hemodialysis with ultrafiltration have been done. Farther, it showed the adequacy of the developed EEC.

Developed EEC can be used to calculate the corresponding sectors volume of liquid, for monitoring the patient's state of hydration of the body during ultrafiltration. Furthermore, this EEC can be used to development of criteria normohydration for monitoring of the hemodialysis end, when the so-called "dry weight".

Keywords: hemodialysis, ultrafiltration, bioimpedancemetry, "dry weight", equivalent electrical circuit (EEC), interstitial sector, vascular sector.

Введение

Одной из составляющих процедуры гемодиализа (ГД), в ряде случаев, является ультрафильтрация – аппаратное удаление излишков жидкости из организма пациента. Удаление производится инвазивно из сосудистого русла

(сосудистого сектора – (СС)), которое, в свою очередь, пополняется за счет интерстициального сектора (ИС), являющегося объемным буфером организма при перегрузках жидкостью [1].

Важной задачей при проведении ультрафильтрации является необходимость регулирования скорости удаления жидкости и

контроль объемов секторов, для предупреждения критического сгущения крови и возникновения «коллапса». В современной медицине объем жидкости и скорость ее удаления устанавливаются врачом, исходя из физикального обследования пациента до проведения процедуры [2].

В мировой практике для определения объемов жидкости организма широко используется метод биоимпедансометрии (БИМ) [3]. Он заключается в зондировании организма токами различной частоты и позволяющем определить объемы его внеклеточной жидкости (ВКЖ), общей воды организма (ОВО) и рассчитать объем клеточной жидкости (КЖ) [4]. Однако оценки данных объемов, при классическом методе БИМ, не достаточно для корректного и безопасного проведения процедуры ГД.

Применение метода БИМ в условиях проведения процедуры гемодиализа, позволит производить мониторинг в режиме «реального времени» объемов секторов относящаяся к ВКЖ.

Это требует разработки уточненной эквивалентной электрической схемы (ЭЭС) процессов гидратации организма, позволяющей по эквивалентным сопротивлениям соответствующих объемов производить расчет объемов СС и ИС, а также мониторинг их изменения в режиме «реального времени» для детектирования момента конца процедуры, при достижении так называемого «сухого веса».

Цель работы

Разработка эквивалентной электрической схемы, для метода биоимпедансометрии, описывающей процессы изменения объемов жидкости в организме пациента при ультрафильтрации.

Классическое представление распределения жидкости в организме при БИМ

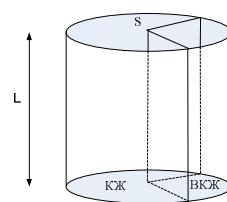
В классическом представлении состава тела для БИМ существует несколько физических моделей, среди которых, наиболее распространённой является модель однородного тела [5, 6].

Базовым элементом данной модели для оценки содержания жидкости в организме является цилиндр с площадью сечения S и высотой L и постоянным удельным сопротивлением ρ [7] (рис. 1, а).

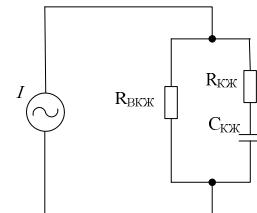
Объем цилиндра V , при этом рассчитывается как произведение поперечного сечения S на его высоту L .

$$V = SL. \quad (1)$$

Сопротивление цилиндрического тела определяется формулой (2), а его объем – (3).



а



б

Рис. 1 – Классическая модель организма при БИМ:
а – представление в виде цилиндра,
б – электрическая эквивалентная схема

$$R = \frac{\rho L}{S} = \frac{\rho L^2}{V}; \quad (2)$$

$$V = \frac{\rho L^2}{R}. \quad (3)$$

Общепринятая ЭЭС организма (рис 1, б) для БИМ имеет вид двух параллельно соединенных ветвей, одна из которых включает активное сопротивление внеклеточной жидкости, а другая последовательное соединение сопротивления клеточной жидкости и емкости клеточных мембран.

De Lorenzo (De Lorenzo, 1997) предложил выражения для расчета объемов ВКЖ и КЖ исходя из того, что части тела человека могут быть представлены в виде пяти цилиндров (рис.2) [9].

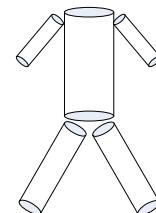


Рис. 2 – Представление тела человека в виде пяти цилиндров

При этом сопротивление ВКЖ можно рассчитать по выражению для одного цилиндра, но с учетом поправочного коэффициента K_b :

$$R_{BKJ} = K_b \rho \frac{H^2}{V_{BKJ}}. \quad (4)$$

где: R_{BKJ} – сопротивление организма при подключении запястье - голень; $K_b = 4.3$ – так называемый фактор формы, предложенный De Lorenzo; H – рост человека; ρ – удельное сопротивление жидкости в организме (для мужчин $\rho = 40.5$ Ом/см, для женщин $\rho = 39.0$ Ом/см).

В общем виде зависимость сопротивления от изменения объема ВКЖ будет представлять собой гиперболу (рис. 3). Рост при вычислении принят равным 1.7 м, $\rho = 39.0$ Ом/см. Объем ВКЖ изменяется от 5 до 13 л.

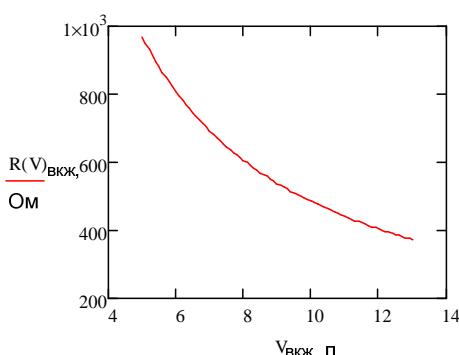


Рис. 3 – Залежність в общем виді сопротивлення от изменения объема ВКЖ

По предложенным Де Лорензо выражениям, работают десятки типов биоимпедансометров используемых в спорте, диатологии и медицине [10]. Они многократно верифицированы с использованием различных эталонных методов [11], а значит зависимость (рис. 3) можно принять за базовую при дальнейшем уточнении метода БИМ и ЭЭС организма.

Уточнение ЭЭС для разделения жидкостных секторов

При проведении ультрафильтрации в ходе процедуры ГД происходит удаление излишков из сосудистой и интерстициальной жидкости. Для применения БИМ в условиях ГД, необходимо рассматривать организм как три сектора ИС, СС и клеточный сектор (КС) [12]. Поэтому в разрабатываемой ЭЭС элемент соответствующий объему внеклеточной жидкости классической схемы (рис. 1, б) должен быть разделен на элементы соответствующие объемам этих секторов.

Необходимо определить, какой вид имеет ЭЭС при разделении сопротивления ВКЖ.

Существует два варианта соединения электрических эквивалентов СС и ИС при удалении жидкости в ходе ультрафильтрации, это последовательное (рис. 4) и параллельное (рис. 5).

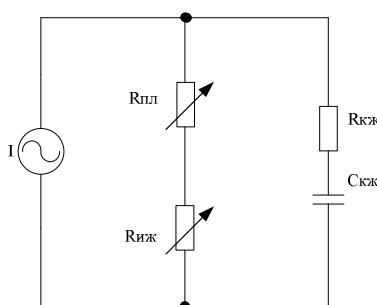


Рис. 4 – Вариант послідовального соединення електрических эквивалентов ИС и СС

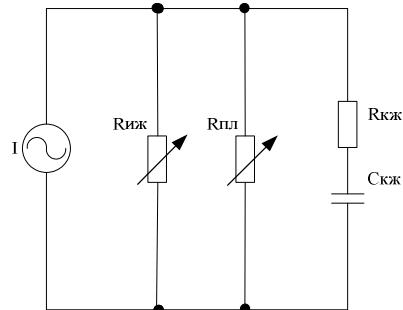


Рис. 5 – Вариант параллельного соединення електрических эквивалентов ИС и СС

Где $R_{i\text{жк}}$ – соответствует объему интерстициальной жидкости, $R_{n\text{l}}$ – объему сосудистой жидкости, $R_{k\text{жк}}$ – объем жидкости во всех клетках организма, $C_{k\text{жк}}$ – емкость мембран всех клеток организма.

Рассмотрим два варианта схем (рис. 4, 5) описывающих изменение эквивалентов объемов СС и ИС по аналогии с изменением объема жидкости на примере цилиндра (рис 6).

Изменение объема может проходить двумя путями: изменением высоты и изменением площади, рассмотрим эти случаи.

При первом случае происходит уменьшение высоты цилиндра с L до L_1 , при постоянной площади поперечного сечения S . При втором, высота цилиндра постоянная, уменьшается площадь поперечного сечения с S_1 до S_2 .

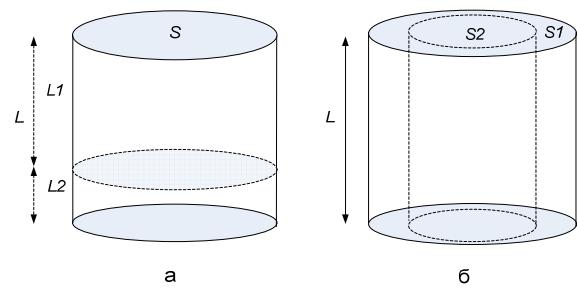


Рис. 6 – Визуалізація варіантів изменения объема циліндра при изменении объема жидкости

Используя выражение (2), промоделируем изменение электрического сопротивления цилиндра в зависимости от объема для двух случаев. Зададимся диапазоном изменения сопротивления R в физиологических пределах 200 – 1000 Ом, $\rho = 39.0$ Ом/см, значения L и S выберем произвольно.

Результаты моделирования в случае 1: зависимость $R(L)$ будет иметь вид рис. 7.

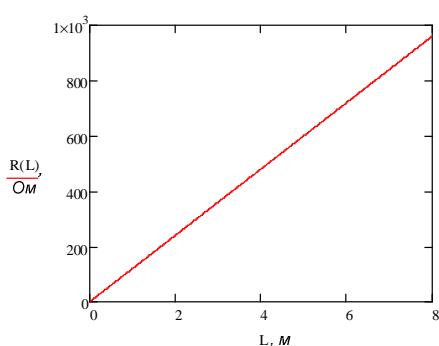


Рис. 7 – Зависимость сопротивления жидкости в цилиндре от изменения высоты

Результаты моделирования в случае 2: зависимость $R(S)$ будет иметь вид рис. 8.

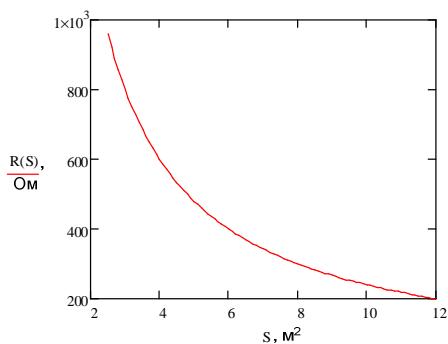


Рис. 8 – Зависимость сопротивления жидкости в цилиндре от изменения площади поперечного сечения

Результаты моделирования показали что:

- случай 2 соответствует выражению (4) см. рис. 3;
- случай 1 не соответствует.

Таким образом, можно утверждать, что все жидкие среды организма, могут быть представлены эквивалентным параллельным электрическим соединением рис. 4, б.

Моделирование процесса ультрафильтрации для уточнения ЭЭС

Одной из проблем проведения корректной ультрафильтрации в ходе ГД является необходимость нахождения критерия т.н. «сухого веса», при достижении которого необходимо остановить удаление жидкости [13].

Поэтому, в эквивалентной схеме должны быть учтены элементы соответствующие объему избыточной жидкости, а также должна быть реализована возможность отображать в режиме «реального времени» процесс ультрафильтрации.

Для выделения в эквивалентной схеме элементов, которые изменяются при удалении жидкости (R_1 , R_2), необходимо определить, вариант

соединения с эквивалентными элементами, объемы которых не изменяются.

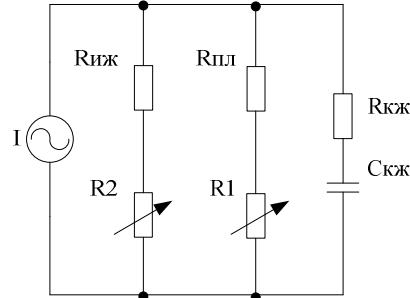


Рис. 9 – Последовательное электрическое соединение изменяющихся элементов эквивалентной схемы

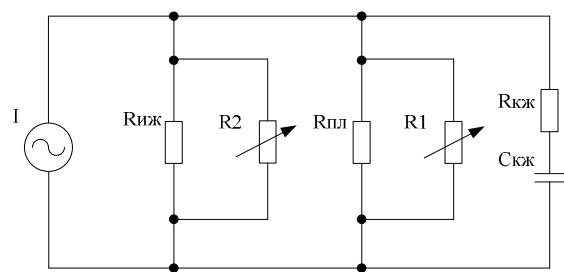


Рис. 10 – Параллельное электрическое соединение изменяющихся элементов эквивалентной схемы

Проведем моделирование случаев, когда весь объем накапленного ультрафильтрата сосредоточен в сосудистом или интерстициальном секторах, для вариантов последовательного и параллельного соединений $R_{\text{пл}}$ с R_1 и $R_{\text{иж}}$ с R_2 (рис. 9, 10).

Исходные данные моделирования: пол пациента: женский; рост Н = 1,7 м.; удельное сопротивление интерстициальной, сосудистой жидкости и ультрафильтрата – 39 Ом/см; сопротивление клеточной жидкости ($R_{\text{кж}}$) – 1300 Ом; «сухой вес» – 62 кг; объем сосудистой жидкости примем равным 5 % от «сухого веса»; объем интерстициальной жидкости – 15 % от «сухого веса»; объем УФ ($V_{\text{УФ}}$) – 1,6 л.; скорость УФ – 0,458 л/ч; время УФ – 3,5 ч. Сопротивления интерстициальной жидкости и плазмы перед ГД ($R_{\text{иж.пред}}$, $R_{\text{пл.пред}}$), а также после ГД ($R_{\text{иж.пост}}$, $R_{\text{пл.пост}}$) рассчитывались по выражению (4), а зависимость изменения сопротивления соответствующей жидкости (ΔR) от изменения объема УФ (ΔV) – по выражению (5).

$$\Delta R = \Delta V \frac{(R_{\text{соотв.пост}} - R_{\text{соотв.пред}})}{V_{\text{УФ}}} . \quad (5)$$

Случай 3. Предположим, весь ультрафильтрат накаплен в интерстициальном секторе для последовательного (6, 7) соединения, на низкой и высокой частотах. Где ΔR – изменение сопротивления

интерстициальний рідини, що відповідає зміні її об'єму під час ультрафільтрації.

$$R_{\text{нч}} = \frac{(R_{\text{иж}} + \Delta R)R_{\text{пл}}}{R_{\text{иж}} + \Delta R + R_{\text{пл}}} ; \quad (6)$$

$$R_{\text{вч}} = \frac{R_{\text{пл}}(R_{\text{иж}} + \Delta R)R_{\text{кж}}}{R_{\text{пл}}(R_{\text{иж}} + \Delta R) + R_{\text{кж}}(R_{\text{иж}} + \Delta R) + R_{\text{пл}}R_{\text{кж}}} . \quad (7)$$

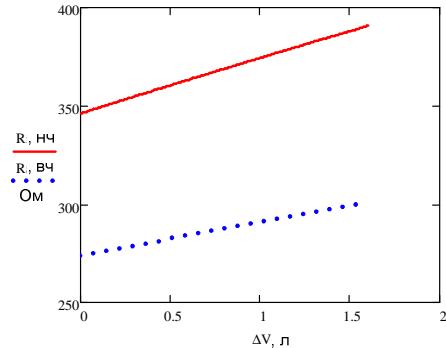


Рис. 11 – Результаты моделирования случая 3.

Случай 4. Предположим, весь ультрафільтрат накоплен в интерстициальном секторе для параллельного (8, 9) соединения, на низкой и высокой частотах. Где ΔR - изменение сопротивления интерстициальной жидкости соответствующее изменению ее объема при ультрафильтрации.

$$R_{\text{нч}} = \frac{R_{\text{иж}}R_{\text{пл}}\Delta R}{R_{\text{иж}}\Delta R + R_{\text{пл}}\Delta R + R_{\text{иж}}R_{\text{пл}}} ; \quad (8)$$

$$R_{\text{вч}} = \frac{R_{\text{пл}}R_{\text{иж}}R_{\text{кж}}\Delta R}{R_{\text{пл}}R_{\text{иж}}\Delta R + R_{\text{иж}}R_{\text{кж}}\Delta R + R_{\text{пл}}R_{\text{кж}}\Delta R + R_{\text{пл}}R_{\text{иж}}R_{\text{кж}}} . \quad (9)$$

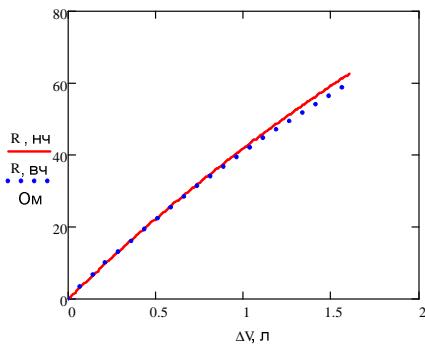


Рис. 12 – Результаты моделирования случая 4.

Случай 5. Предположим, весь ультрафільтрат накоплен в сосудистом секторе для послідовного (10, 11) соединения, на низкой и высокой частотах. Где ΔR - изменение сопротивления сосудистой жидкости соответствующее изменению ее объема при ультрафильтрации.

$$R_{\text{нч}} = \frac{R_{\text{иж}}(R_{\text{пл}} + \Delta R)}{R_{\text{иж}} + R_{\text{пл}} + \Delta R} ; \quad (10)$$

$$R_{\text{вч}} = \frac{(R_{\text{пл}} + \Delta R)R_{\text{кж}}R_{\text{иж}}}{(R_{\text{пл}} + \Delta R)R_{\text{кж}} + (R_{\text{пл}} + \Delta R)R_{\text{иж}} + R_{\text{кж}}R_{\text{иж}}} . \quad (11)$$

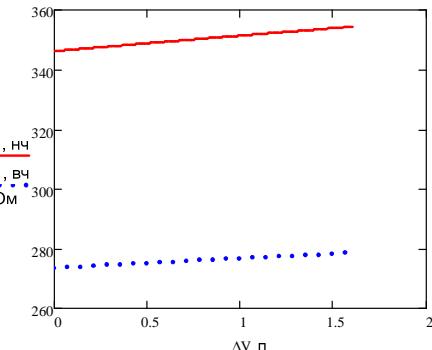


Рис. 13 – Результаты моделирования случая 5.

Случай 6. Предположим, весь ультрафільтрат накоплен в сосудистом секторе для параллельного (12, 13) соединения, на низкой и высокой частотах. Где ΔR - изменение сопротивления сосудистой жидкости соответствующее изменению ее объема при ультрафильтрации.

$$R_{\text{нч}} = \frac{R_{\text{иж}}R_{\text{пл}}\Delta R}{R_{\text{иж}}\Delta R + R_{\text{пл}}\Delta R + R_{\text{иж}}R_{\text{пл}}} ; \quad (12)$$

$$R_{\text{вч}} = \frac{R_{\text{пл}}R_{\text{иж}}R_{\text{кж}}\Delta R}{R_{\text{пл}}R_{\text{иж}}\Delta R + R_{\text{иж}}R_{\text{кж}}\Delta R + R_{\text{пл}}R_{\text{кж}}\Delta R + R_{\text{пл}}R_{\text{иж}}R_{\text{кж}}} . \quad (13)$$

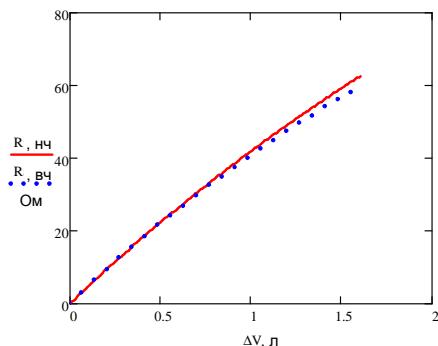


Рис. 14 – Результаты моделирования случая 6.

Результаты моделирования показали, что:

- случаи 3 и 5 не противоречат базовой зависимости (4) см. рис. 3.
- случаи 4 и 6 не соответствуют базовой зависимости (4), так как при $\Delta R = 0$, $R_{\text{вч}} = R_{\text{нч}} = 0$

Экспериментальное подтверждение разработанной модели

Для подтверждения разработанной эквивалентной схемы в Харьковском областном клиническом центре урологии и нефрологии им. В.И. Шаповалы были проведены экспериментальные исследования характеристик биоимпеданса в течение процедуры гемодиализа. В качестве биоимпедансометра, был выбран прибор TOP M-1 разработанный на кафедре ТОР НТУУ «КПИ» [14], в качестве «искусственной почки» аппарат Fresenius Medical Care 5008S.

Было проведено 5 экспериментальных исследований биоимпеданса во время процедур ГД с ультрафильтрацией одного пациента с параметрами: пол: женский; рост – 1.7 м.; «сухой вес» – 62 кг; средний объем УФ – 1,6 л.; средняя скорость ультрафильтрации – 0,458 л/ч; время УФ – 3,5 ч; средняя проводимость диализата 13,8 мСм/см.

В ходе исследования было измерено интегральное сопротивление тела пациента при зондировании токами низкой (20 кГц) и высокой частоты (500 кГц). Полученная диаграмма имеет вид (рис. 15).

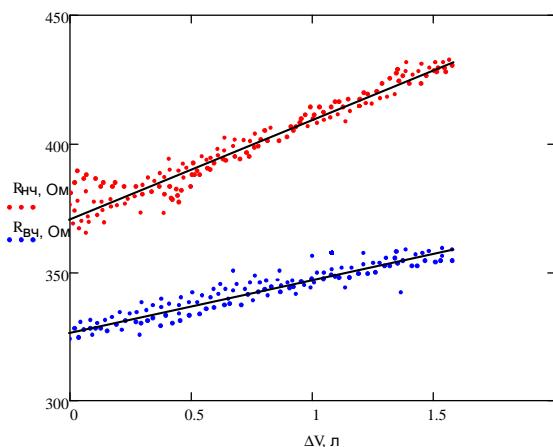


Рис. 15 – Полученные зависимости изменения импеданса на частотах 20 кГц и 500 кГц от объема удаленного ультрафильтрата в ходе процедуры ГД

$$Z = \frac{(R_{иж} + R2)(R_{пл} + R1)(1 + iwC_{кож}R_{кож})}{(1 + iwC_{кож}R_{кож})(R_{пл} + R1 + R_{иж} + R2) + (R_{иж} + R2)(R_{пл} + R1)} ; \quad (14)$$

Для частных случаев двухчастотной биоимпедансометрии, зависимости будут выглядеть следующим образом, на условно низкой частоте:

Способ подключения пациента: четырехпроводной, запястье – голень с применением контактного электродного геля. Измерение проводилось ежеминутно на всем протяжении процедуры ГД.

При сравнении полученной опытным путем диаграммы (рис. 15) с результатами моделирования видно, что случаи 3 и 5 соответствуют экспериментальным данным по характеру зависимости и интервалу значений сопротивлений.

Таким образом, схема для БИМ процессов гидратации в организме пациента на ГД будет иметь вид как на рис. 9. А в некоторых случаях, для возможности определения и мониторирования гемодинамических параметров при процедуре ультрафильтрации, ЭЭС можно представить в расширенном виде (рис. 16) выделив отдельно ветви, характеризующую форменные элементы крови (ФЭК). Где $R_{ФЭК}$ – соответствует объему жидкости в ФЭК, $R_{ок}$ – объему жидкости во всех остальных клетках (за исключением ФЭК), $C_{ФЭК}$ – емкость мембран клеток ФЭК, $C_{ок}$ – емкость мембран всех клеток организма (за исключением ФЭК).

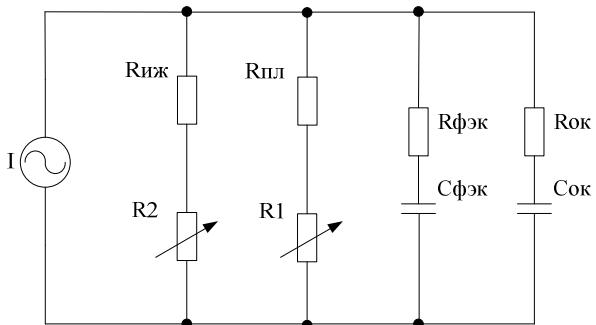


Рис. 16 – Расширенная эквивалентная электрическая схема для БИМ процессов гидратации организма при процедуре ГД.

Зависимость импеданса схемы от произвольно выбранной частоты зондирующего тока будет иметь вид:

$$R_{нч} = \frac{(R_{пл} + R1)(R_{иж} + R2)}{R_{пл} + R_{иж} + R1 + R2} ; \quad (15)$$

и на условно высокой:

$$R_{вЧ} = \frac{(R_{пл} + R1)(R_{иж} + R2)R_{кож}}{(R_{пл} + R1)R_{кож} + (R_{иж} + R2)R_{кож} + (R_{пл} + R1)(R_{иж} + R2)} . \quad (16)$$

ВЫВОДЫ

Разработана новая эквивалентная схема, учитывающая интерстициальный и сосудистый жидкостные сектора организма, объемы которых изменяются о время ГД. В схему введены переменные элементы, позволяющие производить мониторинг изменения объемов сосудистой и интерстициальной жидкостей в режиме «реального времени» при проведении ультрафильтрации. Получены выражения для расчета элементов эквивалентной схемы и проведено компьютерное моделирование. Также были проведены экспериментальные исследования в ходе процедуры ГД, которые подтвердили адекватность разработанной модели.

Данная ЭЭС может быть применена для расчета объемов жидкости соответствующих секторов, для контроля состояния гидратации организма пациента при ультрафильтрации, а также при разработке критерия нормогидратации, для мониторинга конца процедуры ГД при достижении т.н. «сухого веса».

Список литературы

- 1 Сокол, Е. И. Электрическая модель состояния гидратации пациента во время процедуры ультрафильтрации / Е. И. Сокол, М. В. Войнова, Б. В. Ткачук, Р. С. Томашевский // Вестник национального технического университета «ХПИ». – 2014. – №36. – 199 с. ISSN 2079.5459.
- 2 Daugirdas John T. Peter G. Blake, Todd S. Handbook of Dialysis. Ing. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, Fifth Edition. – 2014. – 900 p. (ISBN-13: 978-1451144291).
- 3 Mass Carrie Earthman Diana Traughber, Jennifer Dobrat Wanda Howell // Nutr Clin Pract. August. – 2007. – № 22 (4). – C. 389-405.
- 4 Kushner, R. F. Estimate of total body water by bioelectrical impedance analysis / R. F. Kushner, D. A. Schoeller // Am J Clin Nutr. – 1986. – № 44. – C. 417-424.
- 5 Jaffrin, M. Y. Body fluid volumes measurements by impedance: A review of bioimpedance spectroscopy (BIS) and bioimpedance analysis (BIA) methods // M. Y. Jaffrin, H. Morel // Med Eng Phys. – 2008 Dec. – № 30(10). – 1257-69.
- 6 Николаев, Д. В. Биоимпедансный анализ состава тела человека / Д. В. Николаев, А. В. Смирнов, И. Г. Бобринская, С. Г. Руднев //М. Наука. – 2009. – 392 с.
- 7 Gudivaka, R. Single - and multifrequency models for bioelectrical impedance analysis of body water compartments / R. Gudivaka, D. A. Schoeller, R. F. Kushner M. J. G. Bolt // J Appl Physiol. – 1999. – № 87. – C.1087-1096.
- 8 Hanai, T. Theory of the dielectric dispersion due to the interfacial polarization and its application to emulsions / T. Hanai // Kolloid-Zeitschrift. – 1960. – № 171. C. 23-31.
- 9 De Lorenzo, A. Predicting body cell mass with bioimpedance by using theoretical methods: a technological review / A. De Lorenzo, J. Andreoli, P. Matthie, Withers // J. Appl. Physiol. – 1997. – № 82. – C. 1542-1558.
- 10 Grimnes, S. Bioimpedance and electricity basics / S. Grimnes, Ø. G. Martinssen // Academic Press. – 2000.
- 11 Lukaski, H. C. Validation of the bioelectrical impedance method to assess human body composition / H. C. Lukaski, W. W. Bolonechuk, C. B. Hall, W. A. Siders. // J Appl Physiol. – 1987. – № 60. – C. 1327-1332.
- 12 Сокол, Е. И. Аппаратный контроль степени гидратации пациента при процедуре гемодиализа / Е. И. Сокол, Р. С. Томашевский, Б. В. Ткачук // Вестник южноукраинского национального университета им. В.И. Даля – 2012. – №18 (189). – С. 227 – 233. ISSN 198-7927
- 13 Katzarski1, K. Multifrequency bioimpedance in assessment of dry weight in haemodialysis / K. Katzarski1, B. Charra, G. Laurent, F. Lopot, J. C. Divino-Filho, J. Nisell, J. Bergstrom // Nephrol Dial Transplant. – 1996. – № 11(2). – C. 20-23.
- 14 Мосийчук, В. С. Широкополосный измеритель биоимпеданса с адаптивным выбором сетки частот / В. С. Мосийчук, Г. В. Тимошенко, О. Б. Шарпан // Вестник НТУУ «КПІ». Серия Радиотехника. Радиоаппаратостроение. – 2014.– № 57. – С. 143-148.

Bibliography (transliterated)

- 1 Sokol, Y. I., Voinova, M. V., Tkachuk, B. V., Tomashevskiy, R. S. Electrical model of the hydration state of the patient during the ultrafiltration Vestnik natsionalnogo tehnicheskogo universiteta «KhPI», 2014, **36**, 199 p. ISSN 2079.5459.
- 2 Daugirdas John T. Peter G. Blake, Todd S. Handbook of Dialysis. Ing. Philadelphia, PA: Lippincott Williams & Wilkins, Fifth Edition, 2014, – 2014. – 900 p. (ISBN-13: 978-1451144291).
- 3 Mass Carrie Earthman Diana Traughber, Jennifer Dobrat Wanda Howell Bioimpedance Spectroscopy for Clinical Assessment of Fluid Distribution and Body Cell. Nutr Clin Pract. August, 2007, **22**(4), 389-405.
- 4 Kushner, R. F., Schoeller, D. A. Estimate of total body water by bioelectrical impedance analysis. Am J Clin Nutr, 1986, **44**, 424 p.
- 5 Jaffrin, M. Y. Morel, H. Body fluid volumes measurements by impedance: A review of bioimpedance spectroscopy (BIS) and bioimpedance analysis (BIA) methods. Med Eng Phys, 2008, **30**(10), 1257-69.
- 6 Nikolaev, D. V., Smirnov, A. V., Bobrinskaya, I. G., Rudnev, S. G. Bioimpedance analysis of the composition of the human body. Moskow, Nauka, 2009, 392 p.
- 7 Gudivaka, R., Schoeller, D. A., Kushner, R. F., Bolt, M. J. G. Single - and multifrequency models for bioelectrical impedance analysis of body water compartments. J Appl Physiol, 1999, **87**, 1087-1096.
- 8 Hanai, T. Theory of the dielectric dispersion due to the interfacial polarization and its application to emulsions. Kolloid-Zeitschrift, 1960, **171**, 23-31.
- 9 De Lorenzo A., Andreoli, J., Matthie, P., Withers Predicting body cell mass with bioimpedance by using theoretical methods: a technological review. J. Appl. Physiol, 1997, **82**, 1542-1558.
- 10 Grimnes, S. Martinssen, Ø. G. Bioimpedance and electricity basics. Academic Press, 2000.
- 11 Lukaski, H. C., Bolonechuk, W. W., Hall, C. B., Siders, W. A. Validation of the bioelectrical impedance method to assess human body composition. J Appl Physiol, 1987, **60**, 1327-1332.
- 12 Sokol, Y. I. Tomashevskiy, R. S., Tkachuk, B. V. Hardware control the degree of hydration of the patient during hemodialysis. Vestnik yuzhnoukrainskogo natsionalnogo universiteta im. V. I. Dalja, 2012, **18**(189), 227 - 233.
- 13 Katzarski1, K. Charra, B., Laurent, G., Lopot, F., Divino-Filho, J. C., Nisell, J., Bergstrom, J. Multifrequency bioimpedance in assessment of dry weight in haemodialysis. Nephrol Dial Transplant, 1996, **11**(2), 20-23.
- 14 Mosiychuk, V. S., Timoshenko, G. V., Sharpan, O. B. Broadband bioimpedance meter with adaptive selection of the grid frequency. Vestnik NTUU «KPI», Seriya Radiotekhnika. Radioapparatostroenie, 2014, **57**, 143 - 148.

Поступила (received) 28.10.2015

УЗГОДЖЕННЯ ВИРОБНИЦТВА ТА СПОЖИВАННЯ ЕНЕРГІЇ У СКЛАДІ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ СИСТЕМИ

Є. Є. ЧАЙКОВСЬКА*, В. В. СТЕФАНЮК, І. В. АБРОСИМОВ

Кафедра теоретичної, загальної та нетрадиційної енергетики, Одеський національний політехнічний університет, Одеса,
УКРАЇНА

*email: eechaikovskaya@gmail.com

АНОТАЦІЯ Запропоновано системи контролю та ідентифікації стану теплообмінника системи охолодження двигуна у складі когенераційної системи на біогазовому паливі, що дозволяють узгоджувати виробництво та споживання енергії на основі прогнозування зміни температури місцевої води при вимірюванні температури зворотної води та температури теплоносія, що греє, на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника. Розряд – заряд біогазової установки, відвантаєння збродженого сусла та завантаження свіжого матеріалу з використанням теплового насоса, для якого низько-потенційним джерелом енергії є зброджене сусло, підтримують заряд – розряд когенераційної системи на основі прийняття рішень на зміну кількості пластин теплообмінника для забезпечення постійної витрати теплоносіїв

Ключові слова: когенераційна система, біогазове паливо, тепловий насос, прийняття рішень

АННОТАЦИЯ Предложены системы контроля и идентификации состояния теплообменника системы охлаждения двигателя в составе когенерационной системы на биогазовом топливе, позволяющие согласовывать производство и потребление энергии на основе прогнозирования изменения температуры местной воды при измерении температуры обратной воды и температуры греющего теплоносителя на входе в теплообменник и на выходе из теплообменника. Разряд–заряд биогазовой установки, отгрузка сброженного сусла и загрузка свежего материала с использованием теплового насоса, для которого низкопотенциальным источником энергии является сброшенное сусло, поддерживают заряд–разряд когенерационной системы на основе принятия решений на изменение количества пластин теплообменника для обеспечения постоянного расхода теплоносителей

Ключевые слова: когенерационная система, биогазовое топливо, тепловой насос, принятие решений

COORDINATION ENERGY PRODUCTION AND CONSUMPTION IN THE COMPOSITION OF THE COGENERATION SYSTEM

E. CHAIKOVSKAY*, V. STEFANUK, I. ABROSYMOV

Department of Theoretical, general and alternative energy, Odessa National Polytechnic University, Odessa, UKRAINE

ABSTRACT Existing methods of improving cogeneration technologies using biogas are not always able to reconcile production and use of biogas in day and night operation of biogas plants and not the constancy of electric power and heat. The aim is to develop a method for supporting the operation of cogeneration systems in biogas fuel on the coordination of energy production and consumption using heat pump for supporting the process of fermentation, the fermented mash shipping, loading fresh material for low-grade energy source which is fermented wort. A control system and identification of state exchanger engine cooling system, which are based on mathematical and logical modeling as a part of a cogeneration system in biogas fuels that allow you to coordinate the production and consumption of energy based prediction of temperature change of the local water during measuring-bath temperature of return water and temperature coolant, which warms the heat exchanger inlet and outlet of the heat exchanger. Category-charge biogas plant, shipping fermentation mash fresh material and loading with the use of heat pump Tanna-charge support-category cogeneration systems based decision-making to change the number plate heat exchanger for fixed costs fluids. Thus, in a cogeneration plant, such as type of GTK 35 M with 112 kW primary power using 352.5 m³ / day of biogas, biogas may obtain savings of 25.4 thousand. m³ / year, with increasing commercialization of biogas plant 13 94% allows you to reduce the cost of electricity and heat in the range of 20% - 30%. The annual energy savings in terms of fuel equivalent of 19.5 tons of standard fuel and cash equivalent additional energy produced - about 100 thousand UAH / Year.

Keywords: cogeneration system, biogas fuel, heat pump, making decisions

Вступ

Існуючі методи удосконалення когенераційних технологій з використанням біогазу, що мають у своєму складі основні складові: первинний двигун, електрогенератор, систему утилізації теплоти, систему контролю й управління не здатні в повній мірі узгоджувати виробництво та споживання біогазу

при цілодобовому функціонуванні біогазових установок та не постійності споживання електричної енергії та теплоти [1, 2 - 7]. Але умови когенерації при використанні біогазу ускладнені непостійним виходом біогазу, що вимагає додаткових ємностей газгольдерів, додаткових баків для збродженої сировини, витрат на підтримку процесу зброджування, що складають до 20-30% виробленої

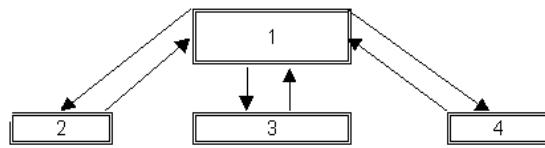
енергії, т. ін. Це відбувається тому, що підтримку процесу зброджування виконують з вимірюванням температури зброджування щодо зміни витрати свіжого сусла. Використання ж цієї оцінки ускладнено через значну теплову акумулюючу емність сусла. Зміна витрати сусла не підтримує необхідний баланс потоків свіжого та збродженого матеріалу для отримання постійного виходу біогазу, а використання зміни витрати теплоносія, що гріє, може порушити активність процесу зброджування. При безперервному функціонуванні біогазової установки в зв'язку із залежністю температури свіжого сусла, що завантажують, від температури навколошнього середовища складно визначити точний термін відвантаження збродженого сусла та завантаження еквівалентної витрати свіжого матеріалу, що виконують через 4-6 годин на добу. Більш того, складно запобігти зменшенню температурного впливу свіжого сусла на температуру збродження при завантаженні. Розроблено інтегровану систему підтримки функціонування біогазової установки, що надає можливість підтримувати розряд – заряд біогазової установки щодо виробництва біогазу та визначає точний термін відвантаження збродженого сусла та завантаження свіжого матеріалу. Використано тепловий насос, низькопотенційним джерелом енергії для якого є зброджене сусло [8 - 10].

Мета роботи

Метою роботи є розробка методу підтримки функціонування когенераційної системи на біогазовому паливі щодо узгодження виробництва та споживання енергії при використанні теплового насоса для підтримки процесу зброджування, відвантаженні збродженого сусла, завантаженні свіжого матеріалу, низькопотенційним джерелом енергії для якого є зброджене сусло. З цією ціллю розроблено системи контролю працездатності та ідентифікації стану когенераційної системи щодо прийняття рішень на зміну кількості пластин теплообмінника системи охолодження двигуна для підтримки температури місцевої води при збереженні постійними витрати теплоносіїв.

Узгодження виробництва та споживання енергії у складі когенераційної системи

На основі методологічного та математичного обґрунтування архітектури технологічних систем [8 - 10] запропонована архітектура когенераційної системи, основою якої є інтегрована динамічна підсистема – теплообмінник системи охолодження двигуна, біогазова установка, тепловий насос, що використовує зброджене сусло у якості низькопотенційного джерела енергії та блоки розряду, заряду, оцінки функціональної ефективності (рис. 1).



*Рис. 1 – Архітектура когенераційної системи:
1 - динамічна підсистема (теплообмінник системи охолодження двигуна, біогазова установка, тепловий насос); 2 – блок розряду; 3 – блок заряду; 4 – блок оцінки функціональної ефективності*

Математичне обґрунтування архітектури когенераційної системи [8 - 10]:

$$CS = \left[\begin{array}{l} D(P(\tau) \langle x_0(\tau), x_1(\tau), x_2(\tau), f(\tau), K(\tau), \rangle, \\ R(\tau), P(\tau)), \\ Z(\tau), (P_i(\tau) \langle x_1(\tau), f_i(\tau), K_i(\tau), y_i(\tau) \rangle), \end{array} \right]$$

де CS – когенераційна система; D – динамічна підсистема (теплообмінник системи охолодження двигуна, біогазова установка, тепловий насос); P – властивості елементів когенераційної системи; x – впливи; f – параметри, що діагностуються; K – коефіцієнти математичного опису; y – вихідні параметри; d – динамічні параметри; R, Z – логічні відносини в D , CS , відповідно; τ – час, с. Індекси: i – число елементів когенераційної системи; 0, 1, 2 – початковий стаціонарний режим, зовнішній, внутрішній характер впливів.

Так, наприклад, для біогазової установки, що виробляє $352,5 \text{ м}^3/\text{добу}$ біогазу у складі когенераційної системи типу GTK 35M потужністю 112 кВт, в тому числі з електричною потужністю 35 кВт та теплою потужністю 60 кВт встановлені наступні рівні функціонування пластинчастого теплообмінника контуру охолодження двигуна щодо зміни температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник та на виході з теплообмінника: перший рівень: $95^\circ\text{C} - 75^\circ\text{C}$; другий рівень: $90^\circ\text{C} - 70^\circ\text{C}$; третій рівень: $85^\circ\text{C} - 65^\circ\text{C}$ для підігріву місцевої води з 30°C до 55°C при підключені 14, 18 та 28 пластин відповідно. З використанням математичного моделювання динаміки пластинчастого теплообмінника визначені допуски на гранично припустиму працездатність когенераційної системи для встановлених рівнів функціонування з використанням передатної функції за каналом: «температура місцевої води – температура теплоносія, що гріє» щодо аналітичної оцінки зміни температури місцевої води для встановлених рівнів функціонування когенераційної системи [8 - 10] (рис.2).

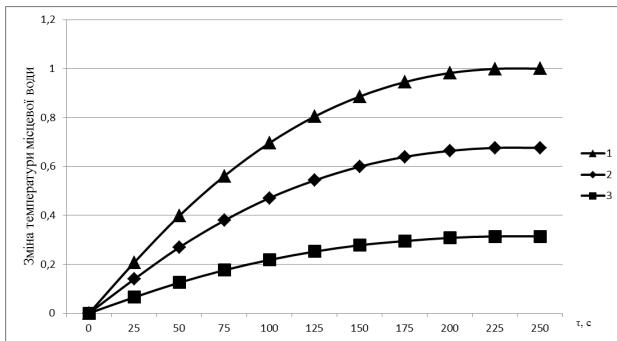


Рис. 2 – Допуски на гранично припустиму працездатність когенераційної системи
1, 2, 3 – перший, другий, третій рівні функціонування, відповідно

З використанням метода графа причинно-наслідкових зв'язків [8 - 10] отримано підсумкову інформацію щодо оцінки зміни температури місцевої води при розряді, наприклад, біогазової установки, що супроводжується зменшенням витрат електричної енергії на привід теплового насоса та відповідає заряду когенераційної системи, який підтверджений зменшенням температури теплоносія, що греє, на вході в теплообмінник системи охолодження двигуна та на виході з теплообмінника при збільшенні температури зворотної води:

$$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau)/\Delta t_{ст.розв.верх.}(\tau) < \Delta t_{ст.розв.рівн}(\tau)/\Delta t_{ст.розв.верх}(\tau) > 0)),$$

де CT – контроль подій; t – температура місцевої води, $^{\circ}\text{C}$; τ – час, с. Індекси: c – контроль працездатності; розр. рів. – розрахункове значення температури місцевої води рівня функціонування; ст., розр., верх. – стало, розрахункове значення температури місцевої води першого рівня функціонування.

Так, при зміні температури теплоносія, що греє, в системі охолодження двигуна, наприклад, в межах $89^{\circ}\text{C} - 79^{\circ}\text{C}$ та збільшенні температури зворотної води до 35°C , що характеризує зменшення витрат електричної енергії на привід теплового насоса необхідно прийняти рішення на заряд когенераційної системи щодо збільшення кількості пластин теплообмінника з 14 до 18 та перевірити правильність прийняття рішення в нових умовах функціонування щодо підтримки температури місцевої води на рівні 55°C для подальшого використання в системі виробництва теплоти (рис.3). Встановлення нового режиму функціонування когенераційної системи свідчить про зменшення витрат електричної енергії на привід теплового насоса щодо підтримки процесу зброджування [8–10].

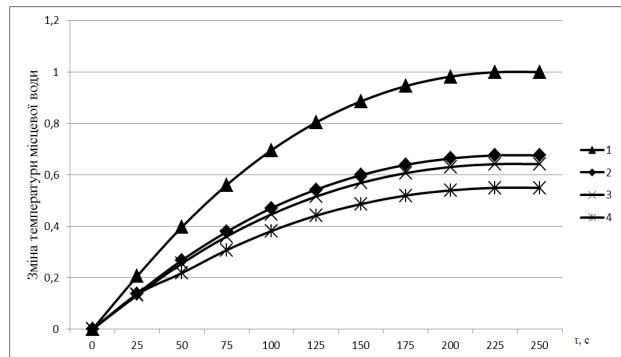


Рис. 3 – Контроль працездатності та ідентифікація стану когенераційної системи щодо переходу з першого рівня функціонування на другий;
1, 2 – допуски першого та другого рівнів функціонування, відповідно; 3, 4 – прийняття рішення та ідентифікація нових умов функціонування щодо зміни кількості пластин з 14 до 18

Так, при подальшому зменшенні температури теплоносія, що греє, в системі охолодження двигуна, наприклад, в межах $82^{\circ}\text{C} - 72^{\circ}\text{C}$ та збільшенні температури зворотної води до 38°C , що характеризує подальше зменшення витрат електричної енергії на привід теплового насоса при розряді біогазової установки необхідно виконати подальший заряд когенераційної системи щодо збільшення кількості пластин теплообмінника з 18 до 28 та перевірити правильність прийняття рішення в нових умовах функціонування щодо підтримки температури місцевої води на рівні 55°C для подальшого використання в системі виробництва теплоти (рис. 4).

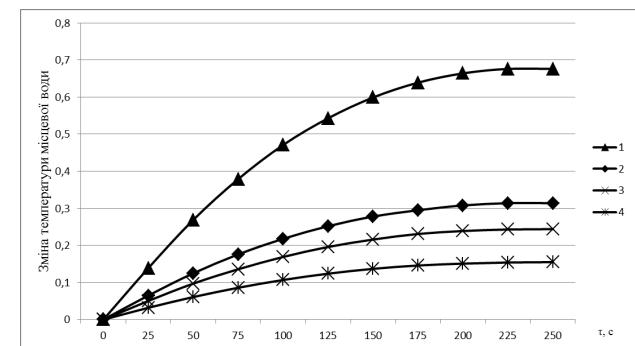


Рис. 4 – Контроль працездатності та ідентифікація стану когенераційної системи щодо переходу з другого рівня функціонування на третій;
1, 2 – допуски другого та третього рівнів функціонування, відповідно; 3, 4 – прийняття рішення та ідентифікація нових умов функціонування щодо зміни кількості пластин з 18 до 28

Здобута ж підсумкова інформація щодо оцінки зміни температури місцевої води:

$(CT_c(\tau)(\Delta t(\tau) / \Delta t_{\text{ст. разр. верх.}}(\tau) \leq 0))$

прогнозує неприпустиму зміну температури місцевої води, якщо температура теплоносія, що гріє, в системі охолодження двигуна знаходитьться в межах, наприклад, $77^{\circ}\text{C} - 57^{\circ}\text{C}$ та температура зворотної води збільшується до 41°C . Такі умови потребують прийняття рішення на входження в допуск першого рівня функціонування когенераційної системи, що відповідає підключенню 14 пластин теплообмінника та підтримує завантаження свіжого матеріалу в умовах функціонування біогазової установки [8–10], (рис. 5).

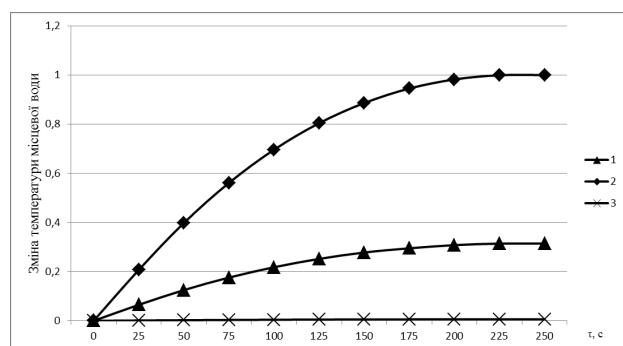


Рис. 5 – Контроль працездатності та ідентифікація стану когенераційної системи щодо переходу з третього рівня функціонування на перший; 1, 2– допуски третього та першого рівнів функціонування, відповідно; 3 – прийняття рішення на зміну кількості пластин з 28 до 14

Для підтримки функціонування когенераційної системи можливо рекомендувати розбірний пластинчастий теплообмінник типу Альфа Лаваль Т2 щодо можливості приймати рішення на зміну кількості пластин для підтримки функціонування когенераційної системи на біогазовому паливі при необхідності збереження постійними витрати теплоносіїв.

Обговорення результатів

В результаті проведених досліджень розроблено системи контролю та ідентифікації стану когенераційної системи щодо аналітичної оцінки зміни температури місцевої води при вимірюванні температури теплоносія, що гріє, на вході в теплообмінник системи охолодження двигуна та на виході з теплообмінника, та температури зворотної води. На основі математичного моделювання динаміки пластиначастого теплообмінника встановлені допуски на граничну зміну температури місцевої води при розряді – заряді біогазової установки, що використовує тепловий насос, низькопотенційним джерелом енергії для якого є зброжене сусло. При

роряді – заряді біогазової установки, що супроводжується зміною витрат електричної енергії на привід теплового насоса, відвантаженні збродженого сусла та завантаженні свіжого матеріалу змінюється температура теплоносія, що гріє, в системі охолодження двигуна когенераційної системи та температура зворотної води, що надає можливість приймати упереджені рішення на зміну кількості пластин теплообмінника щодо забезпечення постійними витрати теплоносіїв та температури місцевої води в заданих межах.

Висновки

1. Когенераційні технології з використанням біогазу потребують розробки методу підтримки функціонування когенераційної установки щодо узгодження виробництва та споживання енергії в умовах енергозбереження.
 2. Запропоновано архітектуру когенераційної системи, що має основу - динамічну підсистему у якості теплообмінника системи охолодження двигуна, біогазової установки та теплового насоса, що використовує зброжене сусло у якості низькопотенційного джерела енергії.
 3. Виконано математичне моделювання динаміки теплообмінника системи охолодження двигуна для визначення гранично припустимої зміни температури місцевої води в умовах підтримки функціонування біогазової установки.
 4. Розроблені системи контролю працездатності та ідентифікації стану теплообмінника системи охолодження двигуна щодо узгодження виробництва та споживання біогазу.

5. Так, при використанні запропонованого методу узгодження виробництва та споживання енергії в умовах когенераційної установки, наприклад, типу GTK 35 M з первинною потужністю 112 кВт, що використовує $352,5 \text{ м}^3/\text{добу}$ біогазу, можливо здобути економію біогазу $25,4 \text{ тис. м}^3/\text{рік}$, що при підвищенні товарності біогазової установки на 13,94 % надає можливість знижити собівартість виробництва електроенергії та теплоти в межах 20% – 30 %. Річна економія енергії в одиницях умовного палива складає 19,5 т. у. п., а грошовий еквівалент додатково виробленої енергії – близько 100 тис. грн./рік.

Список літератури

- 1 **Билека, Б. Д.** Когенерационно - теплонасосные технологии в схемах горячего водоснабжения большой мощности / **Б. Д. Билека, Л. К. Гаркуша** // *Промышленная теплоэнергетика*. – 2012. – Т. 34, № 4. – С. 52-57.
 - 2 **Rade, M. Cirić.** Techno-Economic Analysis of Biogas Powered Cogeneration / **Cirić, M. Rade, Kuzmanović Zoran** // *Journal of Automation and Control Engineering*. – 2014. – Vol. 2, Issue 1. – P. 89-93. – DOI: 10.12720/joace.2.1.89-93.

- 3 Daingade, P. S. Electronically operated fuel supply system to control air fuel ratio of biogas engine / P. S. Daingade, S. P. Yadav // 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability. – 2013. – P. 40-74. – DOI: 10.1109/ICEETS.2013.6533476
- 4 Talukder Niloy Technical and economic assessment of biogas based electricity generation plant / Niloy Talukder, Anik Talukder, Debangshu Barua, Anindya // 2013 International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT). – 2014. – P. 1-5. DOI: 10.1109/EICT.2014.6777854.
- 5 Doseva, N. Advanced exergatic analysis of cogeneration system with a biogas engine / N. Doseva // 14th SGEM GeoConference on Energy and Clean Technologies Conference Proceedings, June 19-25. – 2014. – Vol. 1. – P. 11 - 18. DOI: 10.5593/SGEM2014/B41/S17.002.
- 6 Moedinger, F., Innovate biogas Multi-Stage Biogas Plant and Novel Analytical System / F. Moedinger, F. Ast. M. Ragazzi, P. Foladori, E. C. Rada, R. Binnig // Energy Procedia. – 2012. – Vol. 18. – P. 672 - 680. DOI: 10.5593/SGEM2014/B41/S17.002.
- 7 Chen Jiao Development of Multi-model for Cogeneration System Using Statistical Analysis / Jiao Chen, Tianhong Pan, Yanqin Han // Journal Article. – 2014. – Vol. 9. – P. 2580-2586. DOI: 10.4304/jcp.9.11.2580-2586.
- 8 Чайковская, Е. Е. Оптимизация энергетических систем на уровне принятия решений / Е. Е. Чайковская // Промышленная теплотехника. – 2013. – Т. 35, № 7. – С. 169-173.
- 9 Чайковська, Є. Є. Розробка методу підтримки функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи / Є. Є. Чайковська, Б. І. Молодковець // Технологический аудит и резервы производства. – 2015. – № 1/1(21). – С. 41-46. – DOI: 10.15587/2312-8372.2015.37190.
- 10 Чайковська, Є. Є. Розробка енергозберігаючої технології функціонування біогазової установки у складі когенераційної системи / Є. Є. Чайковська // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 3/8 (75). – С. 47-53. – DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44252.
- 1 Daingade, P. S. Electronically operated fuel supply system to control air fuel ratio of biogas engine / P. S. Daingade, S. P. Yadav // 2013 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability. – 2013. – P. 40-74. – DOI: 10.1109/ICEETS.2013.6533476
- 2 Rade, M., Ceric, Kuzmanovic Zoran. Techno-Economic Analysis of Biogas Powered Cogeneration. Journal of Automation and Control Engineering, 2014, 2(1), 89-93, DOI: 10.12720/joace.2.1.89-93.
- 3 Daingade, P. S., Yadav S. P. Electronically operated fuel supply system to control air fuel ratio of biogas engine, International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability, 2013, 40-74, DOI: 10.1109/ICEETS.2013.6533476
- 4 Talukder Niloy, Anik Talukder, Debangshu Barua, Anindya Technical and economic assessment of biogas based electricity generation plant. International Conference on Electrical Information and Communication Technology (EICT), 2014, 1-5, DOI: 10.1109/EICT.2014.6777854.
- 5 Doseva, N. Advanced exergatic analysis of cogeneration system with a biogas engine. 14th SGEM GeoConference on Energy and Clean Technologies Conference Proceedings, 2014, 1, 11 - 18, DOI: 10.5593/SGEM2014/B41/S17.002.
- 6 Moedinger, F., Ragazzi, F. Ast. M., Foladori, P. Rada, E. C., Binnig, R. Innovate biogas Multi-Stage Biogas Plant and Novel Analytical System. Energy Procedia. 2012, 18, 672 - 680. DOI: 10.5593/SGEM2014/B41/S17.002.
- 7 Jiao Chen, Tianhong Pan, Yanqin Han Development of Multi-model for Cogeneration System Using Statistical Analysis. Journal Article, 2014, 9, 2580-2586. DOI: 10.4304/jcp.9.11.2580-2586.
- 8 Chaikovskaya, E. E. Optimization of energy systems at the level of decision-making. Promishliennay tieplotiehnica, 2013, 35(7), 169-173.
- 9 Chaikovskaya, E. E., Molodkovets, B. I. Development of the method of operation of a biogas plant support as part of the cogeneration system. Tehnologicheski audit i rezervi proizvodstva, 2015, 1/1(21), 41-46. – DOI: 10.15587/2312-8372.2015.37190.
- 10 Chaikovskaya, E. E. Development of energy-operation of biogas plant as part of a cogeneration system. Vostochno-Evropieski gurnal pieriedovih tiehnologi, 2015, 3/8(75), 47-53. – DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44252.

Bibliography (transliterated)

- 1 Bileka, B. D., Harkusha, L. K. Cogeneration heat pump technology in hot water circuits of high power. Promishlien-

Наадійшила (received) 15.10.2015

УДК 677.017.636

ДИФУЗІЙНІ ВЛАСТИВОСТІ ДВОШАРОВИХ МАТЕРІАЛІВ

Г. В. ЩУЦЬКА

Державний вищий навчальний заклад “Київський коледж легкої промисловості”, Київ, УКРАЇНА
 email: polischuka@mail.ru

АННОТАЦІЯ Одержанна явна залежність, що визначає час досягнення рідиною сухої поверхні двошарового матеріалу, виходячи з властивостей окремих матеріалів. В якості основних параметрів входних матеріалів рекомендовані емпіричні величини, що визначаються з елементарних експериментів для окремих матеріалів. Кожний матеріал характеризується двома величинами – часом насычення рідиною матеріалу і часом, що відповідає максимуму швидкості поглинання рідини. Одержанна залежність може використовуватися як для прогнозування властивостей двошарових матеріалів, так і для підбору характеристик окремих матеріалів для створення матеріалу з заданими властивостями.

Ключові слова: пористі матеріали, проникнення вологи, поглинання рідини, постійні часу

АННОТАЦИЯ Получена явная зависимость, которая определяет время достижения жидкостью сухой поверхности двухслойного материала, исходя из свойств отдельных материалов. В качестве основных параметров входных материалов рекомендованы эмпирические величины, определяемые из элементарных экспериментов для отдельных материалов. Каждый материал характеризуется двумя величинами - временем насыщения жидкостью материала и временем, которое соответствует максимуму скорости поглощения жидкости. Полученная зависимость может использоваться как для прогнозирования свойств двухслойных материалов, так и для подбора характеристик отдельных материалов для создания материала с заданными свойствами.

Ключевые слова: пористые материалы, проникновение влаги, поглощение жидкости, постоянные времена

DIFFUSION PROPERTIES DOUBLE-LAYER MATERIALS

SHCHUTSKA GANNA

Higher state educational establishment “Kyiv college of light industry”, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT In recent times use of multilayer composite materials have found widespread, the use of which in many cases leads to qualitatively new properties. The task of creating such materials requires the creation of theoretical models, as experimentally test all the possible composition of materials is difficult. the differential equation for the depth of the passage of fluid were compiled and solved. A typical moment for bilayer materials is achieving the internal liquid surface. If we analyse the number of dependencies depths in the second fluid passage, we can conclude the proximity to the linear dependence of achieving dry layer on two parameters (time parameter of the second material and mutual option second time and the first material). Dependences on time parameter of first material having a form of a curve with a maximum, which is typical square parabola. To find the coefficients of the method of least squares were obtained. As a result of research obtained a clear dependence that defines achieving a dry surface two-layer liquid material from the properties of certain materials is obtained. The main parameters of input materials recommended empirical values determined from experiments for elementary individual items. Each material is characterized by two values – time of saturation liquid in material and time which corresponds to maximum speed fluid absorption. The resulting dependence can be used to predict properties of bilayer materials and for the selection characteristics of individual materials to create materials with desired properties.

Keywords: porous materials, moisture penetration, fluid absorption, the time constants

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

Пористі матеріали широко використовуються в різних галузях техніки. Одним з основних їх властивостей є здатність поглинання рідини, що у відповідності до призначення матеріалу може бути корисним або шкідливим. На даний час накопичено певний досвід у визначенні подібних матеріалів до водопоглинання. Результати досліджень мають здебільш емпіричний характер, що задовольняє

проблеми визначення властивостей одношарових матеріалів.

В останні часи знайшли широке використання багатошарові композиційні матеріали, використання яких у багатьох випадках веде до появи якісно нових властивостей. Задача створення подібних матеріалів потребує створення теоретичної моделі, оскільки експериментально перевірити всі можливі композиції матеріалів досить важко.

Знаходження явної залежності параметрів двошарових матеріалів дозволить передбачувати їх властивості, а також створювати матеріали з заданими властивостями.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми, виділення невирішених раніше частин загальної проблеми

Питаннями створення і використання композиційних пористих матеріалів займалися ряд дослідників [1-3]. Розробка подібних матеріалів поки що ведеться, виходячи з досвіду і емпіричних уявлень.

Теоретичні основи проходження рідини крізь пористі матеріали визначені в [4-5]. Зокрема, в [6-7] побудована спрощена модель проникнення вологи крізь пористі матеріали на елементарному рівні. На основі регресійного аналізу знайдені базові показники, що характеризують динаміку проходження рідини крізь пористі матеріали. Отримана залежність включає явні експериментальні дані, що можуть бути одержані в макроекспериментах і передбачає знаходження концентрації рідини в будь-якій точці матеріалу. Данна модель дозволяє прогнозувати стан пористого матеріалу при його змочуванні, визначати час проходження рідини крізь матеріал і час повного накопичення рідини. Одержані дані дозволяють прогнозувати проходження рідини крізь багатошарові матеріали. З даних робіт важко зробити висновок про поведінку композицій з двох або декількох матеріалів у випадку їх поєднання.

В [8] обґрунтовані основні експериментальні дані, необхідні для побудови математичної моделі проходження рідини крізь пористі матеріали.

В [9-10] Зроблена спроба моделювання проходження рідини крізь декілька шарів. Слід візнати, що подібна модель дуже складна, вимагає додаткових теоретико-експериментальних досліджень кожного матеріалу і не може напряму використовуватись в напрямку створення матеріалів з заданими властивостями.

Мета роботи – розробка математичної моделі проходження рідини крізь двошарові композиції, що дозволяє прогнозувати властивості композиційних матеріалів, виходячи з властивостей окремих матеріалів.

Аналіз експериментальних даних, побудови диференційних залежностей

Експериментальні дані щодо накопичення вологи в пористому матеріалі дають характерні залежності концентрації u від часу t (рис.1).

З даних залежностей легко знаходиться характерні параметри – час, що відповідає максимуму на кривій похідних, t_0 , а також час, при якому настає насичення t_m .

Дані експерименти можуть бути проведенні для будь-якого одношарового матеріалу.

Якщо мова йде про двошарові композиції, бажано було б мати методику їх проектування, для створення якої необхідно розробити алгоритм

визначення характерних параметрів проходження рідини на основі даних окремих матеріалів.

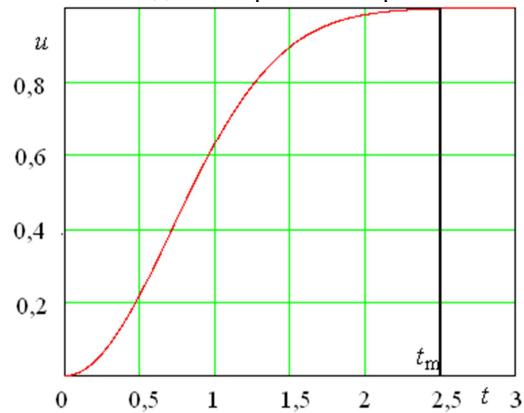


Рис.1 – Залежність накопичення рідини в пористому матеріалі

Залежність для похідної цієї функції має ще більш характерний вигляд (рис.2)

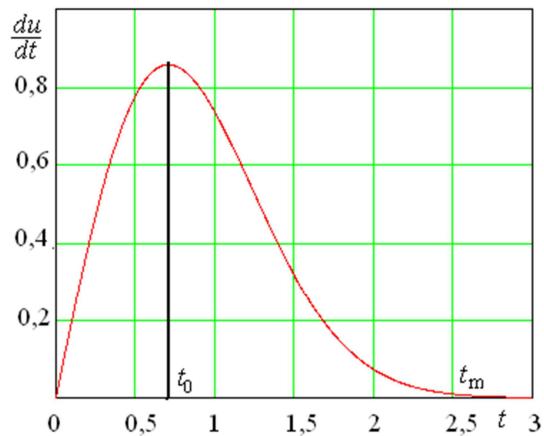


Рис. 2 – Швидкість накопичення рідини в пористому матеріалі

Як показано в [6] концентрація рідини в пористому матеріалі може бути записана у вигляді

$$u = 1 - \exp\left(-\frac{\beta-1}{\beta} \tau^\beta\right),$$

де $\beta = 1 + 5,053 \cdot \left(\frac{t_0}{t_m}\right)^{-1,45}$.

Означимо $\tau_1 = \left(\frac{t_{01}}{t_{m1}}\right)$ – відношення для першого матеріалу, $\tau_2 = \left(\frac{t_{02}}{t_{m2}}\right)$ – відношення для другого матеріалу, $\tau_{12} = \left(\frac{t_{m2}}{t_{m1}}\right)$ – відношення максимумів

першого і другого матеріалів, $\tau_k = \left(\frac{t_{12}}{t_{m1}} \right)$ - відношення часу появи вологи на поверхні другого матеріалу до максимуму первого матеріалу, $\tau = \left(\frac{t}{t_{m1}} \right)$ - безрозмірний час

Схема розподілу рідини в момент часу, що відповідає досягненню рідиною внутрішньої поверхні другого матеріалу зображена на рис.3

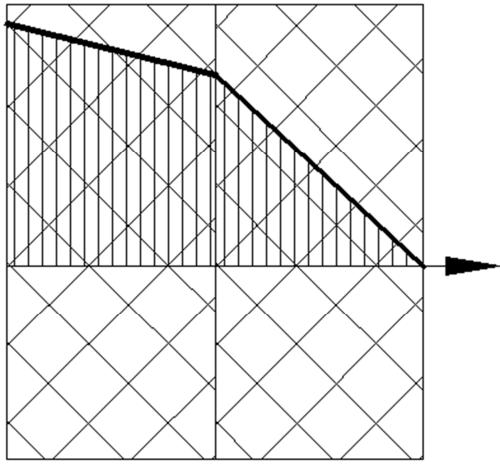


Рис.3 – Розподілення концентрацій в двошаровому матеріалі

У випадку постійної вхідної концентрації середня концентрація в другому матеріалі визначається, як

$$u_2 = u_{12} \left(1 - e^{-\alpha_2 \left(\frac{t}{t_m} \right)^{\beta_2}} \right).$$

З іншого боку при розповсюджені всередині другого матеріалу рідина розповсюджується на глибину z , а концентрація при відомій глибині може бути визначена, як

$$u = \frac{1}{2} u_1 \cdot \frac{z}{h}.$$

Будемо виходити з припущення, що у випадку змінної вхідної концентрації закономірності усередині шару матеріалу залишаються справедливими, якщо їх записати у прирошеннях. Тобто у випадку безкінцево малого прирошення вхідної концентрації концентрація визначається, як

$$du_2 = d \left(\frac{1}{2} u_{12} \cdot \frac{z}{h} \right) = \frac{1}{2h} (z \cdot du_{12} + u_{12} \cdot dz).$$

При цьому початкова концентрація визначається виразом, записаним вище, її похідна дорівнює

$$g1(t) = \frac{du_{12}}{dt} = 2 \cdot \frac{\alpha_1 \cdot \beta_1}{t_{m1}} \cdot \left(\frac{t}{t_{m1}} \right)^{\beta_1-1} \exp \left(-\alpha_1 \cdot \left(\frac{t}{t_{m1}} \right)^{\beta_1} \right).$$

Відповідно похідна концентрації для другого шару

$$g2(t) = \frac{du_2}{dt} = \frac{\alpha_2 \cdot \beta_2}{t_{m2}} \cdot \left(\frac{t}{t_{m2}} \right)^{\beta_2-1} \exp \left(-\alpha_2 \cdot \left(\frac{t}{t_{m2}} \right)^{\beta_2} \right).$$

Тоді вираз у прирошеннях може бути записаний, як

$$\frac{dz}{dt} u_{12}(t) + z \cdot g1(t) = 2 \cdot h \cdot g2(t).$$

Означимо надалі

$$\zeta = \frac{z}{h}, P(t) = \frac{g1(t)}{u_{12}(t)}, Q(t) = \frac{2 \cdot g2(t)}{u_{12}(t)}.$$

Одержано диференціальне рівняння для визначення глибини поглинання рідини у другий шар матеріалу

$$\frac{d\zeta}{dt} + \zeta \cdot P(t) = Q(t).$$

Для розв'язку подібних рівнянь традиційно використовується метод варіації постійних, який дає можливість розв'язати рівняння в явному вигляді при певних значеннях констант окремих матеріалів.

Визначення явної залежності часу проходження рідини крізь двошарові композиції

Типова залежність глибини поглинання рідини другим матеріалом для певних співвідношень τ_{12} , τ_1 показана на рис.4

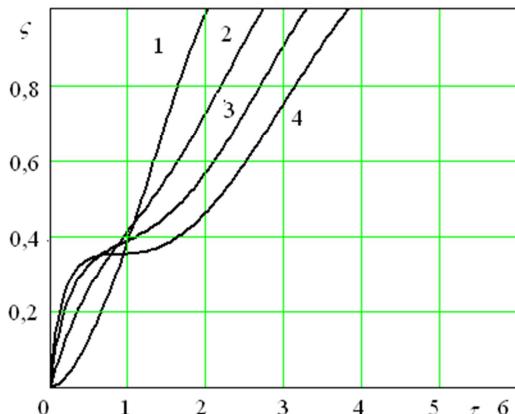


Рис.4 – Глибина проходження рідини в другому матеріалі: 1 - $\tau_2=2$; 2 - $\tau_2=3$; 3 - $\tau_2=4$; 4 - $\tau_2=5$

Характерним моментом для двошарових матеріалів є час досягнення рідиною внутрішньої поверхні для $\zeta=1$. Якщо проаналізувати ряд залежностей глибин проходження рідини у другому матеріалі можна зробити висновок про близькість до лінійної залежності часу досягнення сухого шару від двох параметрів (параметр часу другого матеріалу τ_2 і взаємний параметр часу другого і первого матеріалів τ_{12}).

Наприклад для окремого значення τ_{12} коефіцієнт кореляції дорівнює

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (\tau_2 - \bar{\tau}_{2cp})(\tau_k - \bar{\tau}_{kcc})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (\tau_2 - \bar{\tau}_{2cp})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (\tau_k - \bar{\tau}_{kcc})^2}} = 0,99.$$

Залежність шукаємо у вигляді лінійної функції методом найменших квадратів.

Таблиця 1 – визначення лінійних коефіцієнтів методом найменших квадратів

№	τ_2	τ_k	τ_2^2	$\tau_2 \cdot \tau_k$
1	2	2	4	4
2	3	2,7	9	8,1
3	4	3,3	16	13,2
4	5	3,8	25	19
Σ	14	11,8	54	44,3

Коефіцієнти визначаємо з розв'язку системи

$$\begin{cases} 11,8 = a \cdot 4 + b \cdot 14 \\ 44,3 = a \cdot 14 + b \cdot 54 \end{cases}$$

Що дає значення

$$\tau_k = 0,85 + 0,6 \cdot \tau_2$$

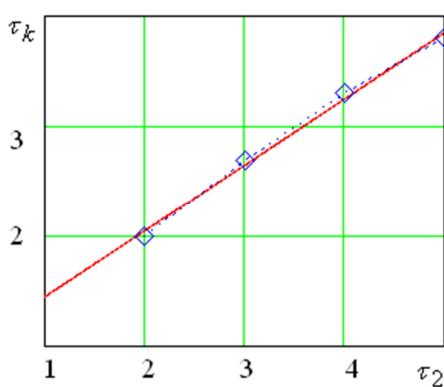


Рис.5 – Лінійна регресія від параметру часу другого матеріалу

Використання методу найменших квадратів дає загальну залежність для певних параметрів часу

першого матеріалу τ_1 у вигляді $\tau_k = a_0 + a_1 \cdot \tau_{12} + a_2 \cdot \tau_2 + a_3 \cdot \tau_{12} \cdot \tau_2$, де коефіцієнти залежать від τ_1 .

Таким чином маємо ряд залежностей:
Для $\tau_1=3$

$$\tau_k = -0,5 + 0,86 \cdot \tau_{12} + 0,62 \cdot \tau_2 + 0,1 \cdot \tau_{12} \cdot \tau_2.$$

Для $\tau_1=4$

$$\tau_k = -0,32 + 0,92 \cdot \tau_{12} + 0,68 \cdot \tau_2 + 0,14 \cdot \tau_{12} \cdot \tau_2.$$

Для $\tau_1=5$

$$\tau_k = -0,4 + 0,89 \cdot \tau_{12} + 0,69 \cdot \tau_2 + 0,15 \cdot \tau_{12} \cdot \tau_2.$$

Для $\tau_1=6$

$$\tau_k = -0,49 + 0,85 \cdot \tau_{12} + 0,6 \cdot \tau_2 + 0,12 \cdot \tau_{12} \cdot \tau_2.$$

Проаналізуємо можливий вигляд цих залежностей (рис. 6)

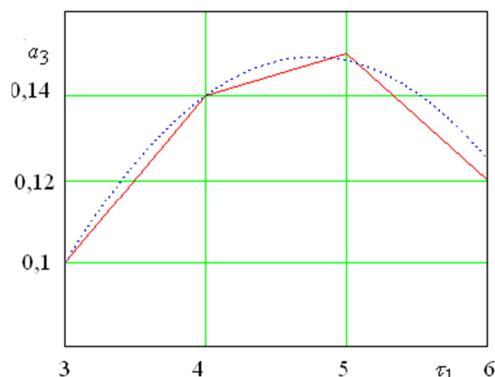


Рис. 6 – Залежність коефіцієнтів регресії від параметру часу первого матеріалу

Залежності мають вигляд кривої з максимумом, що характерно для квадратної параболи. Залежність коефіцієнтів від константи часу первого матеріалу у цьому випадку має вигляд

$$a_i = b_{i0} + b_{i1} \cdot \tau_1 + b_{i2} \cdot \tau_1^2.$$

Для знаходження коефіцієнтів використовувався метод найменших квадратів. Аналіз ряду залежностей для різних параметрів матеріалів дозволив у явному вигляді знайти залежність проходження двох шарів в залежності від властивостей окремих матеріалів.

Шуканий час досягнення вологи внутрішнього шару становить

$$\begin{aligned}\tau_k = & -1,71 + 0,62 \cdot \tau_1 - 0,07 \cdot \tau_1^2 + \\& (0,43 + 0,227 \cdot \tau_1 - 0,027 \cdot \tau_1^2) \cdot \tau_{12} \\& + (0,042 + 0,291 \cdot \tau_1 - 0,033 \cdot \tau_1^2) \cdot \tau_2 + \\& (-0,21 + 0,151 \cdot \tau_1 - 0,016 \cdot \tau_1^2) \cdot \tau_{12} \cdot \tau_2.\end{aligned}$$

Дана залежність дозволяє передбачити час проникнення рідини крізь двошаровий матеріал, виходячи з властивостей окремих матеріалів.

Висновки

Результати досліджень можуть бути використані як для прогнозування властивостей двошарових матеріалів, так і для підбору характеристик окремих матеріалів для створення матеріалу з заданими властивостями.

Список літератури

1. Sousa Fanguero1, R. M. Moisture Management Performance of Multifunctional yarns based on Wool Fibers / Sousa Fanguero1 R. M., Cunha Soutinho H. F. // Advanced Materials Research. – 2010. - Vols. 123-125. – P. 1247-1250.
2. Щуцька, Г. В. Механічні властивості пакетів екологічних матеріалів для взуття / Г. В. Щуцька, Н. П. Супрун, Т. О. Якубовська // Журнал "Проблемы легкой и текстильной промышленности Украины". – 2012. – №2(20).
3. Johnson, N. G. Wool as a technical fibre. Part 3 / N. G. Johnson, E. J. Wood, P. E. Ingham, S. J. McNeil, I. D. McFarlane // Cambridge UK: Text Inst. . – 2003. – 94 p.
4. Norman, R. S. Water transport mechanisms in textile material. Part II: Capillary-type penetration in yarns and fabrics / R. S. Norman, Hollies Kassinger // Textile Res. J. – 1997. – №8. – P. 132-134.
5. Rita M. Crow The Interaction of water with Fabric / Rita M. Crow, J. Randall // Textile Res. J. – 1998. – №68. – P. 280-288.
6. Щуцька, Г. В. Метод прогнозування проникнення рідини крізь пористі матеріали / Щуцька Г.В. // Східноєвропейський журнал передових технологій. – 2015. – Том 3, № 11(75). – С. 19-23.
7. Suprun, N. P. Modeling of masstransfere processes in textiles / N. P. Suprun // Vlakna a textil. – 2001. – №2. – 125 p.
8. Riabchikov, N. Linear mathematical model of water uptake perpendicular to fabric plane / N. Riabchikov, V.

- Vlasenko, S. Arabuli // Vlakna a textil. – 2011. – №2 Rochik 18. – P. 24-29
9. Рябчиков, М. Л. Кінетика процесу водовбирання багатошаровими текстильними композиційними матеріалами. Математична модель процесу водовбирання. Повідомлення 2 / С. І. Ковтун, М. Л. Рябчиков // Київський національний університет технологій та дизайну. Вісник КНУТД. – 2008. – N6. – С. 82-88.
10. Yoneda, M. Measurment of water absorption perpendicular to fabric plane in two- and multi-layered fabric systems / M. Yoneda, Y. Mizuno, J. Yoneda // Textile Res. J. – 1993. – №29(12). – P. 940-949.

Bibliography (transliterated)

1. Sousa Fanguero1, R. M., Cunha Soutinho, H. F. Moisture Management Performance of Multifunctional yarns based on Wool Fibers. *Advanced Materials Research*, 2010, **123-125**, 1247-1250.
2. Shchutska, G., Suprun, N. Yakubovska, T. Mechanichni vlastivosti paketiv ekologichnyh materialov dla vzutya. *Problemy legkoy i tekstilnoy promyshlennosti Ukrayiny*, 2012, 2(20).
3. Johnson, N. G., Wood, E. J., Ingham, P. E., McNeil, S. J., McFarlane, I. D. Wool as a technical fibre. Part 3. Cambridge UK: Text Inst, 2003, 94 p.
4. Norman, R. S., Hollies Kassinger Water transport mechanisms in textile material. Part II: Capillary-type penetration in yarns and fabrics. *Textile Res. J.*, 1997, **8**, 132-134.
5. Rita, M. Crow, Randall, J. The Interaction of water with Fabric. *Textile Res. J.*, 1998, **68**, 280-288.
6. Shchutska, G. Metod prognozuvannya pronicnennya ridyny kriz poristi materialy. *Shidnoevropeyskiy jornal peredovyh tehnologiy*, 2015, Vol 3, **11**(75), 19-23.
7. Suprun, N. P. Modeling of masstransfere processes in textiles. *Vlakna a textile*, 2001, **2**, 125 p.
8. Riabchikov, N., Vlasenko, V., Arabuli, S. Linear mathematical model of water uptake perpendicular to fabric plane. *Vlakna a textil*, 2011, **2** Rochik 18, 24-29.
9. Kovtun, S., Riabchikov, M. Kinetika protsesu vodovbirannya bagatosharovimi textile kompozitsiynimi materialami. Mathematical model protsesu vodovbirannya. Notification 2. *Kiev The natsionalny universitet tehnologiy that design. News KNUTD*, 2008, **6**, 82-88.
10. Yoneda, M., Mizuno, Y., Yoneda, J. Measurment of water absorption perpendicular to fabric plane in two- and multi-layered fabric systems. *Textile Res. J.*, 1993, **29**(12), 940-949.

Надійшла (received) 15.10.2015

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

УДК 621.396.6

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПТИМАЛЬНОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ КОМПОНЕНТОВ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ ОБРАБОТКИ ИНФОРМАЦИИ

V. A. ВОСКОБОЙНИК

Кафедра захисту інформації, Запорізький національний технічний університет, г. Запоріжжя, УКРАЇНА
email: traffik08@mail.ru

АННОТАЦІЯ В даній роботі розглядаються основні конструктивно-технологіческі особливості техніческих устроїств обробки інформації. Уделено особе внимание плоским конструктивним узлам, як найбільш схильними до зовнішніх дестабілізуючих факторів. Ісследуется оценка зависимости динамических характеристик отдельных компонентов радиоэлектронных средств от внесения ими локальных характеристик в общую конструктивную систему. Определены основные задачи решения конструкторских задач. Предложен алгоритм математического моделирования и оптимального проектирования плоских конструктивных узлов.

Ключові слова: техніческі средства приема-передачи інформації, надежність, математичне моделювання, оптимізація, оптимальне проектування.

АННОТАЦІЯ В цій роботі розглядаються основні конструктивно-технологічні особливості технічних пристрійв обробки інформації. Приділено особливу увагу плоским конструктивним вузлам, як найбільш схильними до зовнішніх дестабілізуючих факторів. Досліджується оцінка залежності динамічних характеристик окремих компонентів радіоелектронних засобів від внесення ними локальних характеристик в загальну конструктивну систему. Визначено основні завдання вирішення конструкторських задач. Запропоновано алгоритм математичного моделювання та оптимального проектування плоских конструктивних вузлів.

Ключові слова: технічні засоби прийому-передачі інформації, надійність, математичне моделювання, оптимізація, оптимальне проектування.

THE DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR OPTIMAL DESIGN OF THE MAIN COMPONENTS OF TECHNICAL DEVICES OF INFORMATION PROCESSING

V. VOSKOBOYNIK

Department of Information Protection, Zaporizhzhya National Technical University, Zaporozhye, UKRAINE

ABSTRACT In this paper are discussed the basic design and technological features of technical devices for information processing. Special attention is paid to a flat nodes of design as the most vulnerable to external destabilizing factors. We investigate the dependence of the dynamic assessment of the characteristics of individual components of radio-electronic means of introducing by them local characteristics into the overall structural system. The basic tasks of solving design problems are determined. The algorithm of mathematical modeling and optimal design of planar structural assemblies is proposed.

The technique of optimal design of the main components of the technical means of information processing. It allows the early stages of the design to assess their reliability and performance, reduce design time and manufacturing, to reduce the environmental tests, etc. Another advantage of this approach is that the developer designs of radio electronic means offer a tool that allows him to see in graphical form a true picture of fluctuations in construction, evaluate its dynamic performance in the test frequency range and set levels of external vibration effects. In the base of mathematical model of constructions lies the method of finite elements based on the Klaaf's quadrangle.

Keywords: technical devices of information transfer, reliability, mathematical modeling, optimization, optimal design.

Введение

Качество и надежность технических средств обработки информации должны закладываться еще на этапе их разработки и проектирования. Как правило, основными компонентами таких средств являются радиоэлектронные средства (РЭС) выполненные в виде блоков, в состав которых входят: шасси (корпус), плоские конструктивные узлы в виде печатных плат с электрорадиоэлементами и

закрепленные в корпусе определенным образом и кожух (или без него).

Постановка задачи

Переход от автоматизации отдельных этапов конструкторского проектирования (компоновки, трассировки, размещения) к автоматизации полного процесса проектирования отдельных узлов и блоков в целом с учетом внешних дестабилизирующих

факторов является актуальным направлением в области надежностного проектирования РЭС. Современные бортовые РЭС подвержены интенсивным механическим и тепловым воздействиям, следовательно, влияние вибраций, ударов, температуры, а также выбор способов защиты от них необходимо учитывать на этапе проектирования.

Анализ динамических характеристик конструкций РЭС с использованием численных методов математического моделирования на ранних этапах проектирования позволяет определять уровни виброускорений на каждом радиоэлементе (ЭРЭ), собственные частоты конструктивных узлов, моделируя различные условия нагружения и способы закрепления.

Сравнение расчетных уровней виброускорений на ЭРЭ с допустимыми значениями, указанными в технических условиях (ТУ) на их эксплуатацию, позволяет судить о работоспособности данного конструктивного узла (работоспособным конструктивным узлом будем считать тот узел, у которого уровни виброускорений на каждом элементе не превышают заданных по ТУ). В случае превышения допустимых значений ускорений, а также при их граничных значениях, традиционно производилось изменение геометрии конструкции или их материала, способа закрепления, замена радиоэлементов или их перестановка, после чего математическое моделирование механических процессов повторялось. Такой подход позволял улучшать динамические характеристики, но, в то же время ухудшались критерии оптимальности, полученные на этапах размещения и трассировки. Кроме того, не всегда на практике предоставляется возможность реализовать предложенные пути обеспечения работоспособности конструкции, т. к. в большинстве случаев материал, геометрия, способ закрепления не могут быть изменены. Перестановка же элементов неприемлема из-за ухудшения показателей качества, получаемых на этапах размещения и трассировки. Таким образом, на проектируемую конструкцию печатного узла накладываются ограничения: материал, геометрия и способ закрепления постоянны, координаты ЭРЭ заданы и изменять их можно в том случае, когда нет других путей обеспечения работоспособности.

Основная часть

Исследования показали, что ЭРЭ изменяют значения локальных масс, а способы их закрепления оказывают существенное влияние на динамические характеристики как самого плоского конструктивного узла в целом, так и на сами элементы. Согласно нормативным конструкторско-технологическим документам, радиоэлементы могут устанавливаться на собственных выводах: приподняты, опущены на печатную плату, приклеены, приклеены с прокладкой,

привязаны, прижаты скобой (хомутиком) и т. д. Следовательно, жесткости фрагментов «печатная плата + жесткость, вносимая ЭРЭ и его способом крепления» будут различны. Таким образом, варьируя различными способами закрепления радиоэлементов, можно улучшить динамические характеристики плоского конструктивного узла.

Кроме того, конструктор стремится установить элементы на собственных выводах, т. к. любые дополнительные меры конструкторского и технологического ужесточения влечут за собой материальные и стоимостные затраты, а также затрудняют ремонтопригодность.

Таким образом, при проектировании плоских конструктивных узлов требуется решить следующие основные задачи:

- обеспечение оптимальных критериев компоновки, размещения и трассировки с применением промышленных автоматизированных систем проектирования;
- обеспечение работоспособности конструкции с учетом влияния внешних механических воздействий;
- оптимизация конструкции по выбранным критериям.

В настоящей работе задача оптимизации плоских конструктивных узлов РЭС рассматривается как минимизация целевой функции, представляющая собой сумму переменных проектирования при условии выполнения основных ограничений типа неравенств. Эти ограничения определяют уровни максимально допустимых виброускорений на ЭРЭ и уровни максимально допустимых виброперемещений ЭРЭ (во избежание соприкосновения с рядом стоящими конструктивными узлами). Область допустимых значений переменных проектирования ограничивается системой дополнительных прямых ограничений на эти переменные с целью исключения нереального физического проекта [1]. Переменными проектирования выбраны локальные жесткости фрагментов «печатная плата + жесткость, вносимая ЭРЭ и способом его закрепления», т.е вариантом его установки.

Учитывая то обстоятельство, что процесс оптимизации требует расчета большого числа, аналогичных конструкций, для повышения его эффективности предлагается:

- использовать функции чувствительности (скорости изменения характеристик конструкции РЭС при изменении переменных проектирования) [2];
 - выбирать в качестве исходного базисного вектора переменных проектирования минимальные локальные жесткости фрагментов «печатная плата + жесткость, вносимая ЭРЭ и способом его крепления».
- На пути оптимизации плоских конструктивных узлов возникает ряд препятствий, а именно [3]:
- большое количество переменных проектирования;
 - большое количество ограничений типа

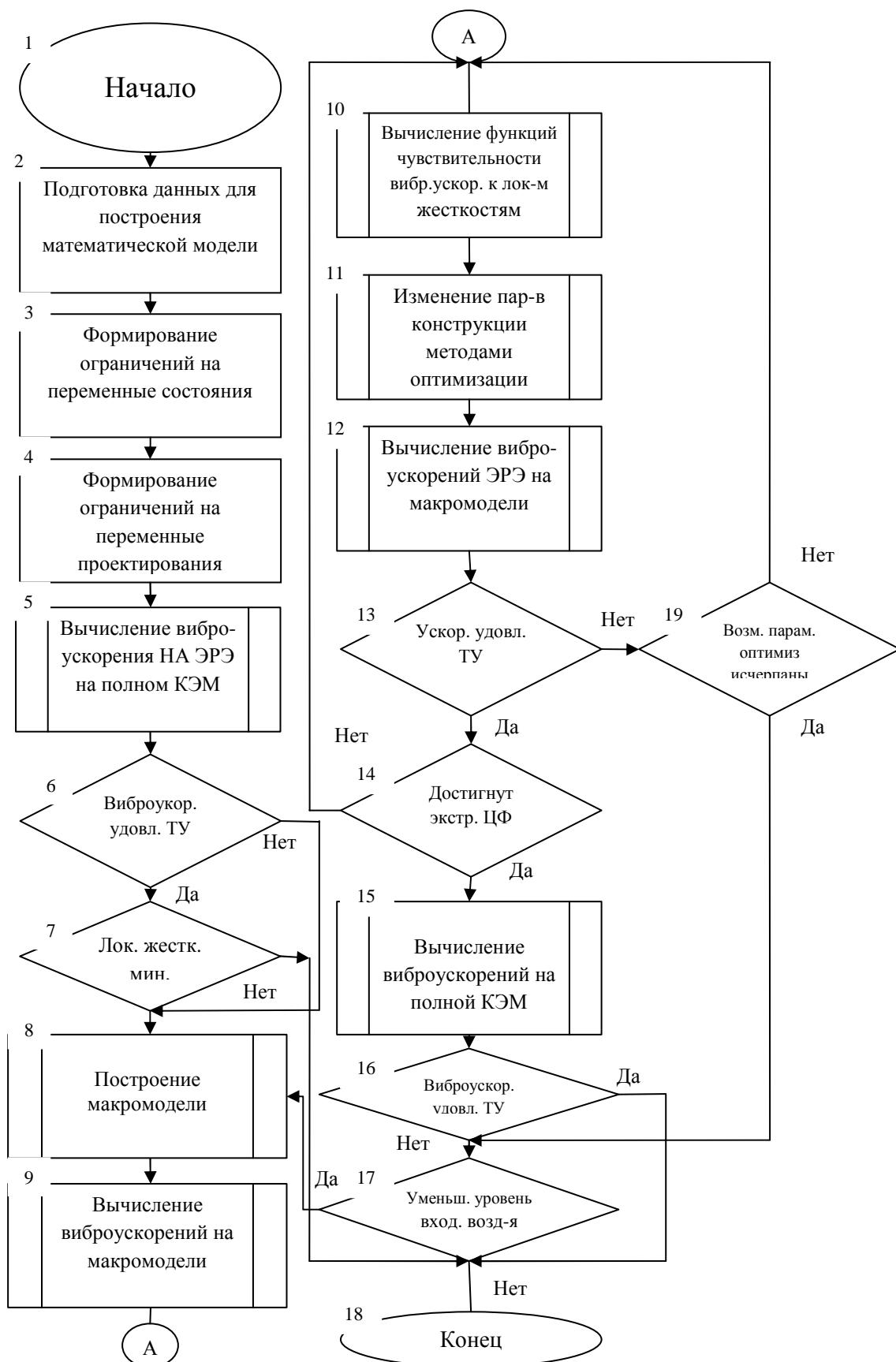


Рис. 1. – Алгоритм методики оптимального проектирования плоских конструктивных узлов

неравенств;

- сложная неявная зависимость переменных состояния от переменных проектирования;
- большая размерность самой математической модели.

Для решения данной проблемы и получения области допустимых значений переменных проектирования для задач обеспечения переменных состояния, предлагается процесс оптимизации плоских конструктивных узлов проводить по следующей методике:

- расчет динамических характеристик на полной конечно-элементной модели (КЭМ);
- оптимизация на макромодели;
- повторный анализ на полной КЭМ.

Алгоритм методики оптимального проектирования плоских конструктивных узлов с применением методов математического моделирования представлен на рис 1.

Проектирование начинается с подготовки исходных данных для построения математической модели (блок 2). На этом этапе происходит формирование (создание) образа конструкции, задаются физико-геометрические параметры плоского конструктивного узла, проводится размещение ЭРЭ на нем (с помощью существующих автоматизированных систем, или вручную), задаются массы ЭРЭ, способ их закрепления, координаты установки, а также проводится дискретизация плоского конструктивного узла путем расчленения его на конечные элементы заданной формы. Кроме того на этом этапе задаются условия механических нагружений (уровни входного воздействия) и способ закрепления плоской конструкции, т.е. задаются граничные условия. После подготовки исходных данных для построения математической модели и дальнейших расчетов проводится подготовка ограничений на переменные состояния (блок 3), где формируются данные о допустимых уровнях виброускорений на каждый ЭРЭ и значения максимальных виброперемещений с учетом ограниченных расстояний между соседними печатными узлами или печатным узлом и корпусом.

На следующем этапе задаются прямые ограничения на переменные проектирования с целью исключения нереального проекта (блок 4), задаются варианты установки ЭРЭ, указывается, вариантами каких радиоэлементов допускается варьировать, какими нет, формируя множество дискретных переменных, которые в дальнейшем будут служить исходными данными обеспечения работоспособности и оптимизации.

Для расчета виброускорений на ЭРЭ используется матричный метод на базе КЭМ, которая наиболее полно описывает протекающие в конструкции деформационные процессы (блок 5). По результатам сравнения расчетных значений виброускорений с допустимыми по ТУ (блок 6) на каждом ЭРЭ принимается решение о необходимости

проведения оптимизации. Если расчет виброускорений проводился при вариантах установки, которые соответствуют минимальным локальным жесткостям (блок 7), а, следовательно, конструкция имеет оптимальное решение по выбранному критерию, то процесс проектирования и оптимизации окончен, в противном случае происходит построение макромодели (блок 5). После этого проводится расчет значений виброускорений на макромодели (блок 9) и вычисляются функции чувствительности переменных состояния от переменных проектирования (блок 10). Необходимость вычисления функций чувствительности виброускорений на каждом ЭРЭ к локальным варьируемым жесткостям, вносимыми способом крепления элементов, обусловлена тем, что, во-первых, для сложной динамической системы такой, как плоский конструктивный узел с различными локальными массами и жесткостями, трудно однозначно указать вариант установки какого радиоэлемента можно изменить, т. к., улучшая характеристики на одном ЭРЭ, меняются характеристики на других; во-вторых, если элемент имеет единственный способ крепления, а виброускорение на нем больше допустимого по ТУ, то необходимо знать, с помощью каких других элементов можно улучшить его динамические характеристики. Зная функции чувствительности и используя методы оптимизации, можно варьировать переменными проектирования (блок 11), проводить повторный расчет значений виброускорений на макромодели (блок 12) и сравнивать расчетные значения виброускорений с заданными по ТУ (блок 13), т.е проводить параметрическую оптимизацию. Если невозможно достичь работоспособного варианта конструкции средствами параметрической оптимизации (блок 19) при заданном входном воздействии, то принимается решение о возможности уменьшения его уровня (блок 17). В противном случае проводится оптимизация до достижения минимального значения целевой функции (блок 14). Получив оптимальную конструкцию по выбранному критерию, можно производить повторный расчет виброускорений на ЭРЭ на полной КЭМ (блок 15) и проводить проверку на удовлетворение требованиям работоспособности (блок 16). Если конструкция работоспособна и оптимальна, то процесс проектирования заканчивается. В случае нарушения требований работоспособности, принимается решение о снижении уровня входного воздействия (блок 17). Если такое решение приемлемо, то процесс проектирования повторяется с блока 9, в противном случае принимается решение о перестановке элементов, изменении физико-геометрических параметров, либо способа закрепления плоского конструктивного узла.

На основании изложенной методики разработан алгоритм и проведена программная

реализация с использованием формальных языков программирования, что, в свою очередь, позволило представить форму изгибных колебаний плоского конструктивного узла в графическом виде.

Выводы

Предложенная методика оптимального проектирования основных компонентов технических средств обработки информации позволяет на ранних этапах проектирования оценить их надежность и работоспособность, снизить сроки проектирования и изготовления, сократить натурные испытания и т.д. Другим преимуществом такого подхода является то, что разработчик-конструктор получил инструмент, позволяющий ему видеть в графическом виде истинную картину колебания конструкции, оценивать ее динамические характеристики в заданном частотном диапазоне и уровнях внешних воздействий

Список литературы

1. Недоступ, Л. А. Забезпечення якості та надійності радіоелектронних пристрій шляхом комплексної оптимізації процесів виробництва / Л. А. Недоступ, Ю. Я. Бобало, М. Д. Кіселичник, О. В. Лазько // Вісник Національного університету „Львівська політехніка”. – 2005. – № 534. – С. 45-51.
2. Волочій, Б. Ю. Методика визначення показників надійності відмовостійких програмно-апаратних радіоелектронних систем / Б. Ю. Волочій, Л. Д. Озірковський, Т. І. Панський, О. В. Муляк // Вісник НТУУ «КПІ». – 2013. – № 55. – С. 71-79.
3. Черкесов, Г. Н. Надежность аппаратно-программных комплексов: Учебное пособие / Г. Н. Черкесов. – СПб.: Питер. – 2005. – 479 с. – ISBN 5-469-00102-4.
4. Иyду, К. А. Математические модели отказоустойчивых вычислительных систем / К. А. Иyду, С. А. Кривошев. – М.: Изд-во МАИ. – 1989. – 144 с.
5. Волочій, Б. Ю. Технологія моделювання алгоритмів поведінки інформаційних систем / Б. Ю. Волочій. – Львів: Вид-во НУ “Львівська політехніка”. – 2004. – 220 с.
6. Чернов, А. В. Классификация моделей надежности программного обеспечения / А. В. Чернов, И. Г. Паращенко // Инженерный вестник Дона. – 2012. – № 4. – 3 с.
7. Friedman, M. A. Reliability techniques for combined hardware and software systems / M. A. Friedman, P. Y. Tran, P. L. Goddard; Final technical report; Rome Laboratory Air Force Systems Command, Griffiss Air Force Base. – New York. – 1992. – 286 p.
8. Luy, M. R. Handbook of software reliability engineering / M. R. Luy – Ca.: IEEE Computer Society Press, 1996.
9. Musa, J. D. Software Reliability Models: Concepts, Classification, Comparisons, and Practice / J. D. Musa, K. Okumoto // Electronic Systems Effectiveness and Life Cycle Cost-ing. – 1983. – Vol. 3. P. 395-423. [CrossRef]
10. Bohdan, V. The software for the analysis of reliability of fault-tolerant radio-electronic systems / B. Volochiy, L. Ozirkovskyy, P. Klochko // Uradzenia i sistemy radioelektronich-zne UiSR'09 : III Konferencja naukowa, 23-25 wresnia 2009 / Wojskowa Akademia Techniczna. – Soczewka, 2009.
11. Mandziy, B. Автоматизація моделювання поведінки радіоелектронних інформаційних систем / Б. Мандзій, Б. Волочій, Л. Озірковський, П. Клочко // Сучасні проблеми радіоелектроніки, телекомуникацій та приладобудування (СПРТП-2009): IV Міжнародна науково-технічна конференція, 8-10 жовтня 2009 / ВНТУ. – Вінниця. – 19 с.
12. Stashevskyi, Z. P. Особливості проблеми синтезу систем захисту інформації у структурних підрозділах МНС України / З.П. Стасhevський, Ю.І. Грициук // Науковий вісник НЛТУ України. – 2012. – Вип. 22.10. – С. 79-96.

Bibliography (transliterated)

1. Nedostup, L. A., Bobalo, Yu. Ya., Kiselychnyk, M. D., Lazko, O. V. Zabezpechennia yakosti ta nadiinosti radioelektronnykh prystroiv shliakhom kompleksnoi optimizatsii protsesiv vyrabnytstva. Visnyk Natsionalnogo universytetu "Lvivska politehnika", 2011, **705**, 237-242.
2. Volochiy, B. Y., Ozirkovskyy, L. D., Panskyi, T. I., Mulyak, O. V. (2013) Methodology for determining the reliability of fault-tolerant hardware-software radioelectronic systems. Visn. NTUU KPI, Ser. Radiotekhnika i radioaparatobuduv., no. 55, pp. 71-79. (in Ukrainian)
3. Cherkasov, G. N. Nadezhnost aparatno-programmnykh kompleksov. SPb., Peter Publ, 2005, 479 p.
4. Iyudu K.A., Krivoshchekov S.A. (1989) Matimaticheskie modeli otkaزوostocheyvkh vychislitelnykh system [Mathematical models of fault-tolerant computing systems]. Moskow, MAI Publ., 144 p. – ISBN 5-7035-0004-4
5. Volochiy, B. Y. Tekhnolohiia modeliuvannia alhorytmiv povedinky informatsiinykh system. Lviv, Lviv Polytechnic National University Publ., 2004, 220 p.
6. Chernov, A.V., Parashhenko, I. G. Klassifikacija modelej nadezhnosti programmnogo obespechenija. Inzhenernyj vestnik Doma. 2012, **4**, 3 p.
7. Friedman, M. A., Tran, P. Y., Goddard, P. L. Reliability techniques for combined hardware and software systems. Air Force Systems Command, Griffiss Air Force Base, New York, 1992, 286 p.
8. Luy, M. R. Handbook of software reliability engineering. Ca.: IEEE Computer Society Press, 1996.
9. Musa, J. D., Okumoto, K. Software Reliability Models: Concepts, Classification, Comparisons, and Practice. Electronic Systems Effectiveness and Life Cycle Costing, 1983, **3**, 395-423. doi: http://dx.doi.org/10.1007/978-3-642-82014-4_22
10. Bohdan, V., Ozirkovskyy, L., Klochko, P. The software for the analysis of reliabilty of fault-tolerant radio-electronic systems. Uradzenia i sistemy radioelektroniczne UiSR'09. Soczewka, Wojskowa Akademia Techniczna, 2009.
11. Mandziy, B., Volochiy, B., Ozirkovskyy, L., Klochko, P. Avtomatyazacija modeljuvannja povedinky radioelektronnyh informacijnyh system [Computer-aided simulation of the behavior of electronic information systems]. Modern Problems of Radio Engineering, Telecommunications and Instrumentation (SPRTP-2009). Vinnitsa, 2009, 19 p.
12. Stashevskyi, Z. P., Grycyuk, Yu. I. Features of problem of synthesis of systems security of information are in structural subdivisions of ministry of emergency measures of Ukraine. Naukoviy visnik NLTU Ukrayini, 2012, **10**(22), 79-96.

Поступила (received) 15.10.2015

УДК 004.85

НАВЧАННЯ НЕЙРОМЕРЕЖ ІЗ ФУНКЦІЄЮ АКТИВАЦІЇ ДВОПОРОГОВОГО ТИПУ

В. М. КОЦОВСЬКИЙ

*Кафедра інформаційних управлюючих систем та технологій, ДВНЗ "Ужгородський національний університет", Ужгород,
УКРАЇНА
email: kotsavlad@gmail.com*

АНОТАЦІЯ Робота присвячена питанням, які стосуються навчання нейронних елементів і нейромереж із двопороговою функцією активації. Показано, що задача навчання двопорогового нейрона належить до класу NP-повних задач. Наведено достатні умови, які забезпечують можливість генерації двопорогових булевих функцій за допомогою списків рішень. Досліджена задача навчання нейромереж прямого поширення, функції активації яких є згладженими аналогами двопорогових функцій. Продемонстровано результатами комп'ютерних експериментів навчання модельних функцій, які свідчать про переваги запропонованого у роботі підходу із використанням функцій активації двопорогового типу.

Ключові слова: нейронний елемент, двопороговий нейрон, нейромережа, навчання, алгоритмічна складність.

АННОТАЦИЯ Работа посвящена вопросам обучения нейронных элементов и нейросетей с двупороговой функцией активации. Показано, что задача обучения двупорогового нейрона принадлежит к классу NP-полных задач. Приведены достаточные условия реализуемости двупороговых булевых функций с помощью списков решений. Рассмотрена задача обучения нейросетей прямого распространения, функции активации которых являются слаженными аналогами двупороговой функции. Также приведены результаты компьютерных экспериментов обучения модельных функций, которые демонстрируют преимущества нейросетей с функциями активации двупорогового типа.

Ключевые слова: нейронный элемент, двупороговый нейрон, нейросеть, обучение, алгоритмическая сложность.

LEARNING OF NEURAL NETS WITH BITRESHOLD-LIKE ACTIVATION FUNCTION

V. KOTSOVSKY

Department of information managing systems, Uzhgorod state university, Uzhgorod, UKRAINE

ABSTRACT The paper is devoted to the study of the properties of the simplest multithreshold generalization of McCulloch-Pitts neurons, namely bithreshold neurons. The main reason of application of multithreshold device is their more powerful capabilities in comparison with classical threshold units. But multithreshold devices are quite unused because the effective learning algorithm is unknown for such units.

It is possible to mark out three main goals of the present paper. The first one is the study of the existence of effective learning technique for bithreshold neurons and networks. The second one is the analysis of the relation between Boolean function realizable on bithreshold units and decision lists. The last goal is the study of capabilities of feedforward neural networks with smoothed bithreshold activation function and closely related question of their learning by means of backpropagation.

It is shown that the learning of one bithreshold neural unit is NP-complete. Furthermore, the paper contains the proof of the fact that the task of verification of the bithreshold separability of the finite sets A^+ and A^- is NP-complete even in the case $A^+ \cup A^- \subset \{a,b\}^n$, where $a \in R$, $b \in R$ ($a \neq b$) and the weight coefficients of the neuron may be restricted to be from the set $\{-1,+1\}$. Two ways of overcoming the intractability of bithreshold neurons learning are proposed. Firstly, we can restrict ourselves to consider only those bithreshold units, which are capable to be learned in polynomial time. In particular, it is shown that if we have the decision list $f = (f_1, 1), (f_2, 1), \dots, (f_{r-1}, 1), (f_r, 1)$, where f_i ($i = 1, 2, \dots, r-1$) is an arbitrary Boolean function of two variables assigned the value 1 on two points, and the function f_r is realizable on bithreshold unit, then the same is true for Boolean function f . The second way is based on gradient learning algorithms for neural networks with smoothed bithreshold-like activation function. The simulation results are given confirming the validity of this approach.

Keywords: neuron, bithreshold neuron, neural network, learning, complexity.

Introduction

Neural-like units (neurons) are intensively used for solving numerous important practical problems [1]. Many different models of neuron has been proposed. The one of more important features of these units is the activation

function determining their outputs. Historically, the first proposed units had activation functions of threshold type according to developed models of brain cells. Using this type of activation Rosenblatt [2] designed the incremental consistent algorithm for the perceptron learning. The simple proof of its convergence is due to Novikoff [1].

© В. М. Коцовський, 2015

Then Minsky and Papert [3] proved that Rosenblatt's algorithm is inefficient in general case. Peled and Simeone were the first to produce a polynomial time algorithm for the threshold recognition problem [4]. They proposed linear programming approach based on polynomial-time Karmarker's algorithm.

It is well known that the threshold unit is incapable solving many rather easy recognition tasks (e. g. the famous XOR-problem [1, 3]). The using of neurons with more complicated activation functions allowed surmounting this constrain. Historically, the one of the first designed advanced device were multithreshold neural units [4, 5]. But the efficient learning techniques for multithreshold neuron based neural networks aren't developed even in the case of the network with one node.

Goal

The present paper has three main goals. The first one is study of the existence of effective learning technique for bithreshold neurons and networks. The second one is the analysis of the relation between Boolean function realizable on bithreshold units and decision lists. The last goal is the study of capabilities of feedforward neural networks with smoothed bithreshold-like activation function and related question of their learning by means of backpropagation.

Basic definitions

The bithreshold neurons with n inputs is defined by a triplet (\mathbf{w}, t_1, t_2) , where $\mathbf{w} \in \mathbb{R}^n$ is the weight vector and $t_1, t_2 \in \mathbb{R}$ ($t_1 < t_2$) are the thresholds. The neuron output y is defined by

$$y = \begin{cases} a, & \text{if } \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} < t_1 \\ b, & \text{otherwise.} \end{cases} \quad (1)$$

The graph of corresponding activation function of bithreshold neuron is shown in Fig. 1 (in the case where $a = -1, b = 1$).

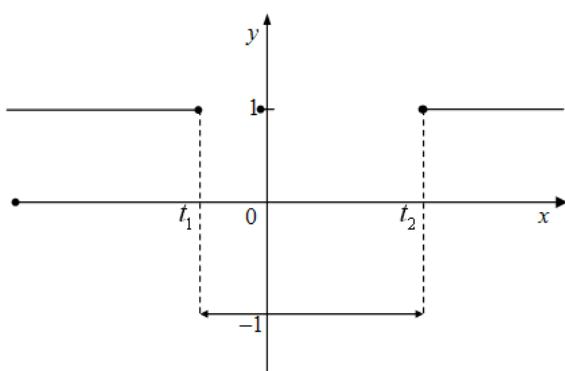


Fig. 1. – The graph of bithreshold activation function

We consider neurons with binary ($\{a, b\} = Z_2$) or bipolar ($\{a, b\} = E_2$) outputs, where $Z_2 = \{0, 1\}$, $E_2 = \{-1, 1\}$. If $t_1 = -\infty$, then we obtain the ordinary threshold neuron. The triplet (\mathbf{w}, t_1, t_2) is the structure vector of the bithreshold neuron.

The bithreshold neuron with bipolar output performs a classification of \mathbb{R}^n by mapping every vector in \mathbb{R}^n to +1 or -1. Geometrically, the bithreshold neuron has two separating parallel hyperplanes that define its decision region, as opposed to just one separating surface that defined the decision region of the traditional threshold neuron.

Let A be the finite set in the space \mathbb{R}^n . Then bithreshold neuron makes such dichotomy (A^+, A^-) of the set A :

$$A^- = \{\mathbf{x} \in A \mid \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} < t_1\}, \quad A^+ = A \setminus A^-.$$

This partition we call a "bithreshold" dichotomy and we call "bithreshold separable" the sets A^+ and A^- . In the most important special case $A = Z_2^n$ or $A = E_2^n$. We call Boolean function $f(x_1, \dots, x_n) : Z_2^n \rightarrow Z_2$ a "bithreshold function", if exists bithreshold neuron with the structure (\mathbf{w}, t_1, t_2) that $f(\mathbf{x}) = 0 \Leftrightarrow \mathbf{w} \cdot \mathbf{x} < t_1$. Let LBT_n denote the set of all n -place bithreshold Boolean functions.

Complexity of learning procedure

A polynomial time algorithm is one with running time $O(r^s)$, where r is the size of input and s is some fixed integer ($s \geq 1$). The size of an input to an algorithm can be measured in various ways. For algorithms working with neurons it is naturally to take as a size of input the capacity of learning sample.

We shall show that if the $P \neq NP$ conjecture is true, then don't exist a polynomial time verification algorithm checking the possibility of realization of the arbitrary Boolean function on one bithreshold unit. The learning of bithreshold Boolean function is NP-complete all the more.

Let C be a class of Boolean function: $C = \{C_n\}_{n \geq 1}$, $n \in \mathbb{N}$, $C_n \subset \{f \mid f : Z_2^n \rightarrow Z_2\}$. In the complexity theory the following problem is well-known.

MEMBERSHIP(C)

Instance: A disjunctive normal form formula φ in n variables.

Question: Does the function f represented by φ belong to C .

Anthony proved [6] that **MEMBERSHIP(C)** is NP-complete for all classes satisfying following properties:

- 1) for every $f \in C_n$ and arbitrary $i \in \{1, \dots, n\}$, both functions $f(x_1, \dots, x_{i-1}, 1, x_{i+1}, \dots, x_n)$ and $f(x_1, \dots, x_{i-1}, 0, x_{i+1}, \dots, x_n)$ belong to C_{n-1} ;
- 2) for every $n \in \mathbb{N}$, the identically 1-function belongs to C_n ;
- 3) there exists $k \in \mathbb{N}$ such that

$$C_k \neq \{f \mid f : Z_2^k \rightarrow Z_2\}.$$

Proposition 1. *The task of verification of the membership to the class of bithreshold Boolean functions is NP-complete.*

Proof. We show that class $LBT = \{LBT_n\}_{n \geq 1}$ satisfies conditions 1-3. Condition 1 follows from Shannon expansion $f(x_1, \dots, x_n) = f(x_1, \dots, x_{n-1}, 0)\bar{x}_n \vee f(x_1, \dots, x_{n-1}, 1)x_n$. If Boolean function $f(x_1, \dots, x_n)$ can be realized on the bithreshold neuron with the structure $(w = (w_1, \dots, w_{n-1}, w_n), t_1, t_2)$, then the functions $f(x_1, \dots, x_{n-1}, 1)$ and $f(x_1, \dots, x_{n-1}, 0)$ can be realized on bithreshold neurons with structures $((w_1, \dots, w_{n-1}), t_1 - w_n, t_2 - w_n)$ respectively, $((w_1, \dots, w_{n-1}), t_1, t_2)$. Condition 2 is evident. Condition 3 follows from the fact that if $n > 2$ Boolean function $x_1 \oplus x_2 \oplus \dots \oplus x_n$ doesn't belong to LBT_n [7]. Therefore subject to [6] MEMBERSHIP(LBT) is NP-complete.

Proposition 2. *The task of verification of the bithreshold separability of the finite set A^+ and A^- is NP-complete even in the case $A^+ \cup A^- \subset \{a, b\}^n$, where $a \in \mathbb{R}$, $b \in \mathbb{R}$ ($a \neq b$) and the weight coefficients may be restricted to be from the set $\{-1, +1\}$.*

Proof. We use the results of Blum and Rivest from [8], where was shown that the following training problem is NP-complete:

The 3-Node Network with AND output node restricted so that any or all of the weights for one hidden node are required to be opposite to the corresponding weights of the other and any or all the weights are required to belong to $\{-1, +1\}$, since the well-known NP-complete problem Set-Splitting [9] can be reduced to this task.

It is easy to verify that the arbitrary dichotomy (A^+, A^-) is bithreshold if and only if it can be realized on neural network of mentioned type. Really, $\mathbf{x} \in A^- \Leftrightarrow (\mathbf{w}, \mathbf{x}) < t_2$ and $(-\mathbf{w}, \mathbf{x}) < -t_1$ and the transformation from the basis $\{a, b\}$ to the basis Z_2 can be made using a standard linear transformation of variables (the same is true for synaptic weights).

Representation of bithreshold Boolean functions by decision lists

Decision lists were proposed by Rivest in [10]. For many application [10, 11] decision lists are more useful than classical disjunctive or conjunctive normal forms.

Let $K = \{f_1, f_2, \dots, f_r\}$ be an arbitrary finite sequence of Boolean functions of n variables. A function $f : Z_2^n \rightarrow Z_2$ is said to be decision list based on sequence K if it can be evaluated using a sequence of *if then else* command as follows, for some fixed $\{c_1, c_2, \dots, c_r\}$, $(c_i \in Z_2, i = 1, \dots, r)$:

```
if  $f_1(\mathbf{x}) = 1$  then set  $f(\mathbf{x}) = c_1$ 
else if  $f_2(\mathbf{x}) = 1$  then set  $f(\mathbf{x}) = c_2$ 
.....
else if  $f_r(\mathbf{x}) = 1$  then set  $f(\mathbf{x}) = c_r$ 
else set  $f(\mathbf{x}) = 0$ .
```

More formally, a decision list based on K is defined by a sequence

$$f = (f_1, c_1), (f_2, c_2), \dots, (f_r, c_r),$$

where $f_i \in K, c_i \in Z_2, (i = 1, 2, \dots, r)$. The values of the function f are defined by

$$f(\mathbf{x}) = \begin{cases} c_j, & \text{if } j = \min\{i : f_i(\mathbf{x}) = 1\} \text{ exists,} \\ 0, & \text{otherwise.} \end{cases}$$

Example. Let $K = \{x_1\bar{x}_3, x_2, \bar{x}_1\}$. The decision list $f = (x_1\bar{x}_3, 0), (x_2, 1), (\bar{x}_1, 1)$ may be thought of as operating in the following way on Z_2^3 . First, those points for which $x_1\bar{x}_3$ is true are assigned the value 0: these are $(1, 0, 0), (1, 1, 0)$. Next the remaining points for which x_2 is satisfied are assigned the value 1: these are $(0, 1, 0), (0, 1, 1), (1, 1, 1)$. Finally, the remaining points for which \bar{x}_1 is true are assigned the value 1: this accounts for $(0, 0, 0), (0, 0, 1)$, leaving only $(1, 0, 1)$, which is assigned value 0. At easy to verify that we obtain the following function $\bar{x}_1\bar{x}_2 \vee \bar{x}_1\bar{x}_3 \vee x_2x_3$.

The relationship between decision lists and threshold Boolean functions was established in [10]. Antony showed (see [6]) that any 1-decision list (that is, a decision list based over the set K of single literals) is a threshold function.

We present the similar result concerning the representation of bithreshold Boolean functions.

Proposition 3. *If the members of the decision list*

$$f = (f_1, c_1), (f_2, c_2), \dots, (f_{r-1}, c_{r-1}), (f_r, c_r)$$

satisfy following conditions:

- 1) f_i is an arbitrary Boolean function of two variables assigned the value 1 on two points ($i=1,2,\dots,r-1$);

- 2) $c_i = 1$, $i=1,2,\dots,r$,

and the function f_r is bithreshold, then f is the bithreshold Boolean function.

Proof. We use the induction on r (the number of members in the decision list). The base case, $r=1$, is easily seen to be true because every Boolean function of two variables is bithreshold (it is sufficient to verify the realizability of the functions $x \oplus y$ and $x \Leftrightarrow y$, as other 14 functions can be realized on single threshold units). Suppose, as an inductive hypothesis, that our proposition is true for all decision lists of cardinality no more r . Let we have the following decision lists $f = (f_1, c_1), (f_2, c_2), \dots, (f_r, c_r), (f_{r+1}, c_{r+1})$ of the length $r+1$. By the inductive hypothesis the decision list $f' = (f_2, c_2), \dots, (f_r, c_r), (f_{r+1}, c_{r+1})$ defines a bithreshold Boolean function. Let the corresponding bithreshold neuron has structure $(\mathbf{w}', t_1', t_2')$, and let $d = \sum_{i=1}^n |w'_i| + |t_1'| + |t_2'| + 1$. From conditions 1)-2) follow that the term (f_i, c_i) can has the following values:

- 1) $(0,1)$;
- 2) $(1,1)$;
- 3) $(x_i, 1)$;
- 4) $(\bar{x}_i, 1)$;
- 5) $(\bar{x}_i \bar{x}_j \vee x_i x_j, 1)$;
- 6) $(\bar{x}_i x_j \vee x_i \bar{x}_j, 1)$.

In the first case let $\mathbf{w} = \mathbf{w}'$, $t_1 = t_1'$, $t_2 = t_2'$. In the second case let $\mathbf{w} = 0$, $t_1 = 1$, $t_2 = 2$. In the third case let

$\mathbf{w} = \mathbf{w}' + d\mathbf{e}_i$, $t_1 = t_1'$, $t_2 = t_2'$, where $\mathbf{e}_i = (0, \dots, 0, 1, 0, \dots, 0)$.

In the fourth case let $\mathbf{w} = \mathbf{w}' - d\mathbf{e}_i$, $t_1 = t_1' - d$, $t_2 = t_2' - d$.

In the fifth we can assume $\mathbf{w} = \mathbf{w}' + d\mathbf{e}_i + d\mathbf{e}_j$, $t_1 = t_1' + d$, $t_2 = t_2' + d$. In the last case let $\mathbf{w} = \mathbf{w}' + d\mathbf{e}_i - d\mathbf{e}_j$, $t_1 = t_1'$, $t_2 = t_2'$.

Prove that in each case the decision list f is the bithreshold Boolean function realizable on the bithreshold unit with the structure (\mathbf{w}, t_1, t_2) . It is evident in two first cases.

In the third case for every $\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_i, \dots, x_n)$ $(\mathbf{w}, \mathbf{x}) = (\mathbf{w}' + d\mathbf{e}_i, \mathbf{x}) = (\mathbf{w}', \mathbf{x}) + dx_i$.

If $x_i = 1$, then the output value of the decision list is equal to 1 and

$$(\mathbf{w}, \mathbf{x}) = (\mathbf{w}', \mathbf{x}) + d \geq -\sum_{j=1}^n |w'_j| + \sum_{j=1}^n |w'_j| + |t_2'| + 1 > t_2' = t_2.$$

Thus, in this case the output value for the bithreshold neuron is equal to one for the decision list. If $x_i = 0$ then $(\mathbf{w}, \mathbf{x}) = (\mathbf{w}', \mathbf{x})$. By the inductive hypothesis the decision list $f' = (f_2, c_2), \dots, (f_r, c_r), (f_{r+1}, c_{r+1})$ is the bithreshold function realizable on the bithreshold neuron with the structure $(\mathbf{w}', t_1', t_2')$. Since $t_1' = t_1$, $t_2' = t_2$ that in the case $x_i = 0$ the output of the bithreshold neuron is identical to the out of the decision list. Thus, the function f is realizable on the bithreshold with the structure (\mathbf{w}, t_1, t_2) . In case 4 the proof is similar.

Let us consider case 5. Let $\mathbf{x} \in Z_2^n$. If $x_i = 0$ and $x_j = 0$, then

$$(\mathbf{w}, \mathbf{x}) = (\mathbf{w}', \mathbf{x}) \leq \sum_{k=1}^n |w'_k| < \sum_{k=1}^n |w'_k| + |t_2'| + 1 \leq t_1' + d = t_1.$$

If $x_i = 1$ and $x_j = 1$, then

$$\begin{aligned} (\mathbf{w}, \mathbf{x}) = (\mathbf{w}', \mathbf{x}) + 2d &\geq -\sum_{k=1}^n |w'_k| + 2d > |t_2'| + \\ &+ \sum_{k=1}^n |w'_k| + |t_1'| + |t_2'| + 1 \geq t_2' + d = t_2. \end{aligned}$$

In both cases the output of the bithreshold neuron is equal to 1. It corresponds to the output value of the decision list. If $x_i = 1$, $x_j = 0$ or $x_i = 0$, $x_j = 1$, then $(\mathbf{w}, \mathbf{x}) = (\mathbf{w}', \mathbf{x}) + d$.

Since $t_1 = t_1' + d$, $t_2 = t_2' + d$, then in both cases the output value of bithreshold neuron with the structure (\mathbf{w}, t_1, t_2) is equal to one of the neuron with the structure $(\mathbf{w}', t_1', t_2')$, which by the inductive hypothesis is equal to the output of the decision list. The proof in case 6 can be given by similar reasons.

Corollary 1. If a Boolean function of n variable can be represented as follows:

$$\begin{aligned} f(x_1, \dots, x_n) = g(x_1, \dots, x_n) \vee x_{i_1}^{\alpha_1} \vee \dots \vee x_{i_l}^{\alpha_l} \vee \\ \vee x_{j_1}^{\beta_1} x_{k_1}^{\gamma_1} \vee x_{j_1}^{\bar{\beta}_1} x_{k_1}^{\bar{\gamma}_1} \vee \dots \vee x_{j_m}^{\beta_m} x_{k_m}^{\gamma_m} \vee x_{j_m}^{\bar{\beta}_m} x_{k_m}^{\bar{\gamma}_m}, \end{aligned}$$

where $g(x_1, \dots, x_n)$ is an arbitrary bithreshold Boolean function, $x^1 = x$, $x^0 = \bar{x}$, $\alpha_i \in Z_2$ ($i=1, \dots, l$), $\beta_j \in Z_2$, $\gamma_j \in Z_2$ ($j=1, \dots, m$), then f is the bithreshold function.

The proof follows from the proposition 3 and the evident fact [6] that if the decision list satisfies $c_i = 1$, $i=1, \dots, r$, then $f = f_1 \vee \dots \vee f_r$.

Corollary 2. The Boolean function f defined by the following decision list

$$f = (f_1, 1), \dots, (f_r, 1), (x_{r+1}^{\alpha_1}, c_{r+1}), \dots, (x_{r+m}^{\alpha_m}, c_{r+m}),$$

where $\alpha_i \in Z_2, c_{r+i} \in Z_2, i=1, \dots, m$ is a bithreshold Boolean function if f_1, \dots, f_r satisfy the conditions of the proposition 3.

The proof follows from the proposition 3 and from [6] (according to the theorem 3.9 from [6] the decision list of the following form $(x_{r+1}^{\alpha_1}, c_{r+1}), \dots, (x_{r+m}^{\alpha_m}, c_{r+m})$ is a threshold and so a bithreshold Boolean function).

Feedforward neural nets with smoothed bithreshold activation function

Let us consider the problem of learning the neural net on the base of bithreshold neurons. As we have shown earlier this task is hard even for one neuron. These difficulties can be overcome in the same way as for traditional threshold neurons. It is enough to consider the neurons with continuous differentiable activation function. We call it the smoothed bithreshold function. Corresponding neuron can be named smoothed bithreshold neurons. It is possible to consider numerous smoothed analogue of hard bithreshold activation function (1). The ones of simplest are following:

$$y = 1 - 2e^{-x^2}, \quad (2)$$

$$y = \frac{2}{1 + e^{-10(x-1)}} - \frac{2}{1 + e^{-10(x+1)}} + 1. \quad (3)$$

Their graphs are shown on Fig. 2 (the graph of the function (3) is "closer" to the graph of the hard bithreshold function (1)).

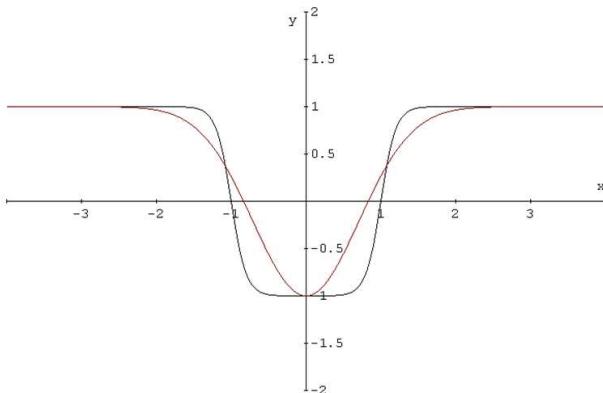


Fig. 2. – The graphs of the smoothed bithreshold activation functions (2)-(3)

We describe here a fairly simple neural net based on smoothed bithreshold neurons, namely the feedforward net (i.e. the multilayer perceptron). We used backpropagation to learn such nets. The network error and weight corrections are traditional and corresponding formulas are omitted.

Simulation

To compare the performance of feedforward neural nets based on smoothed bithreshold neurons and sigmoid nets we have implemented a simulation tests. We describe results of two typical tests of nets learning in online mode, in which we use the activation function (2) or (3), modified logistic sigmoid $y = \frac{2}{1 + e^{-x}} - 1$, $y = \tanh x$ and rational sigmoid $y = \frac{1}{1 + |x|}$.

In the first test we learned feedforward 100-10-3 nets (100 inputs, 10 hidden nodes and 3 outputs) for different activation functions on 100 different learning samples, each containing 500 training examples uniformly distributed in hypercube $[-1, 1]^{103}$. Then 1000000 iterations of backpropagation procedure are applied for every net. The learning rate parameter was individually chosen for every type of activation function.

Table 1 – Learning in the case of uniform distributed samples

Activation function	Average total sample error	Maximum error on example
modified logistic	31,27	0,38
$\tanh x$	44,81	0,34
rational sigmoid	53,49	0,85
smoothed bithreshold (2)	30,04	0,35

As seen in table 1, the empirical results prove that average total sample error was the least for smoothed bithreshold (2). The maximum error on example for this function is also fine in respect of other functions.

In the second test we trained 100-40-1 feedforward nets to map classical "hard" function XOR of 100 variables (strictly speaking we use the bipolar form of XOR). In the table 2 are given the result of computer simulation. The learning sample size was equal to 1000. For every net 300000 iterations of backpropagation procedure are applied.

Table 2 – Learning XOR function

Activation function	Maximum error on example
modified logistic	1,99
$\tanh x$	1,99
rational sigmoid	1,87
smoothed bithreshold (3)	0,24

As seen in table 2, learning finished successively only in the case of network based on smoothed bithreshold (3).

Results and discussion

It was demonstrated that the basic forms of the task of learning one bithreshold neural unit are hard. For example, it was proved that the task of verification of the bithreshold separability of the finite sets A^+ and A^- is NP-complete even in the case $A^+ \cup A^- \subset \{a, b\}^n$, where $a \in R$, $b \in R$ ($a \neq b$) and the weight coefficients of the neuron may be restricted to be from the set $\{-1, +1\}$.

The relation between bithreshold realizability and realizability by means of decision list was stated. The main result in this domain asserts that if we have the decision list $f = (f_1, 1), (f_2, 1), \dots, (f_{r-1}, 1), (f_r, 1)$, where f_i is an arbitrary Boolean function of two variables assigned the value 1 on two points ($i = 1, 2, \dots, r - 1$), and the function f_r is realizable on bithreshold unit, then the function f is also bithreshold.

The simulation results given in last section show that multilayer feedforward neural network with smoothed bithreshold-like activation functions can be learnt on the training sample using backpropagation. The data of table 2 confirms that they are capable to solve hard problem of the learning of the XOR-function of several variables.

Conclusions

Neural-like systems on the base of bithreshold neurons were studied. The NP-hardness of bithreshold neurons learning was established. Two ways were proposed to overcome the hardness of learning procedure. The conditions were found providing that decision list realizes a bithreshold logic function. The approach was proposed concerning neural networks with smoothed bithreshold activation functions. The experimental results confirming effectiveness of this approach were given. It seems that bithreshold neurons can be useful in areas of traditional applications of neural-like devices.

Список літератури

- 4 **Peled, U.** Polynomial-time algorithm for regular set covering and threshold synthesis / U. Peled, B. Simeone // *Discrete Applied Mathematics*. – 1985. – V. 12. – P. 57-69.
 - 5 **Бахарев, А.** Оптимизация многопороговых моделей / А. Бахарев // *Проблемы случайного поиска*. – 1975. – Вып. 4. – С. 209-214.
 - 6 **Anthony, M.** Discrete mathematics of neural networks / M. Anthony. – Philadelphia: SIAM, 2001.
 - 7 **Geche, F.** Bithreshold neurons learning / F. Geche, V. Kotsovsky, A. Batyuk, A. Mitsa, K. Gromaszek // *Wydzial Elektroniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej: Elektronika*. — Warszawa: SIGMA-NOT, 2013. — № 8. — P. 70-72.
 - 8 **Blum, A.** Training a 3-node neural network is NP-complete / A. Blum A., R. Rivest // *Neural Networks*. – 1992. – V. 5, № 1. – P. 117-127.
 - 9 **Garey, M. R.** Computers and intractability / M. R. Garey, D. S. Johnson. – New York: W. H. Freeman, 1979.
 - 10 **Rivest, R.** Learning decision lists / R. Rivest // *Machine Learning*. – 1987. – V. 2. – P. 229-246.
 - 11 **Marchand, M.** On learning simple neural concepts: From halfspace intersection to neural decision lists / M. Marchand, M. Golea // *Networks: Computation in Neural Systems*. – 1993. – V. 4. – P. 67-85.
- Bibliography (transliterated)**
- 1 **Haykin, S.** Neural networks: A comprehensive foundation. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, Inc., 1999.
 - 2 **Rosenblatt, F.** Principles of neurodynamics. – Washington, DC: Spartan Books, 1962.
 - 3 **Minsky, M. L., Papert, S. A.** Perceptrons, expanded editions. Cambridge, MA: MIT Press, 1988.
 - 4 **Peled, U., Simeone, B.** Polynomial-time algorithm for regular set covering and threshold synthesis. *Discrete Applied Mathematics*, 1985, **12**, 57-69.
 - 5 **Baharyev, A. T.** Optimization of multithreshold models. *Problemy sluchaiynogo poiska*, 1975, **4**, 209-214.
 - 6 **Anthony, M.** Discrete mathematics of neural networks. Philadelphia: SIAM, 2001.
 - 7 **Geche, F., Kotsovsky, V., Batyuk, A., Mitsa, A., Gromaszek, K.** Bithreshold neurons learning. *Wydzial Elektroniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej: Elektronika*. Warszawa: SIGMA-NOT, 2013, **8**, 70-72.
 - 8 **Blum, A., Rivest, R.** Training a 3-node neural network is NP-complete. *Neural Networks*, 1992, **5**(1), 117-127.
 - 9 **Garey, M. R., Johnson, D. S.** Computers and Intractability. New York: W. H. Freeman, 1979.
 - 10 **Rivest, R.** Learning decision lists. *Machine Learning*, 1987, **2**, 229-246.
 - 11 **Marchand, M., Golea, M.** On learning simple neural concepts: From halfspace intersection to neural decision lists. *Networks: Computation in Neural Systems*, 1993, **4**, 67-85.

Надійшла (received) 05.10.2015

УДК 621.37

ПРОБЛЕМНО-ОРИЄНТОВАНА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ВИЗНАЧЕННЯ СТАНУ ЕЛЕКТРОННОГО ПРИСТРОЮ ПО ВИХІДНИХ ІМПУЛЬСНИХ І АНАЛОГОВИХ СИГНАЛАХ

O. M. ЛЕВЧУК

Кафедра інформаційних управлюючих систем та технологій, Ужгородський національний університет, м. Ужгород,
УКРАЇНА
email: alex-levchuk@ya.ru

АННОТАЦІЯ У статті описано проблемно-орієнтовану ІТ визначення стану електронного пристрою по вихідних імпульсних і аналогових сигналах на прикладі пристрою для контролю функціонування системи електропостачання радіолокаційної станції, побудовано експертну систему визначення станів за допомогою лінгвістичних змінних та представлено модель прототипу пристрою визначення стану електронного пристрою на основі інтелектуальної технології ідентифікації.

Ключові слова: проблемно-орієнтована інформаційна технологія, електронний пристрій, експертна система, імпульсні сигнали, аналогові сигнали, технологія ідентифікації.

АННОТАЦИЯ В статье описано проблемно-ориентированную ИТ определения состояния электронного устройства по выходным импульсным и аналоговым сигналам на примере устройства для контроля функционирования системы электропитания радиолокационной станции, построена экспертная система определения состояний с помощью лингвистических переменных и представлена модель прототипа устройства определения состояния электронного прибора на основе интеллектуальной технологии идентификации.

Ключевые слова: проблемно-ориентированная информационная технология, электронное устройство, экспертная система, импульсные сигналы, аналоговые сигналы, технология идентификации.

PROBLEM-ORIENTED INFORMATION TECHNOLOGY DETERMINE THE STATE OF THE ELECTRONIC DEVICE ON THE PULSE AND ANALOG SIGNALS

O. LEVCHUK

Department of Informative and Operating Systems and Technologies, Uzhgorod National University, Uzhgorod, Ukraine

ABSTRACT This article describes a problem-oriented IT determine the state of the electronic device on the output pulse and analog signals. The main aim is to develop problem-oriented information technology (POIT) determine the state of the electronic device to output pulse and analog signals. The technology involves the use of the device model system of automatic control of power electronic devices for example radar station (RLS), which is used in the military industry. To implement has the following main objectives: identify the main input parameters of the power supply; build an expert system; describe the dependence of the results of the system input parameters; form a tree inference linguistic variables; define membership functions of linguistic variables; recognize the state of the electronic device. Main algorithms used in the article, researched and presented in the works of A.P. Rotshtein. We consider the construction of an expert system determine the states of the system with the help of linguistic variables. The process of building an expert system implemented by the algorithm: determine the characteristics of the system; form tree inference; determine the membership function variables; up Matrix knowledge and build fuzzy knowledge base. The implementation of technology-based intellectual method of identification and can solve the problem of control and operation of electrical devices. Feasibility technology allows to use it not only for the control and operation of the targeted systems, but also for the different classes other tasks. Investigation of problem-oriented technology and a prototype model of the device require further investigation, as the number of input parameters can vary depending on operating conditions.

Keywords: problem-oriented information technology, an electronic device, an expert system, the pulse signals, the analog signals, technology of identification.

Вступ

На сучасному етапі розвитку складно уявити будь-яку галузь науки, техніки чи промисловості без прогресивного впровадження в них інформаційних технологій (ІТ). ІТ вже давно отримали своє поширення у інформатиці, радіотехніці, фізиці, хімії та інших промислових галузях. Не винятком є така галузь промисловості як електроніка. ІТ дозволили не

тільки комп'ютеризувати пристрої, але і впровадити додаткові можливості, що дозволяють в режимі реального часу відслідковувати зміни в тому чи іншому процесі. Тому актуальним є застосування інтелектуальних інформаційних технологій в електронних пристроях, тобто галузі, що займається виявленням та розпізнаванням різних станів таких систем, наприклад, як радіолокаційні станції [1-4]. Крім військових задач радіолокаційні засоби широко

використовуються для навігації літаків і кораблів; вони є важливим елементом сучасних систем управління повітряним рухом; використовуються для управління рухом автомобільного транспорту і т.д. [3-6]. Для нормального функціонування будь-який електронний пристрій повинен містити надійну систему електроживлення, за працездатність якої відповідає пристрій контролю системи електроживлення [2]. Один з таких пристрій було описано та розроблено у [7].

Мета роботи

Основною метою дослідження є розроблення проблемно-орієнтованої інформаційної технології (ПО ІТ) визначення стану електронного пристрою по вихідних імпульсних і аналогових синалах. Розробка технології передбачає використання моделі пристроя автоматичного контролю функціонування системи електроживлення електронного пристрою на прикладі радіолокаційної станції (РЛС) 19 ЖС [7], яка використовується у військовій промисловості. Для реалізації ставляться наступні основні завдання:

- визначити основні вхідні параметри системи електророживлення;
 - побудувати експертну систему;
 - описати залежність результатів роботи системи від вхідних параметрів;
 - сформувати дерево логічного виводу лінгвістичних змінних;
 - визначити функції приналежності лінгвістичним змінним;
 - розпізнати стан електронного пристрою.

Виклад основного матеріалу

Пристрій контролю функціонування електронного пристрою містить (рис.1) пікові детектори 1 запам'ятовування пікових значень імпульсних і аналогових вихідних сигналів електронного пристрою 2 [5]. Швидкість наростання імпульсного сигналу, що запам'ятується, піковим детектором на операційних підсилювачах LF 355 становить 2 В/мкс. Отже, тривалість імпульсу τ_u повинна бути $\tau_u \geq U_u / 2$, де U_u - амплітуда вихідного імпульсного сигналу. Скидання пікового детектора здійснюється коротким імпульсом обчислювача 3.

Обчислювач 3 забезпечує знімання, запам'ятовування й перетворення у двійковий код амплітуд вихідних сигналів електронного пристроя 2, а також її обробку для визначення стану електронного пристроя 2. У якості обчислювача 2 може використовуватися ЕОМ, оснащена пристроям зв'язку із зовнішніми функціональними елементами.

З виходів пікових детекторів 1 напруги вихідних сигналів надходять на входи схем 4 вибірки-запам'ятовування. Вибірка напруги імпульсного сигналу здійснюється подачею на перший вхід схеми

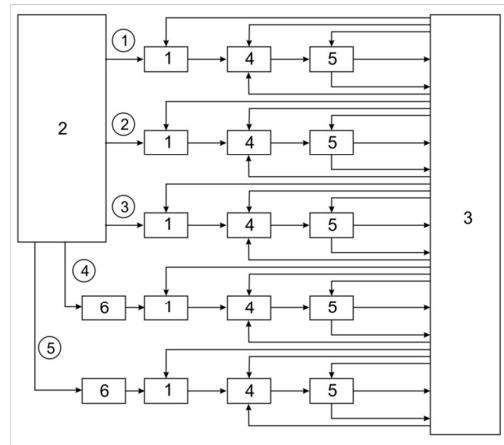


Рис.1. – Схема пристрою контролю функціонування електронного пристроя.

4 вибірки-запам'ятовування напруги +15В с обчислювача 3, запам'ятовування - подачею на другий вхід схеми 4 напруги -15В. Вихідні сигнали електронного пристрою 2 запам'ятаються такими, якими вони були в момент часу надходження напруги -15В.

Напруги вихідних сигналів з виходів схем 4 вибірки-запам'ятовування надходять на входи аналого-цифрових перетворювачів 5 для їхнього перетворення, по сигналах обчислювача 3, у двійковий код. Зчитування двійкових кодів напруг вихідних сигналів електронного пристрою 2 в обчислювач 3 проводиться по сигналах готовності аналого-цифрових перетворювачів 5.

Аналогові вихідні сигнали електронного пристрою 2 надходять на входи амплітудних детекторів 6, що працюють у режимі лінійного детектування. Амплітудні детектори 6 забезпечують виділення амплітуд вихідних аналогових сигналів [6]. Напруги з виходів детекторів 6 надходять на вхід відповідних пікових детекторів 1.

Нехай працездатність електронного пристрою визначається, наприклад, по п'ятьом його вихідним сигналам: трьом імпульсним і двом аналоговим. По параметрах і наявності цих сигналів на підставі інтелектуальної технології ідентифікації виконується розпізнавання стану пристрою (його працездатність).

Процес побудови експертної системи виконується по алгоритму [9]:

- ## 1. Визначають характеристики системи.

На цьому етапі визначають вихідні об'єкти, що ідентифікуються.

2. Формують дерево логічного виводу (рис.2).

Для формування дерева логічного виводу визначають назву змінної, її позначення, кількість і назви термів для її оцінки, діапазон її зміни.

3. Визначають функції приналежності змінних.

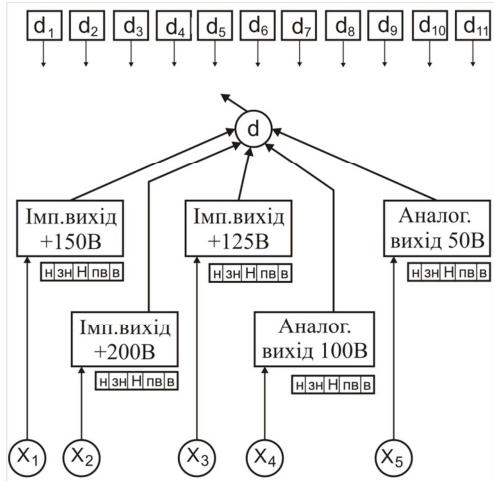


Рис. 2 – Дерево прийняття рішень (логічного виводу)

4. Складають матриці знань.

В результаті нечіткого логічного виводу отримують функції приналежності вихідної змінної кожному з класу рішень.

Можливі стани електронного пристрою задамо множиною $d \in (d_1, d_2, d_3, d_4, d_5, d_6, d_7, d_8, d_9, d_{10}, d_{11})$ станів, де:

d_1 – нормальне функціонування електронного пристрою;

d_2 – предаварійний стан ланцюга формування імпульсної напруги вихідного сигналу +200 В на першому вихіді електронного пристрою (відповідає стійкому надходженню зниженої або підвищеної напруги імпульсів сигналу на перший вихід електронного пристрою (рис.1);

d_3 – відмова ланцюга формування імпульсної напруги вихідного сигналу +200 В (відповідає надходженню низької або високої напруги імпульсів сигналу на перший вихід електронного пристрою);

d_4 – предаварійний стан ланцюга формування імпульсної напруги вихідного сигналу +150 В на другому вихіді електронного пристрою (відповідає стійкому надходженню зниженої або підвищеної напруги імпульсів сигналу на другий вихід електронного пристрою);

d_5 – відмова ланцюга формування імпульсної напруги вихідного сигналу +150 В (відповідає стійкому надходженню низької або високої напруги імпульсів сигналу на другий вихід електронного пристрою);

d_6 – предаварійний стан ланцюга формування імпульсної напруги вихідного сигналу +125 В на третьому вихіді електронного пристрою;

d_7 – відмова ланцюга формування імпульсної напруги вихідного сигналу +125 В на третьому вихіді електронного пристрою (відповідає стійкому надходженню низької або високої напруги імпульсів сигналу на третій вихід електронного пристрою);

d_8 - предаварійний стан ланцюга формування аналогового вихідного сигналу 100 В на четвертому вихіді електронного пристрою (відповідає стійкому надходженню зниженої або підвищеної аналогової напруги сигналу на четвертий вихід електронного пристрою (рис.2));

d_9 - відмова ланцюга формування аналогового вихідного сигналу 100 В на четвертому вихіді електронного пристрою (відповідає стійкому надходженню низької або високої напруги сигналу на четвертий вихід електронного пристрою (рис.2));

d_{10} - предаварійний стан ланцюга формування аналогового вихідного сигналу 50 В на п'ятому вихіді електронного пристрою (відповідає стійкому надходженню зниженої або підвищеної аналогової напруги вихідного сигналу на п'ятий вихід електронного пристрою);

d_{11} - відмова ланцюга формування аналогового вихідного сигналу 50 В на п'ятому вихіді електронного пристрою (відповідає стійкому надходженню низької або високої аналогової напруги вихідного сигналу на п'ятий вихід електронного пристрою).

Перераховані вище стани підлягають розпізнаванню з наступними параметрами (діапазони зміни вказані експертами та зазначені в табл.1):

x_1 – імпульсний вихідний сигнал +200 В ($170B < U < 230B$);

x_2 – імпульсний вихідний сигнал +150 В ($127,5B < U < 172,5B$);

x_3 – імпульсний вихідний сигнал +125 В ($106,25B < U < 143,75B$);

x_4 – аналоговий вихідний сигнал $U = 100$ В ($85B < U < 115B$);

x_5 – аналоговий вихідний сигнал $U = 50$ В ($42,5B < U < 57,5B$).

Примітка: при виході значень сигналів за зазначені діапазони стан електронного пристрою розпізнається як "відмова".

Наступний етап - побудова нечіткої бази знань [8]. Визначені вище параметри $x_1 - x_5$ розглядаються як лінгвістичні змінні. Введено лінгвістичну змінну d - стан електронного пристрою, який визначається множиною можливих станів $d_1 - d_{11}$.

Таблиця 1 – Лінгвістичні змінні

Позначення і назва змінної	Множина можливих значень	Терм для оцінок
імпульсний вихідний сигнал +200В - x_1	(170 – 230) В	низький (н), знижений (зн), норма (Н), підвищений (пв), високий (в)
імпульсний	(127,5 – 172,5) В	низький (н),

вихідний сигнал +150 В - x_2		знижений (зн), норма (Н), підвищений (пв), високий (в)
імпульсний вихідний сигнал +125 В - x_3	(106,25 – 143,75) В	низький (н), знижений (зн), норма (Н), підвищений (пв), високий (в)
аналоговий вихідний сигнал $U = 100$ В - x_4	(85 – 115) В	низький (н), знижений (зн), норма (Н), підвищений (пв), високий (в)
аналоговий вихідний сигнал $U = 50$ В - x_5	(42,5 – 57,5) В	низький (н), знижений (зн), норма (Н), підвищений (пв), високий (в)

Структура моделі для визначення стану електронного пристрою показана на фіг.1 у вигляді дерева логічного виводу, що відповідає стану

$$d = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5). \quad (1)$$

Для оцінки значень лінгвістичних змінних використовуються шкали якісних термів, наведені в таблиці 1. Кожний із цих термів представляє нечітку множину, задану за допомогою відповідних функцій приналежності [9].

Для того, щоб записати логічні рівняння, що зв'язують функції приналежності зі станом електронного пристрою, складається таблиця знань про співвідношення (1) (Табл.2).

Таблиця 2 – Таблиця знань про співвідношення (1)

x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	d
Н	Н	Н	Н	Н	d_1
пв	Н	Н	Н	Н	d_2
зн	Н	Н	Н	Н	
н	Н	Н	Н	Н	d_3
в	Н	Н	Н	Н	
Н	пв	Н	Н	Н	d_4
Н	зн	Н	Н	Н	
Н	н	Н	Н	Н	d_5
Н	в	Н	Н	Н	
Н	Н	пв	Н	Н	d_6
Н	Н	зн	Н	Н	
Н	Н	н	Н	Н	d_7
Н	Н	в	Н	Н	
Н	Н	Н	пв	Н	d_8
Н	Н	Н	зн	Н	
Н	Н	Н	н	Н	d_9
Н	Н	Н	в	Н	
Н	Н	Н	Н	пв	d_{10}
Н	Н	Н	Н	зн	
Н	Н	Н	Н	Н	d_{11}
Н	Н	Н	Н	в	

Використовуючи таблицю знань про співвідношення (1) і операції $(I - \min)$ і \vee (чи $- \max$), запишемо систему логічних рівнянь, що зв'язують стан електронного пристрою із вхідними змінними:

$$\mu^{d_1} = \mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5). \quad (2)$$

$$\mu^{d_2} = [\mu^{ne}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)] \vee [\mu^{zh}(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)]. \quad (3)$$

$$\mu^{d_3} = [\mu^n(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)] \vee [\mu^e(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)]. \quad (4)$$

$$\mu^{d_4} = [\mu^H(x_1) \cdot \mu^{ne}(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)] \vee [\mu^H(x_1) \cdot \mu^{zh}(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)]. \quad (5)$$

$$\mu^{d_5} = [\mu^H(x_1) \cdot \mu^n(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)] \vee [\mu^H(x_1) \cdot \mu^e(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)]. \quad (6)$$

$$\mu^{d_6} = [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{ne}(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)] \vee [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^{zh}(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)]. \quad (7)$$

$$\mu^{d_7} = [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^e(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)] \vee [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^n(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^H(x_5)]. \quad (8)$$

$$\mu^{d_8} = [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^{ne}(x_4) \cdot \mu^H(x_5)] \vee [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^{zh}(x_4) \cdot \mu^H(x_5)]. \quad (9)$$

$$\mu^{d_9} = [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^n(x_4) \cdot \mu^H(x_5)] \vee [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^e(x_4) \cdot \mu^H(x_5)]. \quad (10)$$

$$\mu^{d_{10}} = [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^{ne}(x_5)] \vee [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^{zh}(x_5)]. \quad (11)$$

$$\mu^{d_{11}} = [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^n(x_5)] \vee [\mu^H(x_1) \cdot \mu^H(x_2) \cdot \mu^H(x_3) \cdot \mu^H(x_4) \cdot \mu^e(x_5)]. \quad (12)$$

Розраховують функції приналежності змінних нечітким термам (н, зн, Н, пв, в). Зміни цих змінних зводяться до універсального інтервалу $[0; 4]$ за допомогою наступних співвідношень:

$$u = n \frac{x_i - \underline{x}_i}{\overline{x}_i - \underline{x}_i}, \quad (13)$$

де $[\underline{x}_i; \overline{x}_i]$ – інтервал зміни змінних $x_1 - x_5$, $n = 4$.

Аналітична модель функції приналежності має вигляд:

$$\mu^j(u) = \frac{1}{1 + \left(\frac{u-b}{c}\right)^2}, \quad (14)$$

а її параметри для змінних $x_1 - x_5$ наведено нижче.

Терм	н	зн	Н	пв	в
b	0	1	2	3	4
c	1	1	1	1	1

де c – коефіцієнт розширення.

При ненадходженні якого-небудь із вихідних сигналів електронного пристрою, в якості його значення приймається нижня границя припустимого інтервалу його зміни.

Рішення про працездатність електронного пристрою ухвалиється по алгоритму:

1. Вимірюються значення змінних з табл.1., що визначають електронного пристрою $x^* = (x_1^*, x_2^*, x_3^*, x_4^*, x_5^*)$.
2. Використовуючи (13), (14) і параметри b та c , розраховують функції приналежності $\mu^j(x_i)$.
3. Використовуючи логічні рівняння, обчислюють значення функцій приналежності μ^{d_j} при векторі стану $\bar{x}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$ для станів $d_1 - d_{11}$.
4. Визначається розв'язок d_j , для якого

$$\mu^{d_j}(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) = \max_{j=1,11} \mu^{d_j}. \quad (15)$$

Обговорення результатів

У якості прикладу було розглянуто випадок, коли з виходу електронного пристрою надходять наступні значення вихідних сигналів: $x_1 = +185B$, $x_2 = +150B$, $x_3 = +125B$, $x_4 = +100B$, $x_5 = 50B$.

Термам вихідного імпульсного сигналу x_1 (200 B) відповідають наступні інтервали напруг:

н: $U < 170B$;
 зн: $170B < U < 190B$;
 Н: $190B < U < 210B$;
 пв: $210B < U < 230B$;
 в: $230B < U$ (відмова).

$$\mu^n(x_1) = 0,5, \quad \mu^z(x_1) = 1, \quad \mu^H(x_1) = 0,5,$$

$$\mu^{ne}(x_1) = 1, \quad \mu^e(x_1) = 0,2.$$

Аналогічно для $x_2 - x_5$:

$$\mu^n(x_2) = 0,2, \quad \mu^z(x_2) = 0,5, \quad \mu^H(x_2) = 1,$$

$$\mu^{ne}(x_2) = 0,5, \quad \mu^e(x_2) = 0,2.$$

$$\mu^n(x_3) = 0,2, \quad \mu^z(x_3) = 0,5, \quad \mu^H(x_3) = 1,$$

$$\mu^{ne}(x_3) = 0,5, \quad \mu^e(x_3) = 0,2.$$

$$\mu^n(x_4) = 0,2, \quad \mu^z(x_4) = 0,5, \quad \mu^H(x_4) = 1,$$

$$\mu^{ne}(x_4) = 0,5, \quad \mu^e(x_4) = 0,2.$$

$$\mu^n(x_5) = 0,2, \quad \mu^z(x_5) = 0,5, \quad \mu^H(x_5) = 1,$$

$$\mu^{ne}(x_5) = 0,5, \quad \mu^e(x_5) = 0,2.$$

Після підстановки функцій приналежності в (2) - (12) визначаємо, що максимальне значення має d_2 ,

що відповідає зниженому (предаварійному) значенню імпульсного вихідного сигналу +200 B.

Висновки

Реалізація технології заснована на методиці інтелектуальної ідентифікації, відноситься до ПО ІТ [10] та дає змогу вирішити завдання контролю та функціонування електричних пристрій на прикладі прототипу для РЛС, проаналізувати стан системи в режимі реального часу. Практична реалізація даної технології може застосовуватись не лише для контролю та функціонування цілеспрямованих систем, а й для різного класу інших завдань, наприклад, в сільському господарстві, спорті та інших. Незважаючи на переваги інтелектуальної технології ідентифікації, дослідження її застосування та модель прототипу самого приладу потребують подальших досліджень, оскільки кількість вхідних параметрів може варіюватись в залежності від умов функціонування.

Список літератури

- 1 **Файнзильберг, Л. С.** Математические методы оценки полезности диагностических признаков: монография / **Л. С. Файнзильберг** // Междунар. научно-учебный центр информационных технологий и систем НАН и МОН Украины. – К.: Освіта України. – 2010. – 152 с.
- 2 **Левчук, О.М.** Прогнозування очікуваних результатів на основі інтелектуальної технології ідентифікації / **О. М. Левчук** // Науково-технічна інформація. – 2010 – №1(43). – С.72-77.
- 3 **Shtovba, S. D.** Ensuring Accuracy and Transparency of Mamdani Fuzzy Model in Learning by Experimental Data / **S. D. Shtovba** // Journal of Automation and Information Sciences. – 2007. – V. 39 № 8. – P. 39-52.
- 4 **Rotshtein, A. P.** Cause and effect analysis by fuzzy relational equations and a genetic algorithm / **A. P. Rotshtein, M. Posner, H. B. Rakytanska** // J. Reliability Engineering & System Safety. – 2006. – № 91 (9), – P. 1095-1101.
- 5 **Rotshtein, A.** Algebra of Algorithms and Fuzzy Logic in System Reliability Analyses / **A. Rotshtein** // Journal of Computer and System Sciences International, – 2010. – № 49(2). – P. 254-264.
- 6 **Rotshtein, A.** Fuzzy Algorithmic Simulation of Reliability: Control and Correction Resource Optimization / **A. Rotshtein, D. Katel'nikov** // Journal of Computer and System Sciences International, – 2010. – № 49(6), – P. 967-971.
- 7 **Тарасов, В. О.** Патент №56332 Україна. МПК G 01 S 13/00. Пристрій контролю функціонування системи електроріживлення електронного пристрою по методу інтелектуальної технології ідентифікації / **В. М. Зіненко, О. М. Левчук** – № 201007737; заявл. 21.06.2010; опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1/2011.
- 8 **Rotshtein, A.** Applied Fuzzy Systems / **A. Rotshtein, H. B. Rakytanska** // J. Fuzzy Evidence in Identification, Forecasting and Diagnosis. – 2012. – № 275. – P. 259-313.
- 9 **Ротштейн, А. П.** Интеллектуальные технологии идентификации: нечеткая логика, генетические

- алгоритми, нейронні сітки / А. П. Ротштейн // Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця – 1999 – 320 с.
- 10 **Levchuk, O.** A system approach in research of the problem-focused information technologies / O. Levchuk // Збірник праць IV Міжнародної конференції «Нові інформаційні технології в освіті для всіх: інноваційні методи та моделі», м. Київ. – 2009. – С.101 - 104.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Fainzilberg, L. S.** Mathematical methods for evaluating the usefulness of diagnostic features: monograph International Research and Training Center for Information Technologies and Systems NAS and MES of Ukraine. Kyiv: Osvita Ukraine, 2010, 152 p.
- 2 **Levchuk, O. M.** Prediction of the expected results on the basis of intellectual identification technology. Naukovo-tehnichna informaciya, 2010, 1(43), 72-77.
- 3 **Shtovba, S. D.** Ensuring Accuracy and Transparency of Mamdani Fuzzy Model in Learning by Experimental Data. *Journal of Automation and Information Sciences*, 2007, 39(8), 39-52.
- 4 **Rotshtein, A. P., Posner, M., Raktyanska, H. B.** Cause and effect analysis by fuzzy relational equations and a genetic algorithm. *J. Reliability Engineering & System Safety*, 2006, 91 (9), 1095-1101.
- 5 **Rotshtein, A.** Algebra of Algorithms and Fuzzy Logic in System Reliability Analyses. *Journal of Computer and System Sciences International*, 2010, 49(2), 254-264.
- 6 **Rotshtein, A., Katel'nikov, D.** Fuzzy Algorithmic Simulation of Reliability: Control and Correction Resource Optimization. *Journal of Computer and System Sciences International*, 2010, 49(6), 967-971.
- 7 **Tarasov, V. O., Zinenko V. M., Levchuk O. M.** Patent №56332 Ukraine. MPK G 01 S 13/00. Prystryi kontrolyu funkcionuvannya systemy elektrozhyvleniya po metodu intelektualnoi tehnologii identyfikacii. № 201007737; zayav. 21.06.2010; opubl. 10.01.2011, Bul. № 1/2011.
- 8 **Rotshtein, A., Raktyanska, H. B.** Applied Fuzzy Systems. *J. Fuzzy Evidence in Identification, Forecasting and Diagnosis*, 2012, 275, 259-313.
- 9 **Rotshtein, A.P.**, Intelligent identification technology: fuzzy logic, genetic algorithms, neural networks. Vynnytsya: Universum-Vynnytsya, 1999, 320 p.
- 10 **Levchuk, O.** A system approach in research of the problem-focused information technologies. *Proceedings of the IV International Conference "New Information Technologies in Education for All: Innovative Methods and Models"*, Kyiv, 2009, 101-104.

Наодійшила (received) 22.09.2015

УДК 004.932.72'1

**МЕТОД ІЕРАРХИЧЕСКОГО ОТОЖДЕСТВЛЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ КАДРА
АСТРОНОМИЧЕСКОГО ТЕЛЕСКОПА С ФОРМУЛЯРАМИ ЗВЕЗДНОГО
КАТАЛОГА**

Н. Ю. ДИХТИЯР, В. Е. САВАНЕВИЧ, Я. С. МОВСЕСЯН*

*Кафедра електронних вычислювальних машин, Харківський національний університет радіоелектроники, Харків,
УКРАЇНА*

*email: movsesian.iana@gmail.com

АНОТАЦІЯ У статті розробляється метод ієрархічного отождествлення вимірювань кадру астрономічного телескопа з формуллярами зіркового каталогу. Для отримання рішення про істинність однієї з великої кількості зазвичай рівноправних гіпотез, у статті використовується метод відсіюваючого експерименту, який в свою чергу, зведеній до задачі послідовного аналізу. Даний метод ієрархічного отождествлення вимірювань кадру з формуллярами каталогу дозволяє вирішити завдання отождествлення з найменшими обчислювальними витратами і найменшим середнім ризиком.

Ключові слова: ієрархічне отождествлення, ВП, ПВ, ПВФ, середній ризик.

АННОТАЦИЯ В статье разрабатывается метод иерархического отождествления измерений кадра астрономического телескопа с формуллярами звездного каталога. Для получения решения об истинности одной из большого числа обычно равноправных гипотез, в статье используется метод отсеивающего эксперимента, который в свою очередь, сведен к задаче последовательного анализа. Данный метод иерархического отождествления измерений кадра с формуллярами каталога позволяет решить задачу отождествления с наименьшими вычислительными затратами и наименьшим средним риском.

Ключевые слова: иерархическое отождествление, РП, ПИ, ПРФ, средний риск.

METHOD OF HIERARCHICAL IDENTIFICATION THE MEASUREMENTS OF THE FRAME OF ASTRONOMICAL TELESCOPE WITH THE FORMS OF STAR CATALOG

M. DIKHTYAR, V. SAVANEVYCH, Ia. MOVSESIAN

Department of Electronic Computers, Kharkov National University of Radio Electronics, Kharkov, UKRAINE

ABSTRACT Developed method of hierarchical identifying the measurements of the frame astronomical telescope with the forms of the star catalog. In the article studies the task identification of measurements (the task of finding of pairwise the correspondence between the set formed measurements of the frame astronomical telescope and a set of objects star catalog, belonging to the same region of the sky that formed the frame). The space observation in the article is called the space measurements (SM), and includes, by definition, the set of all possible measurement parameters. To find the computer implementation of Bayesian splitting space of measurements with minimal cost. In the article used the method of sieving experiments. Developed method of hierarchical identification identifying measurements of frame astronomical telescope with the forms of the star catalog has minimal average risk (risk Bayesian) classification and minimal computational cost of its implementation of all possible Bayesian classifiers. The minimum computational costs provided using a simple set of hierarchically organized simple decision functions (SDF), which are used to splitting the area of space measurements nested in her non-overlapping area. This splitting using the simple set of hierarchically organized (SDF) defines indicators of quality classification. Using a set of hierarchically organized simple decision functions in solving the task of statistical hypothesis testing is reduced to the task of sequential analysis, which is called the task consistent multialternative hypotheses with their hierarchical pre-selection. Developed method of hierarchical identifying measurements of frame astronomical telescope with the forms of the star catalog solves the task of identifying with the lowest computational cost and the smallest average risk.

Keywords: hierarchical identifying, DR, SM, SDF, average risk

Введение

Не смотря на прогрессирующий рост производительности вычислительных средств, существует достаточно большое количество практически значимых задач, точное решение которых не может быть достигнуто за какое-либо допустимое время.

По мере накопления знаний и развития техники растет число различаемых объектов различной природы. При этом возрастает сложность процедур, систем классификации объектов по результатам проведенного эксперимента.

Значительная часть статистических классификационных задач может быть сведена к задаче проверки многоальтернативных гипотез в

соответствии с одним из критериев байесовской группы [1, 2]. В ряде случаев существенные вычислительные затраты на реализацию данных процедур. При этом существуют условия, при которых возможно сокращение указанных затрат на порядки без потерь в показателях качества классификации.

Цель работы

Целью статьи является разработка метода иерархического отождествления измерений кадров астрономического телескопа с формуллярами звездного каталога, используя при этом минимальные вычислительные затраты.

Изложение основного материала

Постановка задачи. Синтез решающего правила процедур проверки многоальтернативных гипотез по критерию минимума среднего риска осуществляется при заданных функции правдоподобия, априорных вероятностях гипотез и матрице потерь. Выборка представляется в дискретной форме и содержит определенное количество параметров.

Так как в статье исследуется задача отождествления измерений (в смысле отнесения каждого измерения к одному из объектов используемого звездного каталога) то, пространство наблюдений в работе будет называться пространством измерений (ПИ) и будет включать в себя, по определению, совокупность всех возможных параметров измерений.

Предполагается, что каким - либо образом можно упорядочить гипотезы о принадлежности измерений кадра формулярам звездного каталога, а так же то, что в одну и ту же точку пространства измерений могут попасть выборки, соответствующие только совокупности соседних гипотез.

При классификации измерения (оценки параметров положения и блеска) небесных объектов, содержащиеся в формуляре используемого звездного каталога, прогнозируются на время измерения (формирования CCD-кадра [3, 4]). Поэтому и формуляры каталога и измерения имеют одинаковые размерность и используемые параметры. Следовательно, имеет место формальная возможность отображения формуляра каталогов в точку пространства измерений.

Необходимо найти способ вычислительной реализации байесовского разбиения пространства измерений с минимальными вычислительными затратами.

Анализ литературы

Методика синтеза оптимальных процедур проверки многоальтернативных гипотез (ПМАГ) известна [5, 6]. В ее рамках находится наилучшее

разбиение пространства измерений, а также указывается способ определения области пространства измерений, которой принадлежит рассматриваемая выборка. Таким способом является, например, вычисление всех (по количеству гипотез $H_{infrjnc}$) получении измерения от объекта с оценками его параметров в каталоге $\hat{\theta}_{catjnc}$) вероятностей формирования рассматриваемой выборки при условии, что она соответствует конкретной гипотезе с последующим выбором гипотезы с максимальной условной вероятностью, минимальным апостериорным риском и т.д. При этом для принятия решения необходимо формирование совокупности статистик из Q_c или $Q_c - 1$ элементов.

Разбиение ПИ определяет показатели качества классификации измерений. Наилучшему разбиению ПИ соответствует наименьший средний риск, называемый байесовским риском [7]. Это безусловный факт. Однако нет никаких доводов в пользу того, что указанный способ реализации процедур классификации является наилучшим. Вычислительные затраты на классификацию измерений определяются способом разбиения ПИ на области.

К сожалению, задача одновременного синтеза оптимальных алгоритмов статистических решений и стабилизации их затрат крайне редко находит свое решение [8]. Часто до синтеза алгоритмов не известны даже операции, которые следует выполнить над выборкой.

Затраты при решении подобных задач сводятся к вычислительным затратам.

Интуитивно понятно, что сложность, затраты решающих алгоритмов определяются характеристиками пространства измерений (ПИ). В связи с этим задача стабилизации затрат алгоритмов статистических выводов может быть решена ограничением ПИ, т.е. входных воздействий данных алгоритмов [9, 10]. При этом необходимо найти способ вычислительной реализации байесовского разбиения ПИ с минимальными затратами можно используя метод отсеивающего эксперимента [11].

Метод отсеивающего эксперимента. Теория отсеивающего эксперимента имеет достаточно большой набор постановок задач. Одна из них такова [11]. Имеется функция отклика, которая может зависеть, от большого количества факторов Q_{max} . Предполагается, что в исследуемом случае функция отклика зависит от Q_c значимых факторов ($Q_c < Q_{max}$). С помощью как можно меньшего количества N вычислений функции отклика нужно найти номера значимых факторов. Целью отсеивающего эксперимента является получение решения об истинности одной из большого количества обычно равноправных гипотез о номерах значимых факторов. Практический пример использования метода отсеивающего эксперимента

следующий. Вместо индивидуального обследования крови большой группы доноров для выявления редкого заболевания исследуются небольшие группы. Проверка позволяет обнаружить группы с больными. Полному обследованию далее подвергается только кровь доноров из этих групп [11].

Может показаться, что в отсеивающем эксперименте одна и та же выборка (одно и то же измерение) многократно поступает на обработку. Это не может улучшить показатели качества принимаемых решений в общем случае и отождествления измерений кадра и объектов каталога в исследуемой задаче. Однако это не так. В отсеивающем эксперименте на каждом этапе используются отдельные признаки выборки (измерения). Причем на каждом используются очередные, не использованные ранее, признаки.

Метод поблочной (побитной) обработки. Часто результат эксперимента считается неделимым «квантом» данных. Однако существует возможность рассмотрения результата эксперимента как набора признаков, обоснованная хотя бы дискретной формой его представления. Каждый бит кода результата эксперимента можно считать бинарным признаком. При этом биты данных могут поступать на процедуру обработки по одному, а очередьность и окончание их поступления может определяться некоторым правилом. Тогда формирование выборки, используемой в процедуре обработки, осуществляется пошагово путем выбора определенного бита вплоть до останова этого процесса. В ряде случаев отдельные биты входных данных не хранятся отдельно, а объединяются в блоки. Такую процедуру обработки можно назвать методом поблочной или, в частном случае, побитной обработки (ПБО) [12].

Указанный метод достаточно удобен при формализации и оптимизации иерархических процедур обработки данных [13]. Ее использование позволяет разрешить противоречие между иерархической структурой множества состояний и неиерархической структурой существующих оптимальных алгоритмов обработки данных [8].

Необходимым условием использования последовательного анализа является наличие статистического описания каждого блока (биты).

Способы разбиения пространства измерений. Исходя из выше сказанного, можно разделить способы разбиения ПИ на одношаговые и многошаговые или иерархические. При одношаговом способе разбиения принадлежность измерения одной из непересекающихся областей определяется за один шаг [14, 15]. При этом зачастую вычислительная схема данного шага является громоздкой. Если каждый раз проверять все имеющиеся гипотезы

H_{infrnc} о получении измерения от объекта с оценками его параметров в каталоге $\hat{\theta}_{catine}$, то отождествление с использованием РП требует Q_c операций расчета вероятностей формирования измерения при условии,

что оно принадлежит каждому из небесных объектов.

При использовании многошагового (иерархического) способа классификации ПИ разбивается иерархически [16]. На первом шаге ПИ разбивается на непересекающиеся области, на втором шаге эти области разбиваются на подобласти и т.д.

Для определенности процедуры разбиения области ПИ на вложенные в нее непересекающиеся подобласти в работе названы простыми решающими функциями (ПРФ, SDF – Simple decision functions). При этом иерархическая классификация измерений представляет собой применение совокупности иерархически организованных ПРФ.

Множество допустимых ПРФ. В методе иерархической классификации ПРФ используются для разбиения области ПИ на вложенные в нее непересекающиеся области. [17]. Для построения иерархической классификации должно быть задано множество допустимых к использованию ПРФ. Например, путём перечисления их свойств. В работе предлагается использовать стробовые, байесовские, однокоординатные ПРФ.

ПРФ стробового вида определяют факт попадания измерения в строб (область кадра) того или иного объекта. ПРФ байесовского вида реализует одношаговую байесовскую классификацию измерения над заданной под областью ПИ.

Однокоординатные ПРФ разбивают область ПИ на две и более по одной из координат.

Двух и многокоординатные линейные и нелинейные ПРФ исключены из рассмотрения, исходя из соображений вычислительной/технической реализуемости, принимая во внимание вычислительную сложность представления границ соответствующих областей ПИ. При использовании однокоординатных ПРФ границы областей вырождаются в граничные значения параметров классификации, являющиеся их параметрами.

Для построения иерархической классификации используется два типа однокоординатных ПРФ. ПРФ, делящие ПИ на две части, можно назвать бинарными. ПРФ, делящие ПИ на k_{hist} равных частей, можно назвать гистограммыми.

Разбиение области ПИ ПРФ бинарного типа эквивалентно разбиению интервала значений одного из параметров классификации в данной области на два интервала. Последние могут иметь разную или одинаковую длину.

ПРФ гистограммного типа делят аналогичный интервал на k_{hist} одинаковых интервалов. Количество интервалов k_{hist} принимает одно из наперед заданных значений $k_{hist} = \overline{1, K_{max}}$, где K_{max} – максимально возможное количество интервалов.

Для задания параметров ПРФ бинарного типа по каждому параметру формируются последовательности номеров формулаторов небесных объектов в каталоге. Номера формулаторов в последовательности отсортированы в порядке

возрастания значений оценок параметров небесных объектов. Количество последовательностей равно количеству параметров классификации. Параметрами ПРФ бинарного типа являются номер параметра классификации и граничное значение параметра классификации. Граничное значение ПРФ бинарного типа по каждому параметру определяются из соответствующей последовательности. ПРФ бинарного типа можно записать в виде:

$$\phi(\delta_{\mu\nu}, y_{\mu}) = \begin{cases} 0, & y_{\mu} < \delta_{\mu\nu}; \\ 1, & y_{\mu} \geq \delta_{\mu\nu}, \end{cases} \quad (1)$$

где $\mu = \overline{1, M_{mea}}$ – номер параметра измерения (формуляра каталога), используемого при отождествлении; $\delta_{\mu\nu}$ – граничное значение μ -го параметра классификации, константа ПРФ бинарного типа (при чем, ψ_{μ} – номер варианта бинарного ПРФ, равный порядковому номеру объекта в последовательности упорядоченных формуляров по μ -му параметру); y_{μ} – оценка μ -го параметра классификации небесных объектов в i -м измерении.

Характеристиками ПРФ гистограммного типа являются: номер параметра классификации, шаг разбиения интервала значений параметра классификации или количество соответствующих интервалов k . Определение размера интервала осуществляется по формуле:

$$\Delta_{\mu\nu} = (\theta_{\mu \max n} - \theta_{\mu \min n})/k, \quad (2)$$

где $\theta_{\mu \max n}$ и $\theta_{\mu \min n}$ – максимальное и минимальное значения μ -го параметра классификации в n -м подкаталоге.

ПРФ гистограммного типа можно записать в виде:

$$\omega(\Delta_{\mu\nu}, y_{\mu}) = [y_{\mu}/\Delta_{\mu\nu}]. \quad (3)$$

где квадратные скобки означают, что функция принимает только целочисленные значения путем замены результата деления на наибольшее из ближайших к нему целых чисел.

Представление измерения при побитной (поблочной) обработке. При использовании простой функции потерь и равных априорных вероятностях формирования (на основе заданных кадров) измерения различных объектов каталога имеет вид:

$$\hat{j} = \arg \max_j P_{Y_{infr}/\theta_{jnc}}(Y_{infr}/\theta_{jnc}), \quad (4)$$

где $P_{Y_{infr}/\theta_{jnc}}(Y_{infr}/\theta_{jnc})$ – вероятность получения измерения с параметрами Y_{infr} при его формировании на основе изображения от j -го объекта (на основе

j -й гипотезы) с параметрами θ_{jnc} .

При использовании других функций потерь и априорных вероятностей гипотез о формировании измерений изображениями объектов вид РП (4) более громоздкий, однако его суть и структура не меняются.

Пусть область определения каждого из M_{mea} параметров измерения разделена на $M_{mea} (\mu = \overline{1, M_{mea}})$ интервалов с границами α_{ik} и $\alpha_{ik+1} (k = \overline{0, M_{mea}-1})$.

Результат каждой ПРФ можно считать признаком измерения. Совокупность значений всех ПРФ полностью характеризует дискретное измерение Y_{infr} :

$$P_{Y_{infr}/\theta_{jnc}}(Y_{infr}/\theta_{jnc}) = \prod_{k=1}^{N_{SDF}} P_{SDF}(\varphi_k = u_k/\theta_{jn}); \quad (5)$$

где

$$Y_{infr} = \{\varphi_1, \dots, \varphi_n, \dots, \varphi_{K_{SDF}}\}; \quad (6)$$

N_{SDF} , k_{hist} – количество и номер ПРФ.

Описание (6) для решения задач проверки многоальтернативных гипотез часто является избыточным. С целью ликвидации избыточности предлагается следующее. Один из признаков с номером $\tau_1 = \overline{1, N_{SDF}}$ выбирается в качестве первого используемого. Для каждого из возможных его значений выбирается второй признак $\varphi_{\tau_2}(\varphi_{\tau_1})$ и т.д. При этом описание измерения (6) можно заменить описанием, построенным указанным выше способом:

$$H(Y_{infr}) = \{h_1, \dots, h_{k(Y_{infr})}\}, \quad (7)$$

где $h_1 = \varphi_{\tau_1}; h_2 = f(\varphi_{\tau_1}) = \begin{cases} \varphi_{\tau_21} \text{ при } \varphi_{\tau_1} = 0, \\ \varphi_{\tau_22} \text{ при } \varphi_{\tau_1} = 1, \end{cases}$ и т.д.

На основе описания (4) синтезируется байесовское РП:

$$\hat{j} = \arg \max_j P_{SDF}(H(Y_{infr})/\theta_{jnc}) \quad (8)$$

как последовательное РП проверки многоальтернативных гипотез по дискретным измерениям.

Введение понятия класса объектов и его кортежа. С учетом положительной определенности вероятности, максимум выражения (8) будет больше нуля. Определенным образом в выбранном описании измерения (7) для большей части гипотез о принадлежности измерений объектам вероятность $P_{SDF}(h_1 = u_1/\theta_{jnc})$ примет свои граничные значения 0 или 1. Если $P_{SDF}(h_1 = u_1/\theta_{jnc}) = 0$, то функция правдоподобия $P_{SDF}(H(Y_{infr})/\theta_{jnc})$ при $h_1 = u_1$ тождественна нулю. Тем самым отпадает необходимость определения значений еще не использованных признаков (8).

С использованием признака h_i множество гипотез о принадлежности измерений объектам Ω_h будет разбито на нулевой Ω_{h0} и первый Ω_{h1} классы с $P_{SDF} = (h_i = 0) = 1$ и $P_{SDF} = (h_i = 1) = 1$ соответственно. Совокупность гипотез о принадлежности измерения объектам, для которых $P_{SDF}(h_i = 0) \in]0,1[$, разбивается следующим образом. Если истинное значение признака соответствует $h_i = 0$, то гипотеза о принадлежности измерения объектам относится, во-первых, к нулевому классу Ω_{h0} , а во вторых к кортежу первого класса Ω_{h1cor} . В противном случае гипотезу относят к первому классу Ω_{h1} и кортежу нулевого класса Ω_{h0cor} . Каждая гипотеза о принадлежности измерения объектам и каждый ей соответствующий объект на k -ом уровне иерархии является элементом только одного класса и может принадлежать кортежам нескольких классов. Совокупность гипотез о принадлежности измерения объектам заданного класса и его кортежа можно назвать подмножеством гипотез $(\Omega_{h1\Sigma}, \Omega_{h0\Sigma})$. Использование последующих признаков измерения осуществляется аналогичным образом. При этом на каждом уровне иерархии гипотезы (объекты) только одного подмножества будут иметь отличную от нуля апостериорную вероятность принадлежности им измерения. В связи с этим введенные подмножества можно назвать подмножествами ранее не отвергнутых гипотез (объектов) $\Omega_{hk} (\Omega_{h0} \cap \Omega_{h1} = \emptyset)$; $\Omega_{h1\Sigma} = \Omega_{h1} \cup \Omega_{h1cor}$; $\Omega_{h0\Sigma} = \Omega_{h0} \cup \Omega_{h0cor}$; $\Omega_{h0cor} = \Omega_{h0\Sigma} \cap \Omega_{h1}$ [128].

Структура байесовского РП проверки многоальтернативных гипотез с их предварительной иерархической селекцией. Вводимое РП является иерархическим по методу представления данных и последовательным по методу их обработки. В связи с этим его удобно представить в виде дерева (рис 1, 2) [18]. Висячие вершины графа (рис 1) раскрашены номерами принимаемых гипотез о принадлежности измерения объектам, а внутренние вершины – номерами используемых в них ПРФ. Дополнительно

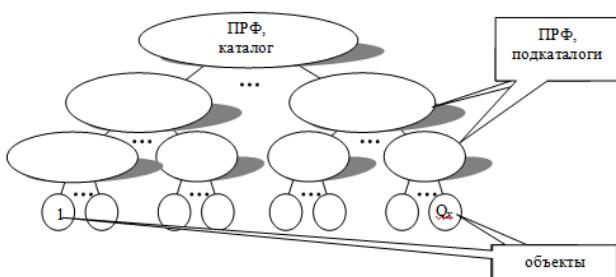


Рис. 1 – Графическое представление метода иерархической классификации в виде графа

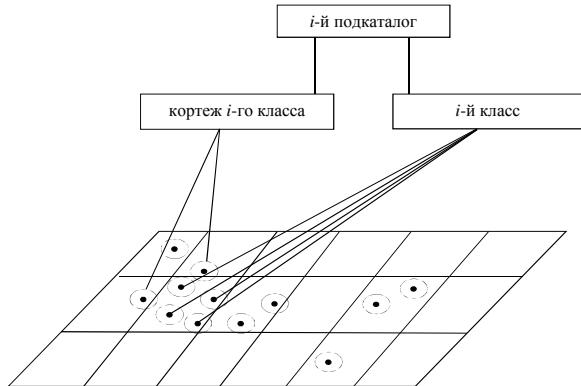


Рис. 2 – Привязка класса и кортежа к определенной области ПИ.

каждой внутренней вершине графа ставится в соответствие подмножество ранее не отвергнутых гипотез о принадлежности измерения объектам в соответствии с РП вида:

$$\Omega_{hk} = \begin{cases} \Omega_{hk0\Sigma} & \text{при } h_k = 0; \\ \Omega_{hk1\Sigma} & \text{при } h_k = 1. \end{cases} \quad (9)$$

При этом во внутренних вершинах, предшествующих висячим, всегда используются ПРФ байесовского типа (8), синтезированными на основе подмножеств ранее не отвергнутых гипотез соответствующих вершин графа.

Согласно введенному правилу в каждой внутренней вершине, начиная с корня, производится проверка признаков измерения соответствующей ПРФ. По ее результатам измерение направляется в один из потомков внутренней вершины. После серии таких проверок измерение попадает в одну из внутренних вершин с ПРФ байесовского типа, а затем – в висячую вершину, соответствующую принятому объекту (принятой гипотезе о принадлежности измерения объекту).

Совокупность всех небесных объектов, которые отображаются в одной области ПИ, можно назвать классом небесных объектов этой области. Совокупность небесных объектов, оценки параметров которых не попадают в эту область, но измерения, от которых могут попасть в нее с ненулевой вероятностью, можно назвать кортежем указанного класса небесных объектов. Безусловно, объекты, принадлежащие кортежу одного класса, одновременно являются объектами другого. На каждом уровне иерархии каждый небесный объект является объектом только одного класса, но может входить в кортежи нескольких других классов (рис. 2).

Класс и кортеж, соответствующие одной области ПИ, можно назвать подкаталогом данной области ПИ. Тогда иерархической классификации измерения соответствует каталог с многоуровневой структурой подкаталогов, содержащих формуляры

объектов используемого каталога.

Разбиение каталога на подкаталоги производится иерархически, как и разбиение ПИ на области (рис. 1). На нулевом уровне все объекты принадлежат каталогу. На первом уровне, в соответствии с ПРФ, ПИ разбивается на подобласти, а каталог – на подкаталоги. Каждой области ПИ первого уровня иерархии соответствует ПРФ второго уровня иерархии. ПРФ разных областей одного уровня иерархии могут быть как одинаковые, так и различные. С использованием заданных ПРФ на втором уровне иерархии области ПИ первого уровня иерархии опять разбиваются на подобласти. При этом соответствующие подкаталоги делятся на вложенные в них подкаталоги.

Чем больше уровней в данной структуре, тем меньше объектов будет содержаться в подкаталогах нижних уровней. Увеличение количества уровней и, соответственно, подкаталогов в данной структуре может продолжаться до тех пор, пока не будут получены подкаталоги, содержащие минимально возможное количество формуляров объектов используемого каталога. При этом значение данного минимально возможного количества формуляров объектов определяется условиями, в которых измерения классифицируются. Прежде всего, параметрами, характеризующими условия классификации, являются плотность объектов и степень и частота взаимного пересечения изображений соседних объектов.

Внутренние вершины графа иерархической классификации (рис. 1) представляют собой составной объект. С одной стороны, внутренним вершинам графа соответствуют области ПИ и ПРФ, используемые над этими областями. С другой стороны, внутренние вершины графа содержат соответствующие подкаталоги небесных объектов.

Дуги показывают возможные переходы от одного подкаталога к другому при классификации измерений. У каждой вершины может быть одна заходящая и несколько исходящих дуг. Вершина, не имеющая заходящей дуги, называется корневой и представляет собой каталог формуляров небесных объектов.

Вершины, не имеющие исходящих дуг, называются висячими и представляют собой подкаталоги, содержащие наименьшее количество формуляров небесных объектов из всех подкаталогов, представленных вершинами графа, находящимися на пути от корневой до висячей вершины. Если все висячие вершины представляют собой подкаталоги, содержащие формуляр одного объекта, то иерархическая классификация осуществляет полное тождественное и может быть названа полной. Если хотя бы одна висячая вершина представляет собой подкаталог, содержащий формуляры нескольких объектов, то иерархическая классификация осуществляет неполное тождественное и может быть названа неполной.

Пример разбиения одномерного ПИ при наличии пяти возможных состояний, для случая, когда используется один параметр классификации, показан на рис.3.

Данное разбиение определяет показатели качества классификации. В свою очередь вычислительные затраты на метод иерархической классификации определяются способом разбиения ПИ на области.

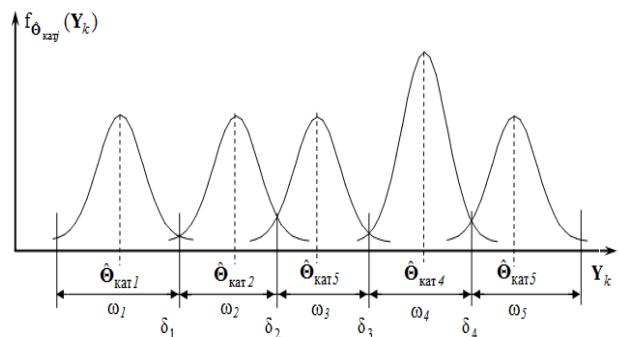


Рис. 3 – Пример разбиения ПИ при наличии пяти возможных состояний при измерении одного параметра

Вычислительные затраты на иерархическую классификацию измерений

Классификация измерений связана с вычислительными затратами на использование совокупности иерархически организованных ПРФ. При классификации измерение проходит путь от корня к соответствующей висячей вершине (рис. 1). Оценить вычислительные затраты на классификацию измерений, с помощью процедуры классификации, можно вычислив средние вычислительные затраты:

$$\bar{C}_{\text{id}} = \sum_{i=1}^{Q_c} C(\hat{\theta}_{\text{cat}jnc}) P(\hat{\theta}_{\text{cat}jnc}), \quad (17)$$

$C(\hat{\theta}_{\text{cat}jnc})$ – вычислительные затраты на классификацию измерения от j -го объекта с оценками параметров $\hat{\theta}_{\text{cat}jnc}$, которые содержатся в j -м формуляре n_c -го каталога; Q_c – количество объектов исследуемой части небесной сферы.

Вычислительные затраты на классификацию измерения от объекта с оценками параметров $\hat{\theta}_{\text{cat}jnc}$ зависят от структуры классификации и заранее не известны. Поэтому, для расчёта средней вычислительных затрат классификации измерений в работе используется другая формула [41]:

$$\bar{C}_{\text{id}} = \sum_{\varphi=1}^{N_{\text{SDF}}} c_{\varphi} p_{\varphi}, \quad (18)$$

где N_{SDF} – количество ПРФ в иерархической процедуре классификации; c_φ – вычислительные затраты классификации измерений φ -й ПРФ иерархической процедуры классификации измерений; p_φ – вероятность использования φ -й ПРФ при проведении классификации очередного измерения.

Вероятность использования φ -ой ПРФ равна безусловной вероятности попадания измерения в область ПИ, в которых эта ПРФ используется.

Оптимизация параметров иерархической классификации измерений

Результатом классификации одного измерения является оценка внутреннего номера небесного объекта в звездном каталоге, которому соответствует исследуемое измерение.

Средние вычислительные затраты одношагового или многошагового решающего правила (РП) классификации и, соответственно, одношаговой или иерархической (многошаговой) процедуры классификации определяются используемым ПИ:

$$\bar{C}_{\text{ident}} = \sum_{k=1}^{K_{\text{area}}} C(\omega_k) P(\omega_k), \quad (19)$$

где $P(\omega_k)$ – безусловная вероятность попадания измерения в область ПИ ω_k ; K_{area} – количество областей ПИ на всех уровнях иерархии, соответствующее используемой процедуре иерархической классификации; $C(\omega_k)$ – вычислительные затраты на принятие решения о принадлежности измерения области ПИ ω_k .

Количество областей ПИ K_{area} и количество ПРФ N в иерархической процедуре классификации могут не совпадать. Так, при возможности представления данной процедуры полным деревом с внутренними бинарными вершинами $N = Q_c - 1$, а $K_{\text{area}} = 2Q_c - 1$.

Для одношаговой процедуры классификации, количество областей ПИ обычно равно количеству объектов в каталоге небесных объектов $K_{\text{area}} = Q_c$.

При заданных: статистическом описании формуляров звездного каталога и измерений небесных объектов; априорных вероятностях $P(\hat{\Theta}_{\text{catj}})$, получения измерения от небесных объектов; матрице потерь; множестве допустимых к использованию ПРФ с соответствующими им вычислительными затратами, находятся параметры иерархической классификации с минимальными средними вычислительными затратами при среднем риске не выше заданного R^* :

$$\bar{C}_{\text{ident}} \rightarrow \min; \bar{R}_{\text{ident}} \leq R^*. \quad (20)$$

Иными словами, строится иерархическая классификация с таким разделением ПИ на области, которому соответствуют минимальные средние вычислительные затраты и средний риск не выше заданного R^* .

Выводы

В статье разработан метод иерархического отождествления измерений кадра с формуллярами звездного каталога и указан способ оптимизации его параметров. Метод обладает минимальным средним риском (байесовским риском) классификации и минимальными вычислительными затратами на свою реализацию из всех возможных байесовских классификаторов. Последнее обеспечивается применением совокупности иерархически организованных ПРФ, которые используются для разбиения области пространства измерений на вложенные в нее непересекающиеся области. Использование совокупности иерархически организованных ПРФ при решении задачи статистической проверки гипотез сведено к задаче последовательного анализа, которая названа задачей последовательной проверки многоальтернативных гипотез с их предварительной иерархической селекцией.

Дальнейшие исследования целесообразно сконцентрировать на методах построения иерархических классификаторов, позволяющих минимизировать совместные средние затраты на проектирование и использование указанных классификаторов.

Список литературы

1. Закс, Ш. Теория статистических выводов / Ш. Закс // пер. с англ. – М.: Мир, 1975. – 776 с.
2. Леман, Э. Проверка статистических гипотез / Э. Леман // пер. с англ. – М.: Наука, 1979. – 408 с.
3. George, E. Smith The invention and early history of the CCD / E. Smith George // Rev. Mod. Phys. – 2010. – V. 3, № 82. – P. 2307-2312. Д. (ПЗС- изображение)
4. Janesick, J. R. Scientific Charge-Coupled Devices (SPIE Press Monograph Vol. PM83) // SPIE Publications – 2001. – 920 p.
5. Rao, C. R. Линейные статистические методы и их применения / С. Р. Rao // М.: Наука, Гл. ред. физ.-мат. лит. – 1968. – 548 с.
6. Левин, Б. Р. Теоретические основы статистической радиотехники / Б. Р. Левин // М.: Радио и связь. – 1989. – 656 с.
7. Berger, J. The Case for Objective Bayesian Analysis / J. Berger // Bayesian Analysis 1. – 2006. – Number 3, – P. 385-402
8. Кузьмин, С. З. Цифровая радиолокация. Введение в теорию / С. З. Кузьмин // К.: Издательство КвіЦ. – 2000. – 428 с.

9. **Саваневич, В. Е.** Информационный подход к синтезу статистических алгоритмов с минимальной сложностью / **В. Е. Саваневич** // *Системи обробки інформації*. Збірник наукових праць. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2000. – С. 123 - 128.
10. **Саваневич, В. Е.** Постановка задачи синтеза алгоритмов минимальной сложности / **В. Е. Саваневич** // *Системи обробки інформації*. Збірник наукових праць. – Х.: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2002. – Вип. 4(20). – С. 67- 69.
11. **Ермаков, С. М.** Математическая теория оптимального эксперимента / **С. М. Ермаков, А. А. Жиглявский** // – М.: Наука. – 1987. – 320 с.
12. **Саваневич, В. Е.** Байесовская проверка многоальтернативных гипотез с их предварительной иерархической селекцией / **В. Е. Саваневич** // *Системи обробки інформації*: Зб. наук. пр. – Харків: НАНУ, ПАНМ, ХВУ. – 2004. – Вип. 8 (36). – С. 165 - 169.
13. **Knuth, D. E.** The Art of Computer Programming / **D. E. Knuth** // *Sorting and Searching*. 1998, Volume 3 (2nd Edition) – Hardcover.
14. **Айвазян, С. А.** Прикладная статистика: Классификация и снижение размерности / **С. А. Айвазян, В. М. Бухштабер, И. С. Енюков, Л. Д. Мешалкин** // М.: Финансы и статистика. – 1989. – 607 с.
15. **Трифонов, А. П.** Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех / **А. П. Трифонов, Ю. С. Шинаков** // М.: Радио и связь. 1986. – 264 с.
16. **Burnham, K. P.** Model Selection and Multimodel Inference: A Practical Information-Theoretic Approach / **K. P. Burnham, D. R. Anderson** // Springer New York. – 2010 – 488 p.
17. **Саваневич, В. Е.** Иерархический классификатор однокоординатных наблюдений с простыми ошибками / **В. Е. Саваневич, Е. В. Ветлугин** // *Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии*. – Харьков: НАКУ «ХАИ». – 2003. – Вип. 20. – С. 148 - 159.
18. **Diestel, R.** Graph Theory / **R. Diestel** // Springer-Verlag, Heidelberg – 2010. – 451 p.
4. **Janesick, J. R.** Scientific Charge-Coupled Devices (SPIE Press Monograph Vol. PM83). *SPIE Publications*, 2001, 920 p.
5. **Rao, S. R.** Lineynye statisticheskie metody i ikh primeneniya. Moskow: Nauka, 1968, 548 p.
6. **Levin, B. R.** Teoreticheskie osnovy statisticheskoy radiotekhniki. Moskow: Radio i svyaz', 1989, 656 p.
7. **Berger, J.** The Case for Objective Bayesian Analysis. *Bayesian Analysis* 1, 2006, 3, 385-402.
8. **Kuz'min, S. Z.** Tsifrovaya radiolokatsiya. Vvedenie v teoriyu. Kyiv: Izdatel'stvo KviTs, 2000, 428 p.
9. **Savanevich, V. E.** Informatsionnyy podkhod k sintezu statisticheskikh algoritmov s minimal'noy slozhnost'yu. *Sistemi obrobki informatsii*. Zbirnik naukovikh prats'. Kharkiv: NANU, PANM, KhVU, 2000, 123 - 128.
10. **Savanevich, V. E.** Postanovka zadachi sinteza algoritmov minimal'noy slozhnosti. *Sistemi obrobki informatsii*. Zbirnik naukovikh prats'. Kharkiv: NANU, PANM, KhVU, 2002, 4(20), 67- 69.
11. **Ermakov, S. M., Zhiglyavskiy, A. A.** Matematicheskaya teoriya optimal'nogo eksperimenta. Moskow: Nauka, 1987, 320 p.
12. **Savanevich, V. E.** Bayesovskaya proverka mnogoal'ternativnykh gipotez s ikh predvaritel'noy ierarkhicheskoy selektsiey. *Sistemi obrobki informatsii*: Zb. nauk. pr. – Kharkiv: NANU, PANM, KhVU, 2004, 8(36), 165 - 169.
13. **Knuth, D. E.** The Art of Computer Programming. *Sorting and Searching* (2nd Edition). Hardcover, 1998, Volume 3.
14. **Ayvazyan, S. A., Bukhshtaber, V. M., Enyukov, I. S., Meshalkin, L. D.** Prikladnaya statistika: Klassifikatsiya i snizhenie razmernosti. Moskow, Finansy i statistika, 1989, 607 p.
15. **Trifonov, A. P., Shinakov, Yu. S.** Sovmestnoe razlichenie signalov i otsenka ikh parametrov na fone pomekh. Moskow: Radio i svyaz', 1986, 264 p.
16. **Burnham, K. P., Anderson, D. R.** Model Selection and Multimodel Inference. A Practical Information-Theoretic Approach. Springer New York, 2010, 488 p.
17. **Savanevich, V. E., Vetrugin, E. V.** Ierarkhicheskiy klassifikator odnokoordinatnykh nablyudeniy s prostymi oshibkami. *Otkrytie informatsionnye i kom'yuternye integriruvannye tekhnologii*. Khar'kov: NAKU «KhAI», 2003, 20, 148 - 159.
18. **Diestel R.** Graph Theory. Springer-Verlag, Heidelberg, 2010, 451 p.

Bibliography (transliterated)

1. **Zaks, Sh.** Teoriya statisticheskikh vyvodov. per. s angl., Moskow: Mir, 1975, 776 p.
2. **Leman, E.** Proverka statisticheskikh gipotez. per. s angl., Moskow: Nauka, 1979, 408 p.
3. **George, E. Smith** The invention and early history of the CCD. *Rev. Mod. Phys.*, 2010, 3(82), 2307-2312.

Надійшла (received) 22.08.2015

УДК 004.414.2:37.015.311

ПРОЕКТУВАННЯ WEB ПОРТАЛУ ФОРМУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНОЇ БАЗИ ДАНИХ З МІГРАЦІЇ ПТАХІВ В АЗОВО-ЧОРНОМОРСЬКОМУ РЕГІОНІ УКРАЇНИ

**В. В. ОСАДЧИЙ^{1*}, В. С. ЕРЕМЕЄВ¹, В. Д. СІОХІН², П. І. ГОРЛОВ², І. М. СЕРДЮК³,
В. М. ВАСИЛЬЄВ⁴**

¹ Кафедра інформатики і кібернетики, Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, УКРАЇНА

² НДІ біорізноманіття наземних та водних екосистем України, Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, УКРАЇНА

³ ІКЦ, Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, УКРАЇНА

⁴ ЦДН, Мелітопольський державний педагогічний університет імені Богдана Хмельницького, УКРАЇНА

* poliform55@gmail.com

АНОТАЦІЯ У статті проаналізовано інтернет ресурси з моніторингу міграції птахів, розроблено вимоги до створення Web порталу формування інформаційної бази даних з міграції птахів в Азово-Чорноморському регіоні України, структурну модель взаємодії інтерфейсів Web порталу. Впровадження даної моделі дозволить вдосконалити процес моніторингу міграції птахів шляхом оперативної передачі первинних матеріалів до онлайн інформаційної бази. Подальший розвиток проекту дасть можливість створення Атласу структури трансконтинентальних міграційних шляхів та географічних зв'язків мігруючих птахів за даними новітніх кількісних характеристик міграцій на ключових ділянках регіону.

Ключові слова: Web портал, інформаційна база даних, міграція птахів, орнітологічний моніторинг, радарні спостереження.

АННОТАЦИЯ В статье проанализированы интернет ресурсы по мониторингу миграции птиц, разработаны требования к созданию Web портала формирования информационной базы данных по миграции птиц в Азово-Черноморском регионе Украины и структурная модель взаимодействия интерфейсов Web портала. Внедрение данной модели позволит усовершенствовать процесс мониторинга миграции птиц путем оперативной передачи первичных материалов в онлайн информационную базу. Дальнейшее развитие проекта даст возможность создания Атласа структуры трансконтинентальных миграционных путей и географических связей мигрирующих птиц по данным новейших количественных характеристик миграций на ключевых участках региона.

Ключевые слова: Web портал, информационная база данных, миграция птиц, орнитологический мониторинг, радарные наблюдения.

DESIGNING OF THE WEB PORTAL FORMING AN INFORMATION DATABASE ON MIGRATION OF BIRDS IN THE AZOV-BLACK SEA REGION OF UKRAINE

V. OSADCHYI^{1*}, V. EREMEEV¹, V. SIOKHIN², P. GORLOV², I. SERDYUK³, V. VASILIEV⁴

¹ Department of Computer Science and Cybernetics, Bogdan Khmelnitskiy Melitopol State Pedagogical University, UKRAINE

² RIB of terrestrial and aquatic ecosystems in Ukraine, Bogdan Khmelnitskiy Melitopol State Pedagogical University, UKRAINE

³ Information and Computer Center, Bogdan Khmelnitskiy Melitopol State Pedagogical University, UKRAINE

⁴ Distance Learning Center, Bogdan Khmelnitskiy Melitopol State Pedagogical University, UKRAINE

ABSTRACT The article analyzes the online resources to monitor bird migration, developed requirements for creation of the Web portal forming an information database on migration of birds in the Azov-Black Sea region of Ukraine and the structural model of interaction Web portal's interfaces. The Web portal services allow the experts-ornithologists to add monitoring data directly into the database. While the data from the radar's stream or birdwatchers comes first in the intermediate base, from which, after peer review and processing it is introduced into the main database. An interface that allows the radar installed on a mobile basis, transfer the database information collected in bad weather conditions and reduced visibility (at night), which ensures uninterrupted data collection and analytical processing of data on migration of birds in the Azov-Black Sea region round and round the clock. Completed the integration of data collected and stored in multiple disparate databases MSPU team of scientists for several decades. When developing a Web portal, it is important to take into account requirements for the safety of web-applications and prevent an unauthorized access to the electronic database. Analytical processing of information takes place by means of Web portal in real time and allows you to apply it properly in the reporting form (maps, graphs, reports, forecasts, etc.) to system users, in accordance with their rights. Implementation of this model will improve the monitoring of bird migration in the Azov-Black Sea region of Ukraine through expeditious transfer of primary materials in the online data base. Further development of the project will enable the creation of the Atlas of structure of intercontinental birds migration routes and geographical connections of migratory birds according to the latest quantitative characteristics of migration in the key areas of the region.

Keywords: Web portal, information database, the migration of birds, ornithological monitoring, radar observations.

Вступ

Орнітологія як наука досить багаторічна і в сферу інтересів вчених входить вивчення біології

птахів, систематики, поширення, міграцій тощо. Основу досліджень складають спостереження за птахами в природі.

Колектив науковців Мелітопольського державного педагогічного університету імені Богдана Хмельницького займається вивченням і розробкою заходів з охорони птахів на великій території узбережжя Азовського і Чорного морів, що охоплює, крім приморських ділянок, степову і частину лісостепової зон, здійснюю інвентаризацію та кадастрову оцінку територій, важливих для існування птахів на півдні України, особливо для видів Червоної книги України, оптимізацію природно-заповідного фонду півдня України протягом багатьох років.

За цей період накопичено безліч інформації, яка зберігається у декількох базах даних, що значно утруднює її використання у науково-дослідних цілях. До того ж у наш час орнітологи широко використовують сучасні комп'ютерні технології, завдяки яким можна здійснювати масовий збір і накопичення інформації не тільки за допомогою сторонніх спостерігачів і любителів птахів (бердотчерів), а й за допомогою радарних спостережень.

Необхідність використання в орнітологічному моніторингу сучасних інформаційних технологій, що дозволяють фіксувати первинну інформацію, якісно, ефективно, з високою швидкістю її обробляти і представляти необхідні дані в зручному для користувача вигляді висвітлювалась у роботах В.В. Хідекеля [1], D.W. Gibbons [2], A.J. Van, J. Pannekoek, D.W. Gibbons [3]. Питаннями розробки онлайн баз даних займалися B.L. Sullivan, C.L. Wood, M.J. Iliff, R.E. Bonney, D. Fink, S. Kelling [4]. Іванешкин О.І. розглядав процеси формування схем посилань у системі управління базами даних [5]. Методам використання програмного забезпечення моніторингу сезонних орнітологічних комплексів присвячені роботи Сіохіна В.Д., Горлова П.І. [6]. Використання ГІС-систем з розширеними функціональними можливостями автоматичного завантаження супутниковых даних і бізнес-аналітики досліджували Шелестов А.Ю., Кравченко О.М., Скакун С.В., Волошин С.В., Куссуль Н.М. [7]. Фаль О.М. акцентував увагу на питаннях стандартизації у сфері менеджменту інформаційної безпеки [8].

Мета роботи

Провести аналіз інтернет ресурсів з моніторингу міграції птахів, розробити вимоги до створення Web порталу формування інформаційної бази даних з міграції птахів в Азово-Чорноморському регіоні України та створити структурну модель взаємодії інтерфейсів Web порталу.

Виклад основного матеріалу

Нині існує достатня кількість онлайн баз даних, що об'єднують дані спостережень за популяціями птахів, надають інформацію про розподіл видів птахів у різних просторових і часових масштабах.

У першу чергу це Map of Life (MOL) – каталог інформації про біологічні види на Землі [9]. Цей ресурс збирає і об'єднує дані з різних джерел, що описують розподіл видів по всьому світу. Дані включають в себе як точкові спостереження, так і експертні карти ареалів видів від основних постачальників, таких як Міжнародний союз охорони природи (МСОП), Всесвітній фонд природи (ВФП), Global Biodiversity Information Facility (GBIF), eBird та ін. Усі активи даних зберігаються в хмарі, постійно здійснюється їх резервне копіювання, вільний доступ до даних організовано через HTTP.

Найбільш відома онлайн база даних спостережень птахів - це eBird [10]. Вона являє собою класичну краудсорсінгова систему, до якої усі бажаючі можуть внести свій чек-лист спостережень птахів з їхньою чисельністю і додати фотографії. Система має свій API, величезний набір інструментів з обробки та візуалізації даних, найбільш поширені в США, Індії та Австралії.

Основний європейський конкурент eBird – Observation.org [11]. Зручний і зрозумілий інтерфейс внесення спостережень, у тому числі з фотографіями, автоматична прив'язка фотографій з геотегами робить систему сильним конкурентом на світовій арені онлайн баз спостережень. Але на відміну від eBird, система орієнтована на внесення даних по об'єктах усього тваринного і рослинного світу.

Менш відома онлайн база даних спостережень всього живого - Global Biodiversity Information Facility (GBIF) [12]. Вона недостатньо популярна серед вчених, а тим більше простих любителів у зв'язку з тим, що має дуже складну процедуру авторизації користувачів. З огляду на те, що точки на карті не активні, у сторонніх користувачів GBIF не викликає особливого інтересу, тим не менш, даних в ній досить багато.

AviBase також надає послуги з ведення особистої онлайн бази спостережень за птахами [13]. Хоча недостатньо зрозуміло, хто, крім самого користувача і адміністратора, може нею користуватися, але система інтегрована з eBird, куди чекліст можна відправляти натисненням кнопки.

Ще один продукт - ізраїльська онлайн база спостереження птахів [14]. Інтерфейс бази реалізовано на івриті, але достатньо зрозуміло, як вносити дані. База даних і карта реалізовані безпосередньо на головній сторінці, причому зі зв'язком у реальному часі між картою і базою, є закладки "місця", "групи", "люди" і "птахи" з фільтрами й рейтингом, систему адаптовано для мобільних пристройів.

Однією з перших на російському ринку з'явилася база даних обліку птахів на проекті Турухтан [15]. Основна ідея проекту - зібрати дані про міграції птахів і зробити їх загальнодоступними. У системі 414 обліків по 260 видах птахів, враховано 433476 особини. Нажаль система має явний недолік - це вузька спеціалізація проекту, що заздалегідь звужує коло відвідувачів сайту, навіть враховуючи орнітологів.

Динамічно розвивається також російська система "Онлайн дневники наблюдений" на базі 1С: Підприємство 8.3 [16]. База даних дозволяє вести облік карток спостережень і маршрутних обліків птахів, формувати різні аналітичні звіти тощо. Є можливість імпорту/експорту даних через MS Excel, інтуїтивно зрозумілий інтерфейс для користувачів, на мінімальному рівні знайомих з комп'ютерними технологіями. Власником і замовником бази даних є зоомузей МДУ.

У 2011 році групою російських активістів вивчення й охорони хижих птахів і сов створено Російську мережу вивчення й охорони пернатих хижаків (Russian Raptor Research and Conservation Network). Це частина великого ресурсу WildLifeMonitoring [17] з розділами "Пернатые хищники мира" (інша назва "Фаунистика") [18], "Птицы России (Северной Евразии)", "Нестбоксинг", а також регіональними кадастрами червонокнижних видів, у тому числі птахів. На відміну від усіх інших онлайн баз даних ця є повнофункціональною Веб-ГІС, де можна не тільки створювати спостереження з фоткартками або без, але і завантажувати до системи точки і треки у форматі GPX, вести базу шарів, що містять геометричні примітиви, імпортувати та експортувати дані у різних ГІС-форматах.

Обговорення результатів

Серед існуючих найбільш відомих онлайн баз даних спостережень ми звернули увагу на чотири, які, на нашу думку, є максимально корисними і доступними - E-Bird, "Пернатые хищники мира", проект Турухтан, Observation.org і зробили порівняльний аналіз їхнього функціоналу (табл. 1).

Таблиця 1 - Порівняння функціоналу онлайн баз даних спостережень за птахами

	E-Bird	Пернатые хищники мира	Проект Турухтан	Observation.org
Об'єкти дослідження	птахи	птахи	птахи, зокрема Турухтан	флора і фауна
Можливість додавання даних без реєстрації	-	+	-	-

Геопозиціонування птахів на мапі	+	+	+	+
Можливість пошуку по мапі	+	+	-	-
Перегляд міграційних маршрутів	-	-	-	+
Фотографії птахів у місцях спостережень	+	+	-	+
Відтворення звуків птахів	-	-	-	+
Можливість імпорту даних з електронних таблиць	+	-	-	-
Можливість імпорту даних з радара	-	-	-	-
Систематизація даних у вигляді таблиць	+	+	+	+
Побудова графіків /діаграм	+/-	+	-	+
Мова інтерфейсу	en, de, es, fr, pt, zh, tr	ru, en	ru	мульти мовна

Проаналізувавши онлайн ресурси спостережень за живою природою, зокрема за птахами, ми з'ясували, що серед наявних розробок немає такої, що інтегрує в систему орнітологічних спостережень схеми та методики радарних досліджень процесу міграцій.

Можливості сучасних інформаційних технологій зі збереження та обробки даних різноманітного характеру, можливості відстеження змін у реальному часі, наочність, моделювання різноманітних процесів у залежності від цих змін, сприяли розробці та впровадженню Web-порталу для формування інформаційної бази даних з міграції птахів в Азово-Чорноморському регіоні України з метою накопичення первинних матеріалів на основі мобільних і радарних технологій.

Створений web- портал надає засоби для проведення орнітологічних спостережень з подальшим аналізом отриманих даних.

Для доступу до системи можна використовувати наступні браузери: Internet Explorer, Opera, Mozilla Firefox, Google Chrome тощо.

Web портал має розвинену систему прав і доступів, високий рівень захисту та інтуїтивно зрозумілий для користувача.

Безпека програмного сервісу – є одним із основних та важливих моментів при розробці програмного продукту. При цьому загрози можуть бути не тільки на рівні розробленого web-додатку, але і на рівні серверу та мережі. Web портал був розроблений з урахуванням вимог до безпеки web-додатків та запобіганню несанкціонованого доступу до електронної бази даних.

Розробка Web порталу велася з урахуванням таких особливостей системи:

- публічний доступ до порталу (до систему можна увійти з будь-якої точки світу при наявності мережі Інтернет та браузера);
- різний рівень компетентності користувачів у роботі з використанням інформаційних технологій;
- декілька ролей користувачів;
- необхідність захисту від SQL- ін'єкцій.

Для запобігання несанкціонованого доступу та перехвату даних використовувалися наступні принципи побудови Web порталів:

- використання платформи розробки з гнучкую у налаштуванні системою авторизації користувачів;
- використання системи хешування паролів;
- створення розвинутої системи ролей для входу до Web порталу, розділення їх можливостей згідно функціональних обов'язків;
- введення логів дій всіх користувачів, генерація звітів;
- використання вбудованих класів фреймворку для перевірки запитів до бази даних.

Інформаційна база даних забезпечує надійне зберігання інформації, яка отримана в результаті моніторингових робіт в Азово-Чорноморському регіоні України та оперативний її аналіз за наступними напрямками:

- стан і чисельність птахів;
- стан і чисельність міграційних птахів, внесених до Червоної книги України;
- оцінка динаміки чисельності птахів;
- оцінка функціонального (місця ночівель, відпочинку, годування, водопою) і сезонного (місця гніздування, міграційних зупинок, зимівлі) розподілу птахів на регіональному рівні та моніторингових полігонах.

Нами було розроблено структурну модель взаємодії інтерфейсів Web порталу (рис. 1).

Наповнення Web порталу відбувається завдяки трьом інформаційним потокам:

1. Експерти-орнітологи, використовуючи перший інформаційний потік, наповнюють Web портал перевіреними даними візуальних

спостережень, які вони отримують під час експедиційної роботи. Для цього можуть використовуватися мобільні пристрої (смартфони,

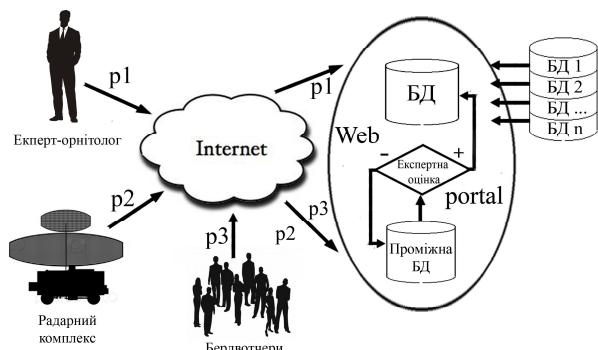


Рис. 1 – Структурна модель взаємодії інтерфейсів Web порталу

планшети) чи комп'ютери. Наповнення може відбуватися у режимі реального часу чи у лабораторних умовах з відтермінуванням у часі.

2. Радарний комплекс передає дані за допомогою другого інформаційного потоку.

3. Бердватчери (волонтери) наповнюють Web портал інформацією за допомогою третього інформаційного потоку.

До того ж завершено процес інтеграції даних, які було накопичено і збережено у декількох розрізнених базах даних колективом науковців МДПУ протягом декількох десятків років.

Сервіси Web порталу дозволяють експертам-орнітологам додавати дані моніторингу безпосередньо до бази даних, у той же час дані з потоку радара чи бердватчерів потрапляють спочатку до проміжкової бази звідки після експертної перевірки й обробки впроваджуються до основної бази даних.

Ми розробили інтерфейс, який дозволяє радару, встановленому на мобільну основу, передавати до бази даних інформацію, зібрану в поганих погодних умовах і в умовах обмеженої видимості (вночі), що забезпечує безперебійний збір і аналітичну обробку даних про міграції птахів в Азово-Чорноморському басейні цілий рік і цілодобово.

Web портал має багаторівневу систему користувачів з різними правами:

Адміністратор має права на керування системою та будь-якими користувачами.

Експерти-орнітологи мають право на наповнення, редактування та видалення даних із системи; перевірку даних у проміжковій базі даних; керування роботою та рівнями доступу Бердватчерів (волонтерів) чи користувачів (замовників).

Бердватчери (волонтери) мають право на наповнення та редактування проміжкової бази даних

відповідно до прав, отриманих від Експертів чи Адміністратора.

Користувачі (замовники) мають право запросити доступ до певної інформації (територія, птахи, міграційні потоки, тощо) на певний час, а також отримувати інформацію, яка не відноситься до авторизованої та розташована у вільному доступі на порталі.

Аналітична обробка інформації відбувається засобами Web порталу в реальному часі та дозволяє відповідним чином подавати її у звітному вигляді (мапи, графіки, звіти, прогнози тощо) користувачам системи, відповідно до їх прав.

Висновки

Отже, вперше для України нами розроблено Web портал формування інформаційної бази даних з міграції птахів, зокрема в Азово-Чорноморському регіоні України, за допомогою поєднання радарних та візуальних досліджень та їх суміщення з існуючими інформаційними матеріалами.

Впровадження даної системи дозволить вдосконалити процес моніторингу міграції птахів в Азово-Чорноморському регіоні України шляхом оперативної передачі первинних матеріалів до онлайн інформаційної бази.

Подальший розвиток проекту дасть можливість створення Атласу структури трансконтинентальних міграційних шляхів та географічних з'язків мігруючих птахів за даними новітніх кількісних характеристик міграцій на ключових ділянках регіону.

Список літератури

1. Хидекель, В. В. Использование информационных технологий и цифрового оборудования для целей орнитологических учетов и многолетнего зоологического мониторинга сети маршрутов Байкальского региона. / В. В. Хидекель // Байкальский зоологический журнал. – Иркутск, 2009. – Вып. 2. – С. 5-13.
2. Gibbons, D. W. Pan-European breeding bird monitoring. In Bischoff, Dröschmeister (eds) European Monitoring for Nature Conservation / D. W. Gibbons // Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz. – Vol 62. – Godesberg: Bundesamt für Naturschutz, Bonn-Bad, 2000. – P. 173-178.
3. Van, A. J. Indexing European bird population trends using results of national monitoring schemes: a trial of a new method / A. J. Van, J. Pannekoek, D. W. Gibbons // Bird Study. – 2001. – №48. – P. 200-213.
4. Sullivan, B. L. "eBird: a citizen-based bird observation network in the biological sciences" / B. L. Sullivan, C. L. Wood, M. J. Iliff, R. E. Bonney, D. Fink and S. Kelling // Biological Conservation, 2009. – Vol. 142, no. 10, P. 2282-2292.
5. Иванешкин, А. И. К вопросу автоматизации процесса формирования схем ссылок в системе управления базой данных реляционного типа / А. И. Иванешкин // Проблемы управления и информатики. – 2007. – № 5. – С. 113–118. ISSN 1064-2315.

6. Сиохин, В. Д. Методы использования программного обеспечения для мониторинга сезонных орнитологических комплексов и оценки влияния ветровых станций / В. Д. Сиохин, П. И. Горлов, А. Б. Анненков. - Бранта [Текст]: сб. науч. тр. АзовоЧерномор. орнитол. станции / [редкол.: Андрющенко Ю. А. и др.]. – Мелітополь: Ред.-изд. совет "Бранта", 1998 - Вип. 17, спец. – 2014. – 175 с.: ил. - Бібліогр. в кінці ст. С .161-167.
7. Шелестов, А. Ю. Інформаційна система агромоніторингу на основі геопросторових даних / А. Ю. Шелестов, О. М. Кравченко, С. В. Скаун, С. В. Волошин, Н. М. Куссуль // Кибернетика и системный анализ. – 2013. №1. – С. 145-154. – ISSN 0023-1274. URL: <http://dspace.nbu.edu.ua/bitstream/handle/123456789/86173/15-Shestestov.pdf?sequence=1>.
8. Фаль, О. М. Стандартизація у сфері менеджменту інформаційної безпеки / О. М. Фаль // Кибернетика и системный анализ. – 2010. – №3. – С. 181-184. ISSN 0023-1274.
9. Map of Life (MOL) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://mol.org>. – Назва з екрану.
10. eBird [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ebird.org>. – Назва з екрану.
11. Observation.org [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://observado.org>. – Назва з екрану.
12. Global Biodiversity Information Facility (GBIF) [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://www.gbif.org/species>. – Назва з екрану.
13. Avibase [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://avibase.bsc-eoc.org/avibase.jsp?lang=EN&pg=home>. – Назва з екрану.
14. Онлайн база спостереження птахів [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://www.birdsbase.com/bbis_test/heb/home.jsp. – Назва з екрану.
15. Проект "Турухтан" [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://philomachus.ru>. – Назва з екрану.
16. База даних "Онлайн дневники наблюдений" [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://ru-birds.ru/index.php/ru>. – Назва з екрану.
17. WildLifeMonitoring [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://wildlifemonitoring.ru>. – Назва з екрану.
18. Пернатые хищники мира [Електронний ресурс] / Российская сеть изучения и охраны пернатых хищников – Режим доступу: <http://rrtcn.ru/birdwatching>. – Назва з екрану.

Bibliography (transliterated)

1. Khidekel, V. V. The use of information technology and digital equipment for ornithological surveys and years of zoological monitoring network of routes of the Baikal region. *Baikal Zoological Journal*, 2009, 2, 5-13.
2. Gibbons, D. W. Pan-European breeding bird monitoring. In Bischoff, Dröschmeister (eds) European Monitoring for Nature Conservation. *Schriftenreihe für Landschaftspflege und Naturschutz*, 2000, 62, 173-178.
3. Van, A. J., Pannekoek, J., Gibbons, D. W. Indexing European bird population trends using results of national monitoring schemes: a trial of a new method. *Bird Study*, 2001, 48, 200-213.
4. Sullivan, B. L., Wood, C. L., Iliff, M. J., Bonney, R. E., Fink, D., Kelling, S. "eBird: a citizen-based bird observation network in the biological sciences". *Biological Conservation*, 2009, 10(142), 2282-2292.

5. **Ivaneshkin, A. I.** On the issue of automation of the process of forming circuits links in the database management system relational type. *Problems of control and informatics*, 2007, **5**, 113-118.
6. **Siohin, V. D., Gorlov, P. I., Annenkov, A. B.** Methods of using software to monitor seasonal ornithological complexes and assessing the impact of wind farms. Brant [Text]: *Sat. scientific. tr. Azov-Black Sea coast. ornitol. Station* / [Editorial Board.: Andryushchenko Yu et al.]. – Melitopol: Ed-ed. Council "Brant", 1998 – Vol. 17, special. – 2014. – 175 p. : ill. – Bibliography. at the end of Art. With .161-167.
7. **Shelestov, A. J., Kravchenko, O. M., Skakun, S. V., Voloshin, S. V., Kussul, N. M.** Informatsiya system agromonitoringu on osnovi geoprostorovih daniv. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2013, **1**, 145-154, [Web]:<http://dspace.nbuv.gov.ua/bitstream/handle/123456789/86173/15-Shelestov.pdf?sequence=1>.
8. **Fall, O. M.** Standartatsiya have sferi informatsiynoї BEZPEKA Management. *Cybernetics and Systems Analysis*, 2010, **3**, 181-184. ISSN 0023-1274.
9. Map of Life (MOL) [Web] – Access: <http://mol.org>. – Title from the screen.
10. eBird [Web] – Access: <http://ebird.org>. – Title from the screen.
11. Observation.org [Web] – Access: <http://observado.org>. – Title from the screen.
12. Global Biodiversity Information Facility (GBIF) [Web] – Access: <http://www.gbif.org/species>. – Title from the screen.
13. Avibase [Web] – Access: <http://avibase.bsc-eoc.org/avibase.jsp?lang=EN&pg=home>. – Title from the screen.
14. Online database bird watching [Web] – Access: http://www.birdsbase.com/bbis_test/heb/home.jsp. – Title from the screen.
15. Draft "Ruff" [Web] – Access: <http://philomachus.ru>. – Title from the screen.
16. Database "online diaries" [Web] – Access: <http://ru-birds.ru/index.php/ru>. – Title from the screen.
17. WildLifeMonitoring [Web] – Access: <http://wildlifemonitoring.ru>. – Title from the screen.
18. Birds of Prey World [Web] / Russian network of study and conservation of birds of prey – Access: <http://rrrcn.ru/birdwatching>. – Title from the screen.

Надійшла (received) 21.09.2015

УДК 681.5:621.314.57

ІНФОРМАЦІЙНО-ПРОГРАМНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ МІКРОКЛІМАТОМ В ЗЕРНОСХОВИЩІ

O. V. СТРОКАНЬ*, В. В. ПРОКОПЕНКО

*Кафедра інформаційних технологій, Таврійський державний агротехнологічний університет, Мелітополь, УКРАЇНА
 * email:oksana.strokan@yandex.ua*

АННОТАЦІЯ У статті проаналізовано умови зберігання зернової маси в зерносховищах, зокрема розглянуто такий тип зерносховищ як силос. Розглянуто існуючі засоби забезпечення заданих параметрів мікроклімату у зерносховищах. З метою поліпшення якості та збереження зернової маси під час її зберігання у силосах пропонується інформаційно-програмна система управління мікрокліматом в зерносховищі, яка поєднує в собі засоби управління мікрокліматом у силосі та інформаційну базу даних для зберігання нормативних та поточних значень таких параметрів мікроклімату зерносховища як температура і вологість. Застосування такої системи дасть змогу забезпечити оптимальні мікрокліматичні параметри зберігання зерна в залежності від тривалості зберігання зерна, температури і вологості зовнішнього середовища, етапу аерації.

Ключові слова: база даних, мікроклімат, силос, інформаційна система, інтерфейс.

АННОТАЦИЯ В статье проанализированы условия хранения зерновой массы в зернохранилищах, в частности рассмотрен такой тип зернохранилищ как силос. Рассмотрены существующие средства обеспечения заданных параметров микроклимата в зернохранилищах. С целью улучшения качества и сохранения зерновой массы во время ее хранения в силосах предлагается информационно-программная система управления микроклиматом в зернохранилище, которая сочетает в себе средства управления микроклиматом в силосе и информационную базу данных для хранения нормативных и текущих значений таких параметров микроклимата зернохранилища как температура и влажность. Применение такой системы позволит обеспечить оптимальные микроклиматические параметры хранения зерна в зависимости от продолжительности хранения зерна, температуры и влажности внешней среды, этапа аэрации.

Ключевые слова: база данных, микроклимат, силос, информационная система, интерфейс.

INFORMATION AND SOFTWARE CONTROL SYSTEM OF MICROCLIMATE IN THE GRANARY

O.V. STROKAN, V. V. PROKOPENKO

Department of information technology, Tavria state agrotechnological University, Melitopol, UKRAINE

ABSTRACT The article analyzes the conditions of storage of grain mass in the silo, in particular, considered this type of silos as silage. The existing means of ensuring the given parameters of the microclimate in granaries. The main disadvantage of existing systems to ensure optimum conditions of grain storage is the lack of response of systems to change the stage of aeration, reporting on the change of temperature parameters throughout the line of grain storage in silos and uninformative interface. With the aim of improving the quality and safety of grain mass during storage in silos proposed information-program the climate control in the granary, which combines means of climate control in silos and information database for storing regulatory and current values of such parameters of microclimate as the granary temperature and humidity. The process to maintain the set temperature parameters of grain storage in the silo is as follows. The entire period of storage of the grain mass is divided into the stages of aeration, each of which is characterized by its grain temperature. The system responds to the change of step aeration and provides, in accordance with the current stage of aeration required temperature supplied to the silo of air. The proposed system has a user interface where the user can obtain information about the state of the climate in the granary. There are also signaling means and means for analysis of the temperature and humidity characteristics. The report can be displayed on the monitor and printing. The use of such a system would ensure optimal microclimatic parameters of grain storage depending on the duration of grain storage, temperature and humidity of the external environment, as well as on stage aeration. This will greatly improve the efficiency of grain storage, namely to improve the safety of the grain mass, its quality and organoleptic properties.

Keywords: base danih, microclimate, silage, information system, interface.

Вступ

В агропромисловому комплексі України зосереджено близько третини загального обсягу основних виробничих фондів господарства України і

виробляється понад 30% валової продукції [7]. Більш як половина цієї продукції надходить на переробку, за рахунок чого формується значна частка фонду народного споживання. Одним із резервів збільшення обсягів сільськогосподарської продукції є скорочення

її втрат, які спричинюються, зокрема, порушеннями під час зберігання. Основним завданням при зберіганні зерна є збереження його кількості та якості. При зберіганні зерна велика увага приділяється мікроклімату, в якому воно зберігається. До головних параметрів мікроклімату зберігання зерна належать температура і вологість.

Вплив температури міститься у наступному. Комахи часто є головною причиною псування зерна, яке зберігається. Кількість шкідників зростає з того моменту, коли зерно закладають у зерносховище у літку, і до зими, коли зниження температури уповільнює їх ріст. Репродуктивність шкідників є дуже інтенсивною при температурі від 25°C до 40°C , так як ця температура є оптимальною для їх розмноження. Тому необхідно своєчасно прияти міри по зниженню температури зернової маси. При підвищенні вологості спостерігається скважистість зернової маси, тобто відношення об'єму, зайнятого проміжками між твердими частками зерна. Це призводить до нерівномірного забезпечення повітрям окремих ділянок зернової маси, а також до самонагрівання, що негативно впливає на органолептичні показники, хімічний склад і посівні якості зерна [1, 2, 9]. Тому пропонується розробити автоматизовану систему управління мікрокліматом зерносховища, яка дозволить автоматизований контроль і регулювання температурного режиму у зерносховищі відповідно до ДСТУ [4].

Мета роботи

Пропонується система, яка дозволить забезпечити задані параметри мікроклімату у зерносховищі на всьому протязі зберігання зернової маси, а також забезпечити зберігання нормованих та моніторингових значень температури і вологості у силосі, надати звітність по цих процесах.

Виклад основного матеріалу

Основним видом зерносховища є силоси [6, 7]. Силоси здатні забезпечити надійне та тривале зберігання кондиційного зерна при низьких енергетичних витратах, а також тимчасове зберігання вологого зерна з вентилюванням та охолодженням. Система активного вентилювання силосу містить в собі: вентилятори, повітряпідводячі патрубки, пристрій розподілення повітря у насипу зерна – вертикальний повітрярозподіловач, повітроводи. Силоси обладнані системою контролю температури і датчиком верхньої межі рівня зерна. Контролювання температури зернової маси відбувається за допомогою датчиків температури – термопідвісок, які можуть розташовуватися на трьох рівнях уздовж зернового стовпа. Також силоси обладнані системою активного вентилювання, до складу якої входить вентилятор, калорифер та охолоджувальна установка.

На ринку електронної техніки існує багато систем, які здатні в автоматизованому режимі забезпечувати комфортні мікрокліматичні умови в середині силосу на протязі всього циклу зберігання зернової маси [5, 10].

Аналіз існуючих систем управління мікрокліматом зерносховищ типу силос показує, що головним їх недоліком є відсутність засобів контролювання і реагування на зміну вологості повітря, яке подається в бункер, а також малоінформативне діалогове вікно користувача з програмою.

Особливості технічних характеристик і комплектації силосів для зберігання зерна у наш час вимагають удосконалення процесу контролювання і забезпечення необхідних параметрів мікроклімату в зерносховищах такого типу. Рекомендується удосконалення виконати за рахунок застосування засобів комп’ютерного управління, а саме за рахунок розробки відповідного програмного продукту, який би дозволив автоматизувати процес управління температурними і вологісними параметрами повітря зерносховища, а також забезпечити комфорту взаємодію системи і користувача.

Автоматизована система управління мікрокліматом зерносховища функціонує на базі технічного, програмного та інформаційного забезпечення. Технічне забезпечення являє собою сукупність технічного обладнання. Програмне та інформаційне забезпечення системи являє собою комплекс взаємопов’язаних програмних засобів, які забезпечують у відповідності з вимогами, автоматичне вирішення задач збору інформації, її первинної обробки у формі, зручній для реєстрації, виробіткуправляючих впливів.

Технологічний процес зберігання зернової маси в силосі міститься у наступному. Перед засипкою зерна в силоси, воно проходить підготовлення до зберігання: сушку, санітарну обробку. З часу засипки в силос і до кінця свого довгострокового зберігання зерно поступово охолоджується за допомогою вентилятора. Вентилятор направляє потік охолоджуючого повітря через увесь пласт зерна. Температура повітря, яке подається вентилятором, повинна бути на $10-15^{\circ}\text{C}$ прохолодніша за температуру зерна (але не вище 25°C). Така температура досягається на півдні в нічний час, тому доцільно, щоби вентилятор вмикався саме при цій температурі зовнішнього повітря, тобто уночі, а вдень, коли температура зовнішнього повітря буде вище 25°C – вентилятор повинний бути вимкнений.

Контроль температури зернової маси відбувається на протязі всього циклу зберігання зерна. При цьому контроль здійснюється у трьох точка, розташованих у трьох пластах зернового стовпа: на самому нижньому шарі зернової маси, по середині і під верхом.

Розроблювана система (рис. 1) є людино-машинною системою управління, яка забезпечує автоматизований збір та обробку інформації, необхідної для оптимізації управління. У зв'язку з цим до складу автоматизованої системи забезпечення нормованих параметрів мікроклімату робочого середовища входить вимірювальне обладнання: датчик температури (термопідвіска) – для вимірювання температури зерна, психометр – для вимірювання вологості зовнішнього повітря, датчик температури зовнішнього повітря; оброблюваний пристрій, що функціонує на базі мікропрограмного управління; виконавчі пристрої – вентилятор, який оснащений охолоджувачем.

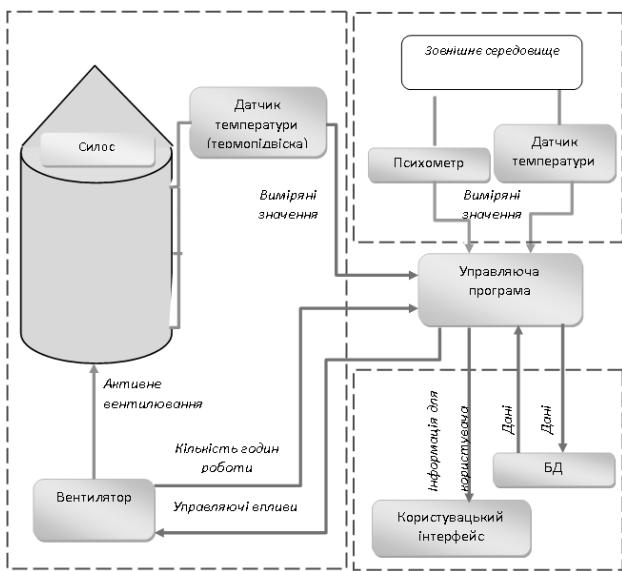


Рис. 1 – Принцип функціонування системи управління мікрокліматом у зерносховищі

Управляча програма, отримуючи значення вимірюваних величин, виконує розрахункові дії і видає відповідні керуючі впливи на вентилятор. Управляча програма має зв'язок з базою даних БД та інтерфейсом користувача, за допомогою якого відбувається діалог між користувачем системи і самою системою. Взаємозв'язок між управляючою програмою і БД має двосторонній характер, тобто відбувається зчитування нормативної інформації з БД і запис поточних значень вимірюваних величин.

Обговорення результатів

Основними завданнями розроблюваного програмного продукту є забезпечення заданих параметрів мікроклімату в силосі. Найважливішим фактором при роботі програмного забезпечення є точність розрахунків та надання відповідних управляючих впливів на виконавчі механізми.

Кінцевий користувач може звернутися до системи з метою отримання такої інформації:

- нормовані значення контролюваних параметрів, а саме температури зерна, температури і вологості зовнішнього середовища;
- поточні значення контролюваних параметрів;
- час роботи вентилятора;
- стан виконавчих пристрій (Включено/Виключено);
- рекомендації щодо періодичності використання вентилятора у ручному режимі;
- звіт про зміну контролюваних параметрів мікроклімату упродовж певного часу;
- вивід звіту на друк.

Загальний вигляд користувальського інтерфейсу інформаційно-програмної системи управління мікрокліматом в зерносховищі наведений на рис. 2.

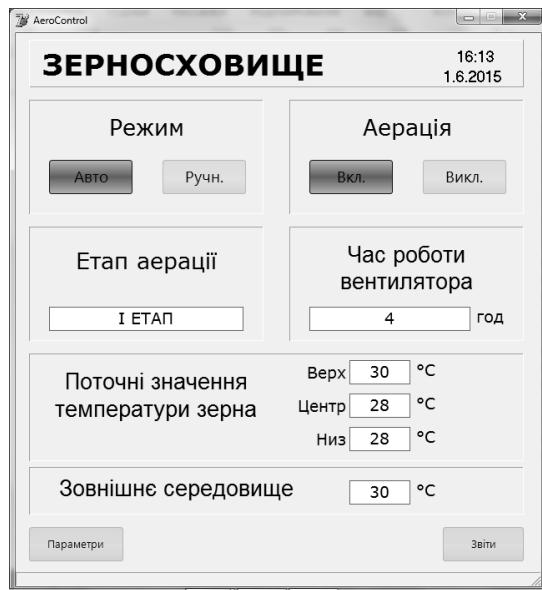


Рис. 2 – Інтерфейс системи

Форма «Режим» - забезпечує можливість вибирати режим роботи системи («Авто» або «Ручн.»). В режимі «Авто» система працює згідно заданого алгоритму, при «Ручн.» - користувач вручну вмікає та вимикає вентилятор.

Форма «Аерація» - сигналізує про стан аерації (Вкл./Викл.).

Форма «Звіти» - виводить звіт по стану мікроклімату за заданий період. Для формування звіту необхідно вибрати часовий діапазон та натиснути кнопку «Показати» (рис. 3).

Звіт можна виводити на монітор або на друк, для цього у правому куті форми «Період звітності» розміщена кнопка «Друк», при натисненні на якій відкривається вікно для встановлення параметрів друку.

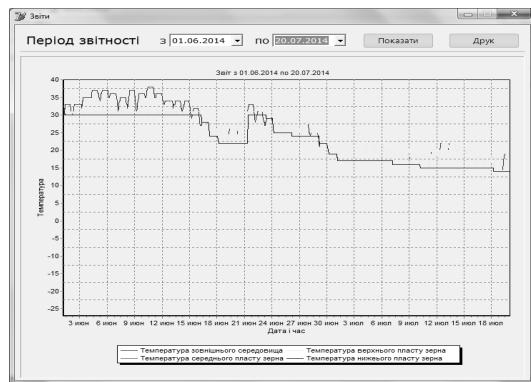


Рис. 3 – Форма «Звіти»

Зона візуалізації стану середовища і виконавчих механізмів вміщує таку інформацію: етап аерації; час роботи вентилятора; поточні значення температури зерна у трьох шарах; температура зовнішнього середовища (рис. 4).

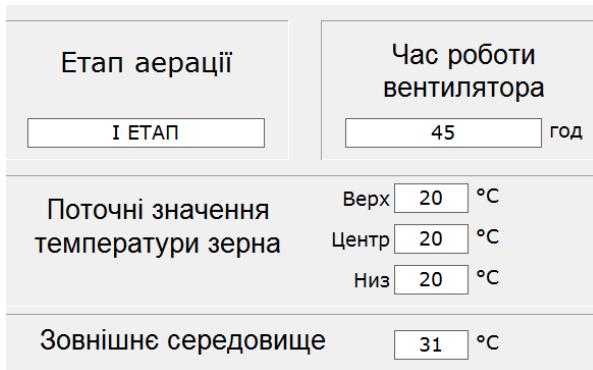


Рис. 4 – Зона візуалізації стану середовища і виконавчих механізмів

Зона зберігання даних – вміщує в себе базу даних: поточних (вимірюваних) і нормативних значень температурних параметрів, а також дає змогу регулювати рекомендовані параметри аерації зернової маси.

При натисненні на вкладці «Параметри» відкривається вікно (рис. 5), в якому можна виконувати налаштування температурного режиму для кожного етапу аерації зернової маси у силосі. Доступ до зміни температурного режиму має лише користувач з адміністративними параметрами адміністратора (провідний технолог підприємства). Всі інші користувачі мають змогу лише отримувати інформацію.

Також в даному вікні користувач має змогу отримати інформацію про місце розташування бази даних.

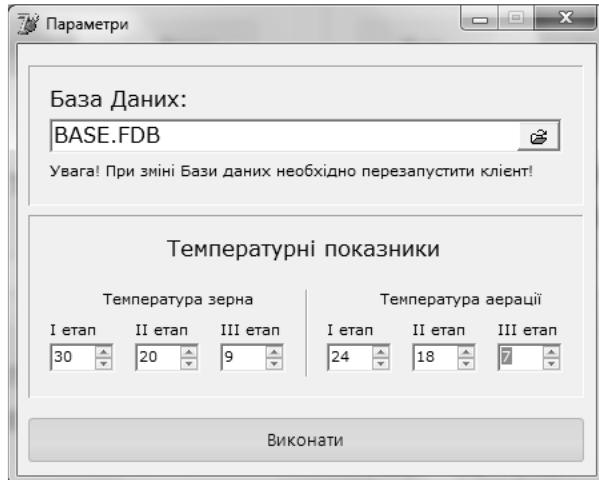


Рис. 5 – Вкладка «Параметри»

Спроектований інтерфейс користувача є інформативним, відповідає ергономічним і психологічним вимогам, які пред'являються до розробок такого типу.

Висновки

Інформаційно-програмна система управління мікрокліматом зерносховища є оригінальною програмною розробкою, що розроблена з метою створення оптимальних умов зберігання зерна в зерносховищі типу силос. Застосування запропонованої системи управління мікрокліматом зерносховища дозволяє підвищити ефективність зберігання зерна, а саме підвищити якість зерна, усунути можливість виникнення помилок від людського фактору, знизити енергоспоживання, контролювати і реєструвати стан мікроклімату у зерносховищі на протязі усього часу зберігання зернової маси.

Список літератури

1. Атаназевич, В. И. Сушка зерна. / В. И. Атаназевич - М.: Лабиринт. – 1997. – 255 с.
2. Вобликов, Е. М. Послеборочная обработка и хранение зерна / Е. М. Вобликов, В. А. Буханцов, Б .К. Маратов. // Ростов н/Д : Изд. центр «МарТ»/ – 2001. – 240 с.
3. Гуляев, Г. А. Автоматизация процессов послеборочной обработки и хранения зерна / Г. А. Гуляев // М.: Агропромиздат. – 1990. – 240 с.
4. Зерно заготовительное и постачальное. Термины и определения: ДСТУ 2422-99 - [Чинний від 24.07.99]. – К. Держспоживстандарт України, 1999. -18 с. – (Національний стандарт України).
5. Карпов, В. И. Типовая отраслевая система управления для предприятий агропромышленного комплекса/ В. И. Карпов, К. С. Мышенков, В.О. Новицкий // Пицевые продукты XXI века: Сб. докл. Юбил. междунар. науч.-практик. конф. / МГУПП: В 2 т.- М.: Изд. комплекс МГУПП. – 2001 – Т.2. – С. 211-214.

6. Хранение зерна в вентилируемых силосах типа СМВУ. Санитарная обработка, аэрация, контроль [Електронний ресурс]. - Режим доступа: www/ URL: <http://www.pks.mk.ua/aer.html>.
7. Ярошенко, М. В. Збереження зерна у зерносховищах [Електронний ресурс]/ М. В. Ярошенко, С. I. Красніков // Агробізнес сьогодні. – 2012. – Вип.14 (237). – С. 48-58. – Режим доступу: <http://www.agrousiness.com.ua/component/content/article/1170.html>.\\
8. Eidereh, E. Moisture content of wheat in the haryesting period. / Eidereh E., Y. P. Y. H. Hoven. // *Y. agric. Engng.* – Res. – 1973. – 18 p.
9. Swanson, C. O. The tffect of low tempereature in preventing damage to wheat stored with high moisture content, Cereal chemistry. / C. O. Swanson. – 1940. – P. 18-299.
10. McGaughey, Wm. H. Susceptibility of angoumo-is grain moths to *Bacillus thuringiensis* / Wm. H. McGaughey, E. A. Kinsinger // *J. Econ. Entomol.* – 1978. – v.71, N 3. – P. 435-436.
11. Nagle, R. K. A new method of grain storage for coastal areashigh moisture grain / R. K. Nagle // *Agric gazette of new south Walls.* b.84, nr. 2, – 1997. – p.113-116.
12. Wilcox, R. A. Grain preservatives / R. A. Wilcox // *Feedstuffs.* – 1972. – V.44. – Nr.33. – P. 39-55.
3. Gulyaev, G. A. automation of post-harvest processing and storage of grain. Moskow: Agropromizdat, 1990, 240 p.
4. Grain zagotavlja and pastacaldi. Termni viznachennya: DSTU 2422-99 [CINDI from 24.07.99]. Kyiv, The State Consumer Standard Of Ukraine, 1999, 18 p. – (National standard of Ukraine).
5. Karpov, V. I., Mishenkov, K. S., Novitsky, V. A. The Model of the industry management system for agro-industrial enterprises, *Food of the XXI century: Sat. Dokl. Commerative. Intern. scientific.-practical. Conf./MGUPP: In 2 T*, Moskow: Izd. complex MGUPP, 2001, **2**, 211-214.
6. Storage of grain in ventilated silos of smvu type. Sanitation, aeration, control [Web]. URL: <http://www.pks.mk.ua/aer.html>.
7. Yaroshenko, M. V., Krasnov, S. I. Problems of grain Tereshkovich, *Agrobank today*, [Web], 2012, **14** (237), 48–58, <http://www.agrousiness.com.ua/component/content/article/1170.html>.\\
8. Eidereh, E., Hoven, Y. P. Y. H. Moisture content of wheat in the haryesting period, *Y. agric. Engng.*, 1973, 18 p.
9. Swanson, C. O. The tffect of low tempereature in preventing damage to wheat stored with high moisture content, *Cereal chemistry*, 1940, 18-299.
10. McGaughey, Wm.H., Kinsinger, E. A. 'Susceptibility of angoumo-is grain moths to *Bacillus thuringiensis*, *J. Econ. Entomol.*, 1978, **3**(71), 435-436.
11. Nagle, R. K. A new method of grain storage for coastal areashigh moisture grain, *Agric gazette of new south Walls.* 1977, 2(86), 113-116.
12. Wilcox, R. A. Grain preservatives, *Feedstuffs.*, 1972, **44**(33), 39-55.

Bibliography (transliterated)

1. Afanasevich, V. I. Drying of grain. Moscow: Labrint, 1997, 255 p.
2. Voblikov, E. M., Bukhantsev, V. A., Maratov, B .To. Post-Harvest treatment and storage of grain, Rostov n/D : Izd. center "March", 2001, 240 p.

Наочність (received) 21.09.2015

ЕЛЕКТРИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ МІСЬКИХ АВТОТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

В. Д. ДАНЧУК*, В. І. КРИВЕНКО, Р. В. ОЛІЙНИК, С. М. ТАРАБАН

Кафедра електроніки та обчислювальної техніки, Національний транспортний університет, Київ, УКРАЇНА
*email: vdanchuk@ukr.net.

АНОТАЦІЯ На основі виявлених аналогій в закономірностях перебігу процесів в електричних колах та міських автотранспортних потоків розглянуто (на прикладі міського кварталу) особливості електричного моделювання структурної конфігурації міської мережі та автотранспортних потоків. В середовищі NI Multisim зібрано електричну схему (модель) кварталу, на базі якої проведено електричне моделювання розподілу міських автотранспортних потоків на ділянках даного кварталу.

Ключові слова: квартал, автотранспортні потоки, електричне моделювання, електрична схема, вхідні/виходні струми.

АННОТАЦИЯ На основе выявленных аналогий в закономерностях протекания процессов в электрических цепях и городских автотранспортных потоков рассмотрено (на примере городского квартала) особенности электрического моделирования структурной конфигурации городской сети и автотранспортных потоков. В среде NI Multisim собрано электрическую схему (модель) квартала, на базе которой проведено электрическое моделирование распределения городских автотранспортных потоков на участках данного квартала.

Ключевые слова: квартал, автотранспортные потоки, электрическое моделирование, электрическая схема, входные/выходные токи.

ELECTRIC SIMULATION OF URBAN ROAD TRAFFIC FLOWS

V. DANCHUK*, V. KRYVENKO, R. OLIYNYK, S. TARABAN

Department of Electronics and Computer Science, National Transport University, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT The features of electrical simulation of the structural configuration of urban road network and transport flows have been considered based on the identified similarities in the patterns of process operation in electric circuits and city road traffic flows. Given the topology and an implemented plan of traffic organization on road sections of urban areas, using NI Multisim a circuitry model of the quarter has been created, based on which an electric motor modeling of the distribution of urban streams in areas of the quarter has been conducted. However, simulations were carried out with different parameters of electric circuit sections. In particular, in the first case in the sections of a scheme the magnitude "normative" resistance was set; in the second case the value of an "actual" resistance was set. The "actual" resistance was calculated according to the real parameters of the actual carriage way sections of the urban quarter that allowed to create in the electrical model of the quarter the conditions of motor operation flows close to the real and accordingly - to conduct an adequate simulation of the distribution of road traffic flows in areas of the quarter. In addition, during the calculation of an "actual" resistance in the quarter sections the moving traffic lanes that are used for parking vehicles were taken into account.

Keywords: quarter, road traffic flows, electrical simulation, electric circuit, input/output currents.

Вступ

Одна з суттєвих причин погіршення транспортної ситуації в містах, яка на сьогодні, виявилася типовою – це диспропорція, що склалася між темпами розвитку автопарку та темпами розвитку вулично-дорожньої мережі (ВДМ), що призводить до погіршення умов руху, виникненню заторів, зростанню затримок, і як наслідок до значного зростання витрат палива. Аналіз стану проблеми [1-10] і проведений попередні дослідження [11,12] дозволили встановити, що в умовах надзвичайно високих темпів автомобілізації країни розв'язок проблеми оптимальної завантаженості ВДМ міста можливий шляхом створення ефективних систем моніторингу за автотранспортними потоками [12], результати якого дозволяють прийняти оптимальне управлінське рішення. Прийняття подібних рішень не

можливе без наявності якісної інформаційної основи. Відсутність системного підходу на етапі накопичення, і систематизації інформації про стан завантаженості ВДМ не дозволяє моделювати і прогнозувати розвиток ситуації. Система моніторингу повинна передбачати наступні етапи: спостереження та вимірювання фактичних параметрів автотранспортних потоків, збір статистичної інформації про характер ВДМ, її геометричні параметри, наявність технічних засобів регулювання автотранспортних потоків; обробка результатів спостереження з метою виявлення і математичного опису функціональних залежностей і закономірностей в характері руху автотранспортних потоків; візуалізація, оцінка та аналіз отриманих результатів.

Розгортання якісної мережі моніторингу автотранспортних потоків у великому місті вимагає значних фінансових, матеріальних і часових ресурсів.

У такому випадку доцільно проводити імітаційне моделювання автотранспортних потоків [2, 5-10], яке на відміну від натурних методів, дозволяє на основі ретроспективних даних щодо параметрів дорожнього руху на окремих ділянках ВДМ (вибірково) адекватно відтворювати параметри руху у всій мережі міста, а отже дозволяє встановлювати розподіл автотранспортних потоків на ділянках мережі за інтенсивністю руху автотранспорту на цих ділянках.

Мета роботи

Метою роботи є верифікація електричного моделювання міських автотранспортних потоків на базі електричної схеми (моделі) ВДМ, що відображає параметри структурної конфігурації елементів мережі та схему організації дорожнього руху на ділянках та перетинах міських вулиць та доріг.

Виклад основного матеріалу

На прикладі кварталу Шевченківського району м. Києва (Рис. 1) розглядається електротехнічна модель дослідження автотранспортних потоків [13-16] та способи (методи) її реалізації. Відповідно до інвентаризаційної відомості міста квартал утворюють магістральні вулиці загальноміського та районного значення, а саме бул. Тараса Шевченка, вул. Михайла Коцюбинського, вул. Богдана Хмельницького та вул. Пирогова. Вуличні перехрестя кварталу мають X-подібну та Т-подібну конфігурації, при цьому ділянки доріг, які утворюють ці структурні елементи мережі суттєво відрізняються одна від одної за організацією руху (на ділянках кварталу впроваджена організація одностороннього та двостороннього руху) та поздовжньо-поперечними характеристиками проїзних частин (за кількістю смуг руху, шириною однієї смуги тощо), що створює особливі умови для електричного моделювання автотранспортних потоків на ділянках кварталу, зокрема, в частині верифікації електротехнічної моделі дослідження автотранспортних потоків [13-16] та методів її реалізації.

Електротехнічна модель [13-16] має два підходи (способи) до інтерпретації структурної конфігурації ВДМ (фрагменту мережі) та автотранспортних потоків на ділянках відповідної мережі. Зокрема, кожна ділянка ВДМ у схемі електричної моделі може бути представлена як послідовне з'єднання діода та резистора, що в цілому для електричного кола відображатиме параметри конфігурації структурних елементів мережі та схему організації дорожнього руху на ділянках та перетинах міських вулиць та доріг. Таке уявлення ділянок міських вулиць та доріг дозволяє моделювати елементи ВДМ довільної конфігурації (різномислові дороги, розв'язки, перехрестя тощо) у вигляді принципових електрических схем, при цьому враховувати дозволені на перехрестях напрямки руху

транспортних засобів, розглядати ділянки вулиць та доріг з двостороннім рухом як елементи, що мають окремі проїзні частини (що відокремлені одна від іншої розділювальною смugoю), здійснювати оцінку завантаженості ВДМ автотранспортними потоками, в тому числі оцінку окремих ліній і вузлів міської мережі з точки зору перевантаження/недовантаження цих елементів.

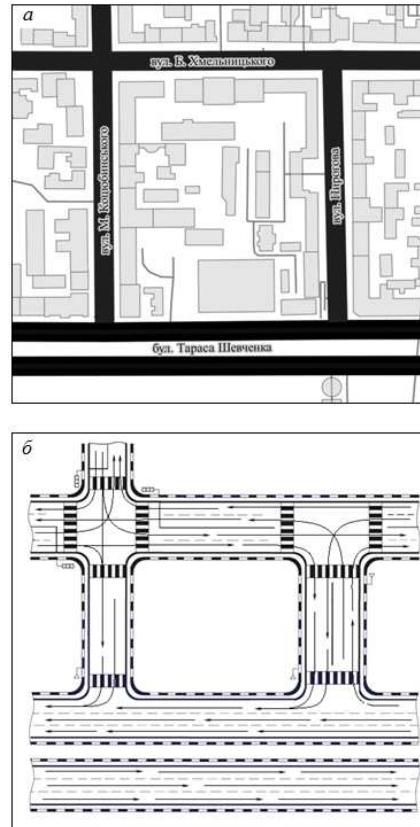


Рис. 1 – Квартал Шевченківського району м. Києва: а – топографічний план; б – план-схема організації дорожнього руху.

В той же час, міська мережа може бути представлена у вигляді іншої електричної схеми, в якій, зокрема, вуличні перехрестя моделюються вузлами, а ділянки доріг (між двома найближчими перехрестями) – опорами. При такій інтерпретації ВДМ, автотранспортний потік моделюється як сумарний (інтегрований) потік на кожній ділянці, незалежно від схеми організації руху (дозволених напрямків) на цих ділянках мережі.

З огляду на це, за кожним представленим методом, в середовищі NI Multisim було зібрано електричні схеми міського кварталу (див. Рис. 2). Наведені схеми містять такі елементи: джерела вхідних (J_i^{in} , де $i = 1, 2, \dots, n$) та вихідних (J_i^{out} , де $i = 1, 2, \dots, n$) струмів, які є аналогами вхідних та вихідних інтенсивностей автотранспортних потоків відповідно;

- опори (R_i , де $i = 1, 2, \dots, n$), що відображають поздовжньо-поперечні характеристики ділянки кварталу;

- амперметри (A_i , де $i = 1, 2, \dots, n$), які є індикаторами завантаженості ділянок кварталу.

Крім того, до складу елементів електричної схеми, яку зображенено на Рис. 2а, окрім зазначених елементів, також входять ідеальні діоди, які розподіляють струм в напрямках відповідно до реалізованої схеми організації дорожнього руху на ділянках кварталу.

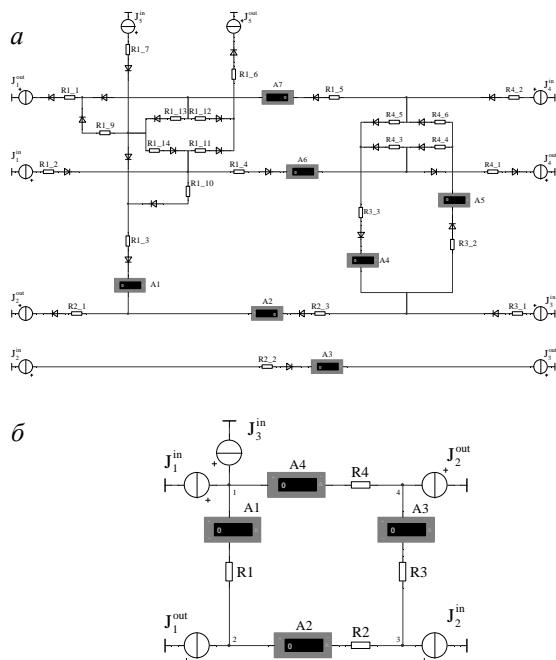


Рис. 2 – Електрична схема (модель) кварталу:
а – інтерпретація у вигляді послідовного з'єднання
діодів з резисторами; б – інтерпретація у вигляді
змішаного з'єднання опорів.

Важливо відмітити, що метод електричного моделювання за яким інтерпретація міської ВДМ значно спрощується (електрична схема кварталу зображенено на Рис. 2б) має в якості основного недоліку – обмеження на його застосування. Це обмеження, насамперед, стосується дослідження фрагментів ВДМ невеликого масштабу і, відповідно, пов’язане із неможливістю встановлення балансу між вхідними/виходними струмами електричної моделі мережі такого розміру, зважаючи на незначну кількість ділянок вхідних/виходних автотранспортних потоків відповідної мережі. Разом з тим, якщо розглядати фрагменти ВДМ більшого масштабу ця проблема вирішується наступним збільшенням відповідних ділянок, на що, безпосередньо, вказують результати попередніх досліджень [17, 18]. Однак, при моделюванні таких ВДМ (фрагментів мережі) з’являється необхідність постійного пошуку балансу між вхідними/виходними струмами моделі, оскільки зміна періоду моделювання (яка супроводжується

відповідною зміною величини вхідних/виходних струмів) призведе до порушення балансу між струмами електричної моделі відповідної ВДМ.

Як видно з Рис. 2а, електрична схема кварталу має складну розгалужену структуру; це при тому, що квартал являється найменшою структурною одиницею житлового середовища. Якщо розглядати фрагменти ВДМ більшого масштабу, наприклад, мережу адміністративного району міста, то електрична схема, виявиться складною, розрахунок якої достатньо громіздкий та трудомісткий.

Для спрощення зображення електричної схеми, в таких програмних середовищах, як NI Multisim, Electronic Workbench та ін., окрім елементів (фрагменті) електричної схеми можуть бути перетворені, при використанні опції Create Subcircuit, на окремі блоки (підсхеми) з зовнішніми затискачами. Це означає, що елементи електричної схеми ВДМ (див. Рис. 1а), зокрема ті, що стосуються моделювання перетину вулиць та доріг (в одному та більше рівнях) можуть бути перетворені у відповідні блоки.

Якщо ж опцію Create Subcircuit застосувати до елементів електричної схеми кварталу, то це дозволить отримати значно простішу та зручнішу для користування електричну модель даного фрагменту мережі (див. Рис. 3).

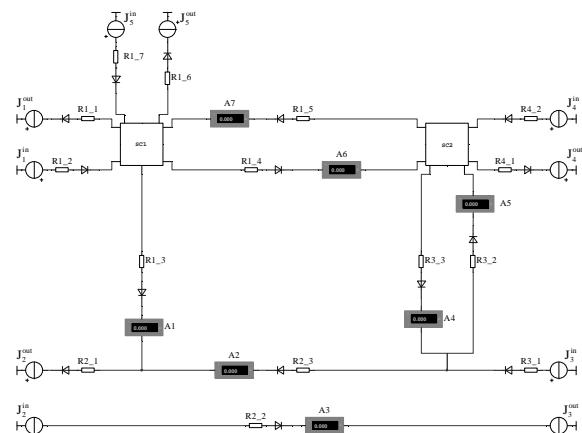


Рис. 3 – Електрична схема кварталу після застосування опції Create Subcircuit

Для моделювання інтенсивності автотранспортних потоків на базі побудованих моделей кварталу необхідно оперувати даними щодо поздовжньо-поперечних характеристик ділянок кварталу (такі дані необхідні для встановлення опорів гілок електричної схеми) та даними щодо інтенсивності автотранспортних потоків на ділянках кварталу – аналогах вхідних J_i^{in} і вихідних J_i^{out} джерел струму.

З огляду на це, розглянемо процедуру формування та обробки зазначених даних, яку було реалізовано, зокрема, для запуску моделі з більш складною інтерпретацією лінійних, функціональних

та організаційних зв'язків структурних елементів кварталу (див. Рис. 2а).

Обговорення результатів

Аналіз поздовжньо-поперечних характеристик проїздної частини ділянок кварталу, включаючи розрахункові швидкості та інтенсивності руху транспорту на цих ділянках відповідно до категорій вулиць та доріг, за якими визначаються нормативи їх проектування в плані, повздовжньому та поперечному профіях проводився на основі інвентаризаційної відомості м. Києва, нормативних документів [17, 18] та картографічного сервісу «Яндекс. Карти». За результатами цього аналізу розраховано значення опорів R_i (див. Табл.1) електричної схеми (див. Рис. 2а), зокрема, дляожної ділянки схеми встановлено «нормативний» опір – на підставі інвентаризаційної відомості міста та відповідної нормативно-технічної документації [17, 18], і «фактичний» опір – на підставі аналогічних документів та картографічного сервісу «Яндекс. Карти» (з використанням опції «Панорамний перегляд вулиць»); останній, як було встановлено, більш коректно відображає поздовжньо-поперечні характеристики ділянок кварталу. Крім того при розрахунку «фактичного» опору на ділянках кварталу враховувались смуги руху, що фактично «відводяться» для паркування транспортних засобів.

Для забезпечення моделі наявними вхідними/виходними струмами, на відповідних ділянках кварталу проводились обстеження інтенсивності автотранспортних потоків. Обстеження проводились одночасно на всіх ділянках в період – 7:00-22:00 год., та в дні тижня для яких зберігається закономірність добового ходу інтенсивності автотранспортних потоків. Наведений період доби включає фази пікових (максимальних) завантажень доріг, що дозволяє коректно провести верифікацію електротехнічної моделі дослідження автотранспортних потоків [13-16] та методів її реалізації.

За результатами експерименту дляожної ділянки кварталу побудовано профіль розподілу інтенсивності автотранспортних потоків, що чисельно відповідає вхідному/виходному струму електричної моделі (див. Рис. 4). Незважаючи на ранкову мінливість, автотранспортні потоки розглядаються як квазістационарні, оскільки час релаксації їх інтенсивності значно перевищує час знаходження транспортних засобів в межах міського кварталу. Для елімінації впливу технічних засобів регулювання дорожнього руху (дорожніх знаків, розмітки, обладнання, світлофорів тощо) на характер динаміки інтенсивності автотранспортного потоку, в зазначеных розподілах зміну інтенсивності задано з дискретністю 20 хвилин, що значно перевищує тривалості циклу світлофорного регулювання на ділянках кварталу.

Таблиця 1 – Опори електричної схеми кварталу (див. Рис. 2а)

«НОРМАТИВНИЙ» ОПІР					
R _{1_01}	0,112	R _{1_09}	0,004	R _{3_02}	0,067
R _{1_02}	0,112	R _{1_10}	0,005	R _{3_03}	0,067
R _{1_03}	0,067	R _{1_11}	0,004	R _{4_01}	0,031
R _{1_04}	0,061	R _{1_12}	0,005	R _{4_02}	0,031
R _{1_05}	0,061	R _{1_13}	0,005	R _{4_03}	0,006
R _{1_06}	0,096	R _{2_01}	0,017	R _{4_04}	0,004
R _{1_07}	0,096	R _{2_03}	0,029	R _{4_05}	0,008
R _{1_08}	0,004	R _{3_01}	0,015	R _{4_06}	0,008

«ФАКТИЧНИЙ» ОПІР					
R _{1_01}	0,224	R _{1_09}	0,013	R _{3_02}	0,556
R _{1_02}	0,224	R _{1_10}	0,018	R _{3_03}	0,556
R _{1_03}	0,227	R _{1_11}	0,013	R _{4_01}	0,061
R _{1_04}	0,123	R _{1_12}	0,018	R _{4_02}	0,061
R _{1_05}	0,123	R _{1_13}	0,005	R _{4_03}	0,014
R _{1_06}	0,343	R _{2_01}	0,017	R _{4_04}	0,004
R _{1_07}	0,343	R _{2_03}	0,029	R _{4_05}	0,019
R _{1_08}	0,004	R _{3_01}	0,015	R _{4_06}	0,008

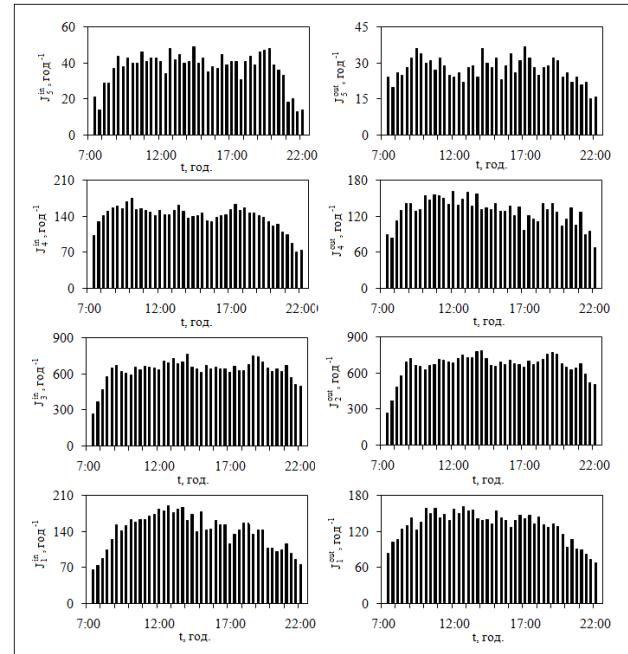


Рис. 4 – Розподіли вхідних/виходних струмів для моделі кварталу протягом аналізованого періоду

Необхідна умова моделювання – це рівність вхідних та вихідних струмів:

$$\sum_{i=1}^n J_i^{in}(t) = \sum_{i=1}^n J_i^{out}(t) \quad (1)$$

Дана умова перевірялась за формулою:

$$E(t) = \frac{\sum_{i=1}^n J_i^{in}(t) - \sum_{i=1}^n J_i^{out}(t)}{\sum_{i=1}^n J_i^{in}(t)} \cdot 100\% \quad (2)$$

Причини розходження між вхідними та вихідними автотранспортними потоками обумовлені наявністю у відповідній ВДМ об'єктів тяжіння (житлові будинки, установи, підприємства обслуговування та інші громадські будівлі і споруди) та перевантаженістю цієї мережі. Емпіричні дослідження сумарних вхідних та вихідних автотранспортних потоків протягом аналізованого періоду (7:00-22:00 год.) показало, що розходження цих потоків не перевищує 4% (див. Рис. 5). Оскільки, розходження вхідних/вихідних потоків однозначно залежить від масштабу мережі, то очевидно, що при моделюванні макромасштабних об'єктів мережі ці розходження стануть суттєвими.

Оскільки для моделі кварталу баланс (1) виконується, це дозволило в середовищі NI Multisim провести електричне моделювання розподілу цих потоків на ділянках даного кварталу. При цьому, моделювання здійснювалось з різними параметрами ділянок електричної схеми (див. Табл. 1). Зокрема, в першому випадку на ділянках схеми задавалась величина «нормативного» опору; в другому – величина «фактичного» опору.

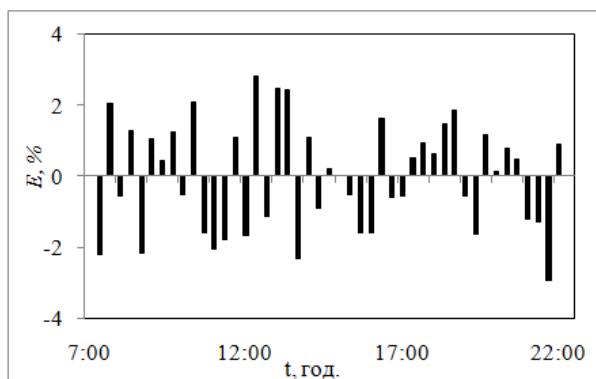


Рис. 5 – Розходження між сумарними вхідними/вихідними автотранспортними потоками кварталу

Порівняння модельних даних з даними експерименту (натурні спостереження за інтенсивністю автотранспортних потоків на ділянках кварталу) показало на неоднозначність отриманих результатів. Так, у першому випадку моделювання (на ділянках електричної схеми задавався «нормативний» опір) інтенсивності автотранспортних потоків за моделлю (покази амперметрів) значно розходяться з результатами експерименту. Середнє значення відносної похибки для різних ділянок варіювалось в межах від 20 до 170%. Залучення в модель значень «фактичного» опору суттєво покращила результати моделювання, а саме – похибка моделювання не перевишила 10%. Розподіл відносної похибки результатів моделювання представлено на рис. 6 (для електричної схеми з «нормативними» опорами – $\bar{\varepsilon}_n$, та «фактичними» опорами – $\bar{\varepsilon}_f$).

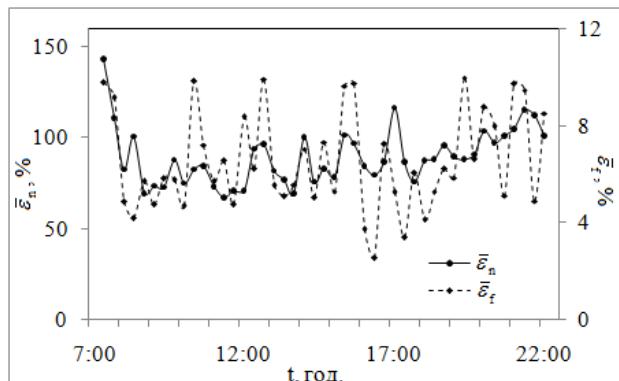


Рис. 6 – Розподіл відносної похибки між результатами моделювання та експерименту протягом аналізованого періоду (для електричної схеми з «нормативними» опорами – $\bar{\varepsilon}_n$, та «фактичними» опорами – $\bar{\varepsilon}_f$).

Таким чином, на основі виявленіх аналогій в закономірностях перебігу процесів в електричних колах та міських автотранспортних потоків [13-16] розглянуто особливості застосування методу електричного моделювання (на прикладі міського кварталу) зі складною інтерпретацією лінійних, функціональних та організаційних зв'язків елементів (ділянок вулиць та доріг) структурної конфігурації ВДМ.

Висновки

На прикладі кварталу Шевченківського району м. Києва проведено верифікацію електротехнічної моделі [13-16] та методів її реалізації. Отримані результати вказують на те, що електрична модель якісно функціонує у випадку коли на ділянках електричної схеми задається величина «фактичного» опору. Оскільки цей опір розраховується за реальними параметрами проїзних частин ділянок відповідної ВДМ, це дозволяє в електричній моделі мережі відтворювати умови функціонування автотранспортних потоків, максимально наближені до реальних і, відповідно, – здійснювати адекватне моделювання завантаженості міської ВДМ автотранспортними потоками.

Список літератури

- 1 Agafonov, A. A. City transport motion parameters forecasting by satellite monitoring data and statistics / A. A. Agafonov, A. V. Chernov, A. V. Sergeyev // PRIA-2013. – 2013. – Vol. 2. – P. 489-491.
- 2 Altinkaya, M. Urban Bus Arrival Time Prediction: A Review of Computational Models / M. Altinkaya, M. Zontul // International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE) – 2013. – Vol. 2, No. 4. – P. 164-169.

- 3 **Bera, S.** Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: the state of the art / **S. Bera, K. V. Krisha Rao** // *European Transport*. – 2011. – Vol. 49, P. 3-23.
- 4 **Bin, Y.** Bus arrival time prediction using support vector machines / **Y. Bin, Y. Zhongzhen, and Y. Baozhen** // *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*. – 2007. – Vol. 10, No. 4, P. 151-158.
- 5 **Cascetta, E.** Transportation Systems Analysis: Models and Applications. / **E. Cascetta** // *New York: Springer*. – 2009. – 752 p.
- 6 **Daganzo, C. F.** The Lagged Cell-Transmission Model / **C. F. Daganzo** // In: *Ceder, A. (ed), Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*. – 1999. – P. 81-104.
- 7 **Fambro, D.** Application of subset autoregressive integrated moving average model for short-term freeway traffic volume forecasting / **D. Fambro, S. Lee** // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*. – 2007. – P. 179-188.
- 8 **Faouzi, N.** Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges / **N. Faouzi, H. Leung and A. Kurian** // *A survey, Information Fusion*. – 2011. – Vol. 12, №. 1. – P. 4-10.
- 9 **Ghosh, B.** Multivariate Short-Term Traffic Flow Forecasting Using Time-Series Analysis / **B. Ghosh, B. Basu, M. O'Mahony** // *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*. 2009. – Vol. 10, No. 2. – P. 246-254.
- 10 **Hoogendoorn, S. P.** State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling / **S. P. Hoogendoorn, P. H. Bovy** // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*. – 2001. – Vol. 215, No. 4. – P. 283-303.
- 11 **Тарабан, С. М.** Сучасний стан та тенденції розвитку вулично-дорожньої мережі м. Києва / **С. М. Тарабан** // *Автомобільні дороги і дорожнє будівництво*. – К.:НТУ. – 2013. – Вип. 90. – С. 24-32.
- 12 **Данчук, В. Д.** Мережа моніторингу автотранспортних потоків у вулично-дорожній мережі великого міста / **В. Д. Данчук, Р. В. Олійник, С. М. Тарабан** // *Вісник НТУ*. – 2014. – №30(1). – С. 86-94.
- 13 **Данчук, В. Д.** Електротехнічна модель дослідження транспортних потоків / **В. Д. Данчук, В. І. Кривенко, Р. В. Олійник, С. М. Тарабан** // *Вісник НТУ*. – 2010. – № 21(2). – С. 28-32.
- 14 **Данчук, В. Д.** Електротехнічна модель розподілу транспортних потоків у вулично-дорожній мережі міста / **В. Д. Данчук, В. І. Кривенко, Р. В. Олійник, С. М. Тарабан**. // *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Науковий журнал*. – К.:НТУ. – 2011. – Вип. 8. – С. 45 -49.
- 15 UA 86586 U / Аналогова модель транспортної системи / **В. Д. Данчук, Р. В. Олійник, С. М. Тарабан** - и 2013 06237; заявл. 20.05.2013; опубл. 10.01.2014.
- 16 UA 85069 U / Спосіб регулювання та завантаження вулично-дорожньої мережі міста транспортними потоками / **В. Д. Данчук, Г. В. Карападаков, В. І. Кривенко, Р. В. Олійник, С. М. Тарабан** - и 2013 05607; заявл. 30.04.2013; опубл. 11.11.2013.
- 17 ДБН 360-92* «Містобудування. Планування і забудова міських і сільських поселень» – К.:Украпрхбудінформ. – 1993. – 107 с.
- 18 ДБН В.2.3-5-2001 «Споруди транспорту. Вулиці та дороги населених пунктів».

Bibliography (transliterated)

- 1 **Agafonov, A. A., Chernov, A. V., Sergeyev, A. V.** City transport motion parameters forecasting by satellite monitoring data and statistics // *PRIA-2013*, 2013, 2, 489-491.
- 2 **Altinkaya, M., Zontul, M.** Urban Bus Arrival Time Prediction: A Review of Computational Models // *International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*, 2013, 2(4), 164-169.
- 3 **Bera, S., Krisha Rao K. V.** Estimation of origin-destination matrix from traffic counts: the state of the art // *European Transport*, 2011, 49, 3-23.
- 4 **Bin, Y., Zhongzhen, Y., Baozhen, Y.** Bus arrival time prediction using support vector machines // *Journal of Intelligent Transportation Systems: Technology, Planning, and Operations*, 2007, 10(4), 151-158.
- 5 **Cascetta, E.** Transportation Systems Analysis: Models and Applications // *New York: Springer*, 2009, 752 p.
- 6 **Daganzo, C. F.** The Lagged Cell-Transmission Model // In: *Ceder, A. (ed), Proceedings of the 14th International Symposium on Transportation and Traffic Theory*, 1999, 81-104.
- 7 **Fambro, D., Lee, S.** Application of subset autoregressive integrated moving average model for short-term freeway traffic volume forecasting // *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 2007, 179-188.
- 8 **Faouzi, N., Leung, H., Kurian, A.** Data fusion in intelligent transportation systems: Progress and challenges // *A survey, Information Fusion*, 2011, 12(1), 4-10.
- 9 **Ghosh, B., Basu, B., O'Mahony, M.** Multivariate Short-Term Traffic Flow Forecasting Using Time-Series Analysis // *Intelligent Transportation Systems, IEEE Transactions on*, 2009, 10(2), 246-254.
- 10 **Hoogendoorn, S. P., Bovy, P. H.** State-of-the-art of vehicular traffic flow modeling // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 2001, 215(4), 283-303.
- 11 **Taraban, S. M.** The current state and trends of the road network of Kyiv // *Roads and road construction*. - Kyiv, NTU, 2013, 90, 24-32.
- 12 **Danchuk, V. D., Oliynyk, R. V., Taraban, S. M.** Network of monitoring of road traffic flows in road network of large cities // *Visnyk NTU*, 2014, 30(1), 86-94.
- 13 **Danchuk, V. D., Kryvenko, V. I., Oliynyk, R. V., Taraban, S. M.** Electrical model of the traffic // *Visnyk NTU*, 2010, 21(2), 28-32.
- 14 **Danchuk, V. D., Kryvenko, V. I., Oliynyk, R. V., Taraban, S. M.** Electrical model of distribution of traffic flows in a road network of the city // *Project management, systems analysis and logistics. Science magazine*. Kyiv: NTU, 2011, 8, 45-49.
- 15 UA 86586 U / Analog model of transport system / **Danchuk V. D., Oliynyk R. V., Taraban S. M.** - u 2013 06237; appl. 05/20/2013; publ. 01.10.2014.
- 16 UA 85069 U / Method of regulation and load of road network of the city traffic / **Danchuk V. D., Kryvenko V. I., Oliynyk R. V., Taraban S. M.** - u 2013 05607; appl. 04/30/2013; publ. 11.11.2013.
- 17 DBN 360-92 * "Urban Planning. Planning and development of urban and rural settlements" – Kyiv: Ukrarhbudinform, 1993, 107 p.
- 18 DBN V.2.3-5-2001 "Transport facilities. Streets and roads in settlements."

Національна (received) 13.10.2015

УДК 621.43.044

СИСТЕМА УПРАВЛЕНИЯ ЗАЖИГАНИЕМ ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ SECU-3L (Lite)

A. A. ШАБЕЛЬНИКОВ

Інженер-программист, Київ, УКРАЇНА
email: shabelnikov@secu-3.org

АННОТАЦІЯ Розроблено блок керування запалюванням для двигуна внутрішнього згоряння. Система являє собою електронний пристрій на основі мікроконтролера з вбудованим датчиком абсолютноного тиску та силовими драйверами катушок запалювання. За допомогою даних від датчиків положення коленчастого валу, абсолютноого тиску та положення дросельної заслінки система керує кутом випередження запалювання, блокуванням стартера та відсічкою палива на примусовому холостому ходу. Пристрій може бути підключений до персонального комп'ютера для моніторингу, налагодження та діагностики через вбудований USB-інтерфейс із гальванічною розв'язкою. Використання системи дозволяє оптимізувати роботу двигуна та поліпшити його експлуатаційні показники.

Ключові слова: мікроконтролер, мікропроцесорне управління запалюванням, SECU-3, катушка запалювання, двигун внутрішнього згоряння, датчик положення коленчастого валу, датчик абсолютноого тиску

АННОТАЦИЯ Разработан блок управления зажиганием для двигателя внутреннего сгорания. Система представляет собой электронное устройство на основе микроконтроллера со встроенным датчиком абсолютного давления и силовыми драйверами катушек зажигания. С помощью данных, полученных от датчиков положения коленчатого вала, абсолютноого давления и положения дроссельной заслонки, система управляет углом опережения зажигания, а также блокировкой стартера и отсечкой топлива на принудительном холостом ходу. Устройство может быть подключено к персональному компьютеру для мониторинга, настройки и диагностики через встроенный USB-интерфейс с гальванической развязкой. Использование системы позволяет оптимизировать работу двигателя и улучшить его эксплуатационные характеристики.

Ключевые слова: микроконтроллер, микропроцессорное управление зажиганием, SECU-3, катушка зажигания, двигатель внутреннего сгорания, датчик положения коленчатого вала, датчик абсолютноого давления

IGNITION CONTROL SYSTEM FOR INTERNAL COMBUSTION ENGINES SECU-3L (Lite)

A. SHABELNIKOV

Software developer, Kiev, UKRAINE

ABSTRACT The article deals with research and development of microcontroller based ignition control system for internal combustion engine. The aim of this work is to develop versatile system with flexible monitoring, tuning and diagnostics capabilities, with support of different synchronization options, sensors and actuators. The task is solved by designing a microcontroller based electronic device, developing embedded software for it and software for monitoring, tuning and diagnostics. Device also includes embedded manifold air pressure sensor and two ignition coil drivers. Signals from crankshaft position, manifold air pressure and throttle position sensors along with board voltage come in to the input of system. By means of mentioned data, system carries out calculations and controls ignition timing, producing control actions for ignition coils. Board voltage is used to control ignition coil's change time (dwell). Also, system controls idle cut-off valve, used to cut off fuel at the forced idle conditions and controls blocking of starter. Blocking of starter is used on cranking, to turn off starter when engine speed is above set threshold. Device can be connected to the personal computer for monitoring, tuning and diagnostics of system via embedded insulated USB interface, which makes connection safer. Software allows to change key settings and lookup tables of ignition timing in the real time, to perform inputs' and outputs' functions remapping. Embedded software and software for personal computer are open source.

Using of this system allows to optimize working of engine and to increase its operational characteristics. Coolant and intake air temperature sensors are not used in this system, it will be carried out in the future. Also, support of multi spark mode can be added to the system.

Keywords: microcontroller, microprocessor controlled ignition, SECU-3, ignition coil, engine, crankshaft position sensor, manifold absolute pressure sensor

Введение

Сегодня во всем мире продолжают находиться в эксплуатации автотранспортные средства с

механическими или сильно устаревшими электронными системами зажигания, которые не отвечают современным требованиям, в том числе и экологическим. Это, в первую очередь, обусловлено

низкою точнотю регулювання угла опереження зажигання (УОЗ), нестабільнотю динаміческих параметров системи, использованием устаревших технических решений, а также отсутствием возможности настройки системы.

В то же время как эксплуатационные, так и экологические характеристики этих автотранспортных средств (двигателей) можно заметно улучшить путем использования современных компьютерных систем и систем зажигания с повышенной энергией искрового разряда [1]. В частности, использование микропроцессоров для управления зажиганием позволяет не только существенно упростить аппаратную часть системы, но и применять сложные и сравнительно гибкие алгоритмы управления [2]. Об одной из таких систем идет речь в данной статье [3].

Цель работы

Целью работы является проведение исследований и разработка микропроцессорной системы управления зажиганием двигателя внутреннего сгорания (ДВС) с открытыми исходными кодами программного обеспечения и открытой документацией на аппаратное обеспечение. При разработке системы используются недорогие и доступные на отечественном рынке комплектующие.

Изложение основного материала

Система управления зажиганием *SECU-3L* представляет собой переработанную версию предыдущей разработки автора – блока *SECU-3T* [4] и является программно совместимой с ней (речь идет как о встроенной программе, так и о программе для персонального компьютера). Встроенное программное обеспечение (ПО) записано в энергонезависимой памяти микроконтроллера системы, а ПО, выполняемое на персональном компьютере (ПК), предназначено для мониторинга, настройки и диагностики системы. Структурная схема системы показана на рис. 1.

Таким образом, система управления зажиганием *SECU-3L* состоит из датчиков, исполнительных устройств и блока электронного управления. Плата блока управления, в свою очередь, включает такие узлы: 8-ми разрядный микроконтроллер, дискретные входы, аналоговые входы, встроенный датчик абсолютного давления (ДАД), формирователь сигнала с датчика начала отсчета (ДНО) или датчика фаз газораспределения (ДФ), формирователь сигнала с датчика положения коленчатого вала (ДПКВ), интерфейс с ПК с гальванической развязкой, схему питания и защиты, два драйвера катушек зажигания, драйвер реле блокировки стартера и драйвер клапана экономайзера принудительного холостого хода (ЭПХХ). Все выходы (драйверы) и входы имеют встроенную защиту.

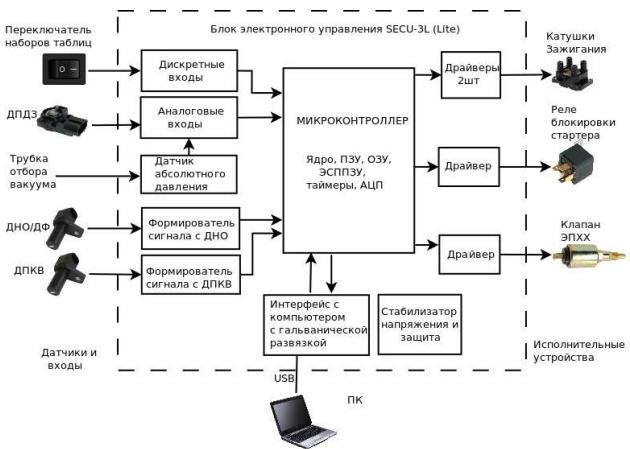


Рис. 1 – Структурная схема системы управления зажиганием *SECU-3L*

Печатная плата блока управления представлена на рис. 2. На ней установлен светодиод (*Check Engine*), который выводится на переднюю крышку корпуса и предназначен для сигнализации о неисправностях и ошибках в работе системы.

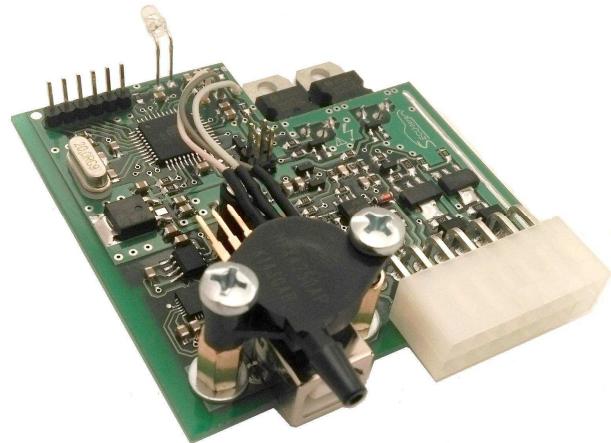


Рис. 2 – Внешний вид платы блока управления

Плата размещается в корпусе из алюминиевого профиля; внешний вид блока управления в собранном виде показан на рис. 3. На передней крышке видно штуцер ДАД, USB-разъем и разъем для подключения датчиков и исполнительных устройств. Светодиод выведен на заднюю крышку.

Рассмотрим кратко принципиальную электрическую схему блока (рис. 4). Схема включает в себя следующие основные компоненты: ДАД (*PS1*); микроконтроллер (*U4*); микросхему интерфейса *USB* (*U1*); микросхему гальванической развязки (*U3*); микросхему с двумя компараторами для входов формирователей сигналов синхронизации (*U5*); микросхему *U6* для получения стабильного напряжения 5 В с защитой на диоде *VD8* и каскады на

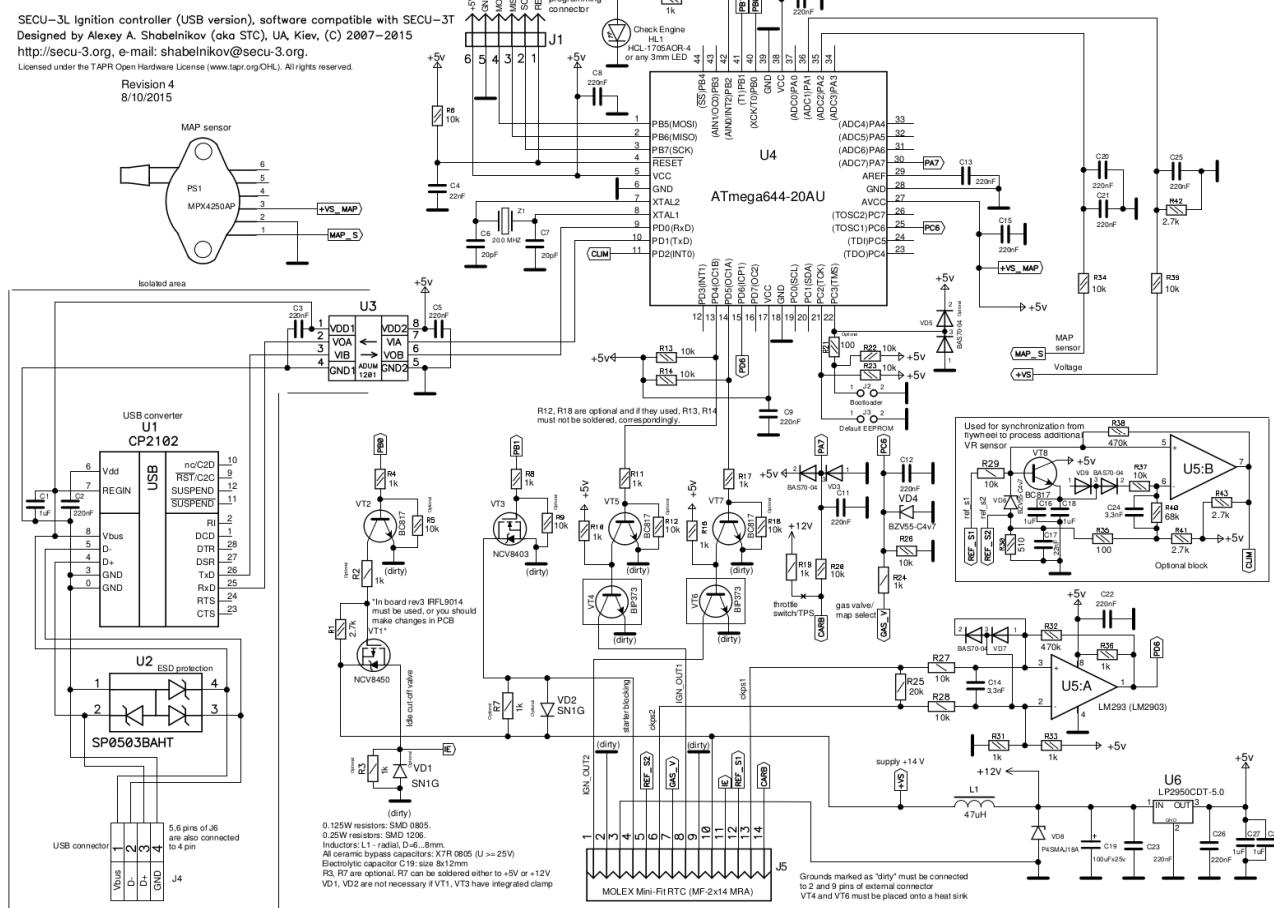
транзисторах для управления исполнительными устройствами ($VT1-VT7$).



Рис. 3 – Блок управления в собранном виде

Сигналы с ДПКВ поступают на вход компаратора $U5:A$, включенного по дифференциальной схеме для подавления синфазных помех [5] и имеющего гистерезис приблизительно 100–150 мВ. На выходе компаратора сигнал представляет собой прямоугольные импульсы, идущие на специальный вход прерывания микроконтроллера $ICP1$. При этом сигналы с ДН0 или ДФ поступают на вход схемы на $U5:B$. То есть данная схема работает аналогично схеме на $U5:A$, хотя есть и принципиальное отличие – наличие эмиттерного повторителя на транзисторе $VT8$ и конденсаторов $C16$ и $C18$. При этом напряжение на конденсаторах меняется в зависимости от частоты и амплитуды поступающих на вход импульсов.

Напряжение через диод $VD9$ и резистор $R37$ поступает на инвертирующий вход компаратора и, складываясь с напряжением, поступающим через резистор $R40$, меняет порог чувствительности схемы формирователя. Таким образом, меняется чувствительность от оборотов коленвала, что, в свою очередь, увеличивает стойкость системы к помехам.



Выходной сигнал с компаратора *U5:B* поступает на вход прерывания микроконтроллера *INT0*. Сигнал с ДАД *PS1* поступает на RC-цепь, образованную резистором *R34* и конденсаторами *C20* и *C21*, где происходит предварительная фильтрация сигнала. Дополнительная фильтрация сигнала осуществляется в программном обеспечении (*moving average*) [6]. Аналогичным образом происходит и измерение напряжения бортовой сети. Напряжение поступает на делитель напряжения на резисторах *R39* и *R42*, выход которого зашунтируван конденсатором *C25*.

Вход для датчика положения дроссельной заслонки (ДПДЗ) (или концевого выключателя дроссельной заслонки) образован элементами *R19*, *R20*, *C11* и *VD3*. Резистор *R19* устанавливается на плату только в случае использования данной системы на карбюраторном двигателе (положение дроссельной заслонки определяется концевым выключателем). Вход для переключения наборов таблиц (помечен на схеме как *GAS_V*) включает элементы *R24*, *R26*, *V D4* и *C12*.

В схеме имеется один выход с верхним плечом, предназначенный для управления клапаном экономайзера принудительного холостого хода (ЭПХХ). Узел образован транзисторами *VT1* и *VT2*. Диод *VD1*, совместно со встроенным диодом транзистора *VT1*, защищают выходной транзистор от выбросов напряжения (индуктивная нагрузка). Транзистор *VT3*, защищенный диодом *VD2*, управляет реле блокировки стартера.

Стоит отметить, что использованные в данной схеме транзисторы *VT1* и *VT3* имеют встроенную защиту и не нуждаются в диодах *VD1* и *VD2*, соответственно. Упомянутые диоды нужны только в случае применения обычных, незащищенных транзисторов.

Для управления катушками зажигания используются специализированные драйверы (транзисторы *VT4* и *VT6*) [7]. Последние имеют встроенную защиту от короткого замыкания и перегрева. Первый канал управления катушкой зажигания образован транзисторами *VT4* и *VT5*, а второй – транзисторами *VT6* и *VT7*. Для индикации ошибок (Check Engine) предназначен светодиод *HL1*.

На плате имеются перемычки *J2* и *J3*, контакты которых подключены к линиям портов микроконтроллера. Первая перемычка предназначена для аварийного запуска встроенного загрузчика (*boot loader*), а вторая – для принудительной загрузки резервной копии параметров из памяти программ в электрически стираемое перепрограммируемое постоянное запоминающее устройство (ЭСППЗУ). Не смотря на то, что контакты *J2* и *J3* не выведены на внешний разъем, они могут быть использованы как выходы для альтернативных функций.

Встроенная программа записывается в микроконтроллер путем подключения специального программатора (*STK200/300*) к разъему на плате (*J1*).

Программатор встроен в основную программу и необходим только для записи загрузчика, то есть используется один раз после изготовления устройства (или для обновления загрузчика). Все дальнейшие действия выполняются с помощью специальной программы *SECU-3 Manager*, развитие и разработка которой происходит синхронно со встроенной программой.

Кратко рассмотрим алгоритм синхронизации и выработки импульсов зажигания с использованием ДПКВ и синхродиска 36-1 (36 зубьев, один из которых отсутствует) на примере 4-х цилиндрового, 4-х тактного двигателя, зажигание попарно-параллельное (Wasted Spark) [7; 8]. ДПКВ и синхродиск показаны на рис. 5. В рассматриваемом примере ДПКВ установлен таким образом, что в момент прохождения первого зуба до верхней мертвой точки (ВМТ) 1-го или 4-го цилиндра остается 70° . ВМТ в цилиндрах 2 или 3 будет через 180° или $36 / 2 = 18$ зубьев.

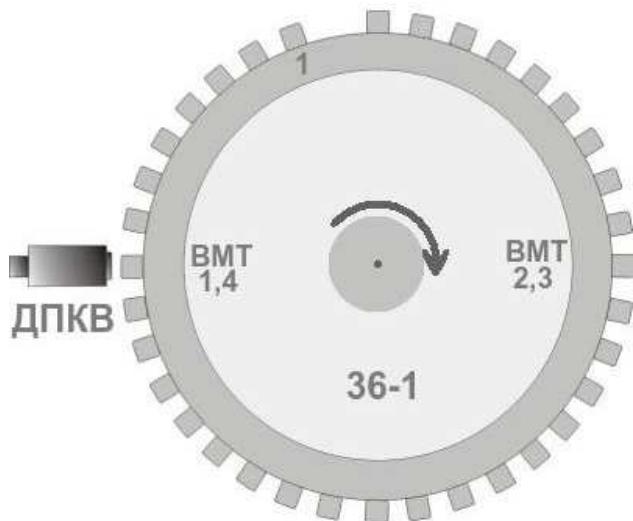


Рис.5 – ДПКВ и синхродиск 36-1

ДПКВ представляет собой магнитный сердечник, на который намотано достаточное количество витков провода. При прохождении мимо сердечника датчика зубьев (синхродиск выполнен из стали) в обмотке ДПКВ меняется магнитный поток, и как следствие, возникает переменная электродвижущая сила (ЭДС). По экранированному кабелю сигнал поступает в блок управления, где он преобразуется в прямоугольные импульсы и подается на вход прерывания микроконтроллера. Вид сигнала с ДПКВ (ЭДС) показан на рис. 6.

Закрашенными кругами показан переход напряжения через ноль при возникновении прерывания. Таким образом, прерывание возникает в моменты времени, когда напротив ДПКВ находится центр зуба. Временной интервал между соседними зубьями равен t , а временной интервал между последним и первым зубом равен $2t$.

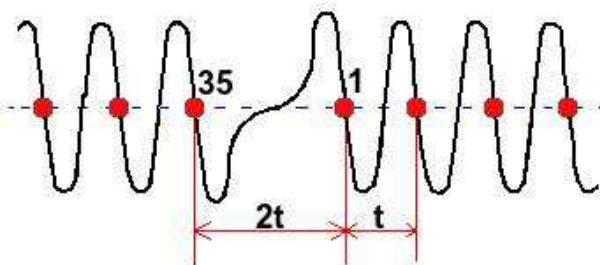


Рис. 6 – Вид сигналу с ДПКВ

В момент запуска двигателя встроенная программа пытается найти 1-й зуб. Для этого в обработчике прерывания сохраняется текущее значение таймера, и из него вычитается предыдущее значение. Результат соответствует времени t и тоже сохраняется. Текущее значение t сравнивается с предыдущим и, если предыдущее значение превосходит текущее более чем в 1,5 раза, считается, что найден 1-й зуб (произошла так называемая синхронизация).

В момент прерывания на 35-м зубе производится запуск специально выделенного таймера, который срабатывает через время t и инициирует вызов обработчика прерывания ДПКВ. Таким образом, происходит восстановление отсутствующего 36-го зуба. При этом при каждом прерывании номер текущего зуба увеличивается. К номерам зубьев, в свою очередь, привязываются различные события, что значительно увеличивает точность при неравномерном вращении коленчатого вала (особенно на пуске и низких оборотах).

Момент времени зажигания вычисляется следующим образом. Максимально возможный УОЗ принят равным 60° . За 70° до ВМТ (на 1-м или 19-м зубе) начинается отсчет УОЗ, и текущее значение УОЗ равно 70° . На каждом зубе из текущего значения вычитается $Dpc = 10^\circ$ ($360^\circ / 36$ зубьев = 10°), и результат сравнивается с заданным значением УОЗ.

Если разница (Ad) между текущим и заданным значениями УОЗ меньше 2-х зубьев, то запускается отдельно выделенный таймер на время, равное $(Ad * t) / Dpc$. По истечении этого времени закрывается транзистор, через который происходило накопление энергии в соответствующей катушке зажигания (КЗ), и в цилиндре происходит искровой разряд. Причем, если отсчет начинался на 1-м зубе, то закрывается транзистор $VT4$, а если на 19-м зубе, то транзистор $VT6$.

Начало накопления энергии в катушке зажигания (открытие соответствующего транзистора) происходит за определенное время до искрового разряда в соответствующем цилиндре [9]. Это время определяется напряжением бортовой сети: в общем случае, чем меньше напряжение, тем больше времени нужно катушке, чтобы накопить необходимую

энергию. При этом данная зависимость является нелинейной. Описанная зависимость задается таблично с последующим использованием линейной интерполяции. Управление накоплением энергии КЗ реализовано аналогичным образом, как и УОЗ, с привязкой к зубьям синхродиска.

Рассмотрим, каким образом рассчитывается угол опережения зажигания (УОЗ) в различных режимах работы двигателя [9]. Функции зависимости УОЗ от оборотов коленчатого вала и давления воздуха во впускном коллекторе заданы таблично с использованием линейной интерполяции.

Тогда на пуске имеем:

$$УОЗ = START(RPM) + OctCorr.$$

На холостом ходу (ХХ):

$$УОЗ = IDLE(RPM) + IDLREG(RPM) + OctCorr.$$

В рабочем режиме:

$$УОЗ = WORK(RPM, MAP) + OctCorr,$$

где: $START$ – таблица УОЗ на пуске; $IDLE$ – таблица УОЗ на холостом ходу; $WORK$ – таблица УОЗ под нагрузкой; $IDLREG$ – коррекция УОЗ от регулятора оборотов ХХ; RPM – обороты коленчатого вала (мин^{-1}), MAP – абсолютное давление во впускном коллекторе (kPa), $OctCorr$ – значение коррекции УОЗ (константа).

Переход с пускового режима на рабочий происходит при превышении заданных оборотов (как правило, $500\text{--}800 \text{ мин}^{-1}$). Переход с режима ХХ в рабочий режим и наоборот производится по ДПДЗ или срабатыванию концевого выключателя дроссельной заслонки (для большинства карбюраторных двигателей). Расчет УОЗ производится в основном цикле программы, причем, его значение ограничивается установленными пределами, а результат передается в подпрограмму обработки прерывания ДПКВ.

Функция линейной интерполяции, записанная на языке программирования Си, выглядит следующим образом:

```
int16_t simple_interpolation(int16_t x, int16_t a1,  
int16_t a2, int16_t x_s, int16_t x_l, uint8_t m) {  
    return ((a1 * m) + (((int32_t)(a2 - a1) * m) * (x -  
    x_s)) / x_l);}
```

Функция принимает на вход аргумент x , два соседних значения функции ($a1$, $a2$), значение аргумента, соответствующее $a1$, длину отрезка по оси аргумента между значениями функции $a1$ и $a2$, множитель (m) для повышения точности вычислений (так как используются числа с фиксированной запятой).

Внешний вид программы *SECU-3 Manager*, которая используется для настройки параметров системы, таблиц УОЗ и диагностики, представлен на рис. 7.

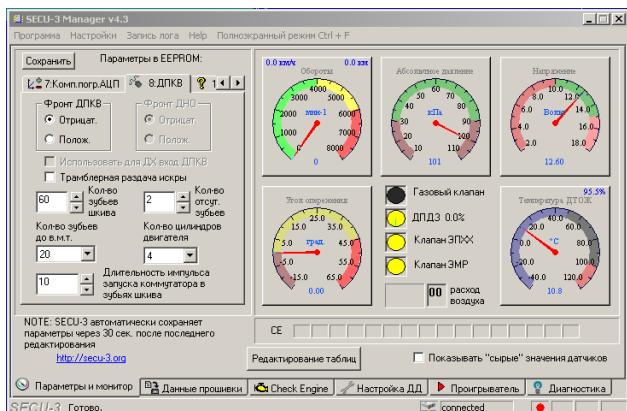


Рис. 7. – Інтерфейс програми SECU-3 Manager

Обсуждение результатов

Разработана система управления зажиганием ДВС, которая обладает следующими основными возможностями и преимуществами:

- поддержка 1, 2, 3, 4, 5, 6 и 8-ми цилиндровых двигателей;
- два канала управления катушками зажигания, позволяющих обойтись без высоковольтного распределителя на 2-х и 4-х цилиндровых двигателях;
- все выходы системы имеют температурную защиту и защиту от короткого замыкания;
- переключение между 2-мя выбранными наборами таблиц, что полезно при использовании газобаллонного оборудования (ГБО);
- блокировка стартера для более комфортного запуска двигателя (система сама выключит стартер по достижении заданных оборотов);
- управление клапаном ЭПХХ (для карбюраторных двигателей);
- различные способы синхронизации: от датчика Холла (трамблер бесконтактной системы зажигания); от ДПКВ. При этом можно использовать синхродиски с 16..200 зубьями, как с отсутствующими зубьями, так и без них (в этом случае используется дополнительный датчик, называемый ДНО);
- возможность переназначения функций всех входов и выходов для альтернативных функций;
- конфигурирование и настройка через USB-интерфейс с гальванической развязкой;
- настройка таблиц и параметров системы в реальном времени;
- бесплатное ПО с открытыми исходными кодами [3].

В результате у нас получилась относительно простая система в компактном исполнении, которая заменит старый трамблер или вышедшую из строя родную систему электронного зажигания автомобиля. Разработанная система подходит также для

мотоциклов или может использоваться там, где требуется управление зажиганием ДВС.

Благодаря возможностям гибкой настройки параметров импульса зажигания могут быть использованы различные внешние драйверы зажигания (коммутаторы) и даже такие, принцип действия которых основан на накоплении энергии не в индуктивности, а в конденсаторе [10; 11].

Выводы

Таким образом, нами разработана система управления зажиганием для двигателей внутреннего сгорания *SECU-3L*, создано к ней встроенное программное обеспечение и ПО для мониторинга, настройки и диагностики, выполняемое на ПК.

Как видно по структурной схеме системы, в ней отсутствует датчик температуры охлаждающей жидкости и датчик температуры воздуха. По этим датчикам тоже можно было бы корректировать УОЗ, но это бы усложнило систему и ее установку. По аналогичным причинам отсутствует и датчик детонации.

В будущем планируется доработать встроенное ПО для поддержки других способов синхронизации, применяемых на различных типах двигателей. Также планируется добавить многоискровой режим, который будет использован при запуске двигателя.

Список литературы

- 1 Dale, J. D. Application of high energy ignition systems to engines / J. D. Dale, M. D. Checkel, P. R. Smy // *Progress in Energy and Combustion Science*. – 1997. – V. 23, № 5-6. – P. 379-398.
- 2 Борщенко, Я. А. Электронные и микропроцессорные системы автомобилей: учеб. пособ. / Я. А. Борщенко, В. И. Васильев // Курган: Изд-во Курганского гос. ун-та. – 2007. – 207 с.
- 3 МПСЗ SECU-3 / Ignition and fuel injection ECU [Электронный ресурс]: Режим доступа: <http://secu-3.org/>. – Название с экрана.
- 4 Шабельников, А. А. Электронный блок управления двигателем внутреннего сгорания *SECU-3* / А. А. Шабельников // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Механіко-технологічні системи та комплекси. – 2015. – № 22. – С. 90-95.
- 5 Хоровиц, П. Искусство схемотехники = The Art of Electronics : в 3-х т. / П. Хоровиц, У. Хилл.; Т. 1 // пер. Б. Н. Бронин. – Москва : Мир, 1993. – 371 с.
- 6 Smith, S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing / Steven W. Smith // 2-nd ed. – San-Diego: California Technical Publishing, 1999 – 650 p.
- 7 Reif, K. Gasoline Engine Management: Systems and Components (Bosch Professional Automotive Information) / Konrad Reif // Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015. – 354 p.
- 8 Banish, G. Engine Management: Advanced Tuning / Greg Banish / North Branch: CarTech. – 2007. – 128 p.

- 9 Гирявець, А. К. Теория управления автомобильным бензиновым двигателем / А. К. Гирявець. // М.: Стройиздат, 1997. – 161 с.
- 10 Wangwiwatthana, C. Gasoline engine multi spark ignition system / C. Wangwiwatthana, N. Kaewraungrit, J. Parnklang // In Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS '07), October 2007. – P. 1499-1502.
- 11 Tzeng, C. B. Microcomputer based smart engine ignition control system for motorcycles / C. B. Tzeng, T. S. Wey, T. Y. Su // In Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA '08), November, – 2008. – P. 215-221.

Bibliography (transliterated)

- 1 Dale, J. D., Checkel, M. D., Smy, P. R. Application of high energy ignition systems to engines. *Progress in Energy and Combustion Science*, 1997, 5-6(23), 379-398.
- 2 Borshhenko, Ja. A., Vasil'ev, V. I. Electronic and microprocessor systems of automobile: educational. Kurgan: Izd-vo Kurganskogo gos. un-ta, 2007, 207 p.
- 3 MPSZ SECU-3 / Ignition and fuel injection ECU [Web]: Available at: <http://secu-3.org/>
- 4 Shabelnikov, A. A. Electronic control unit for internal combustion engine SECU-3. *Visnik Nacional'nogo tehnichnogo universitetu «HPI»*. Cerija: *Mehaniko-tehnologichni sistemi ta kompleksi*, 2015, 22, 90-95.
- 5 Horowitz, P., Hill, W. The Art of Electronics: v 3-h t. per. B. N. Bronin. Moskow: Mir, 1993, 1, 371 p.
- 6 Smith, S. W. The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing 2-nd ed. San-Diego: California Technical Publishing, 1999, 650 p.
- 7 Reif, K. Gasoline Engine Management: Systems and Components (Bosch Professional Automotive Information). Wiesbaden: Springer Vieweg, 2015, 354 p.
- 8 Banish, G. Engine Management: Advanced Tuning. North Branch: CarTech, 2007, 128 p.
- 9 Girjavec, A. K. Theory of control of automobile gasoline engine. Moskow: Strojizdat, 1997, 161 p.
- 10 Wangwiwatthana, C., Kaewraungrit, N., Parnklang, J. Gasoline engine multi spark ignition system. In Proceedings of the International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS '07), 2007, 1499-1502.
- 11 Tzeng, C. B., Wey, T. S., Su, T. Y. Microcomputer based smart engine ignition control system for motorcycles. In Proceedings of the 8th International Conference on Intelligent Systems Design and Applications (ISDA '08), November 2008, 215-221.

Поступила (received) 15.10.2015

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ**УДК 66.081.6****ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ
ПЕРВАПОРАЦІЙНОГО ОЧИЩЕННЯ ВОДИ****I. A. БУРТНА, Л. І. РУЖИНСЬКА, Л. С. РУДЕНКО***

Кафедра біотехніки та біоінженерії, НТУУ «Київський політехнічний інститут», м. Київ, УКРАЇНА
*email: rudenko.lesia@gmail.com

АННОТАЦІЯ Останнім часом все більшого поширення набувають мембрани процеси, які покликані не тільки зберегти навколошне середовище, а й вирішувати технологічні завдання. Одне з таких завдань - вилучення органічних домішок з водних сумішей з подальшою можливістю їх повторного використання у виробничому циклі. В даній статті представлені результати експериментальних досліджень технологічних параметрів первапорацийного очищення води від органічної домішки, аналіз яких дозволяє визначити найбільш ефективний температурний режим ведення процесу.

Ключові слова: первапорация, органічна домішка, регенерація, очищення води, температурний режим, мембрани процеси очищення.

АННОТАЦИЯ В последнее время все большее распространение получают мембранные процессы, которые призваны не только сохранить окружающую среду, но и решать технологические задачи. Одной из таких задач является возможность извлечения органических примесей из водных смесей с последующей возможностью их повторного использования в производственном цикле. В данной статье представлены результаты экспериментальных исследований технологических параметров первапорационной очистки воды от органической примеси, анализ которых позволяет определить наиболее эффективный температурный режим ведения процесса.

Ключевые слова: первапорация, органическая примесь, регенерация, очистка воды, температурный режим, мембранные процессы очистки.

**EXPERIMENTAL RESEARCH OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF
PERVAPORATION WATER PURIFICATION****I. BURTNA, L. RUZHINSKA, L. RUDENKO**

Department of Bioengineering and Biotechnics, National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute», Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Object. Experimental studies of technological parameters of process water purification of organic impurity. Design, methodology, approach. For the study of pervaporation process had been used experimental unit that allows various removal methods vapors of organic substances, hydrodynamic and temperature regimes. The mixture of water with an organic impurity (four carbon chloride) in volume of 2 l and initial concentration of four carbon chloride - 3.13 mg A/l like a model liquid was used . In the experimental unit had been done the series of experiments of the temperature effect to the purification degree of water from the organic impurities. The obtained data had been processed and analyzed.

Conclusions. The pervaporation gives an opportunity efficiently allocate organic components from water mixtures and mixtures of organic substances. It was found that purification process intensifies with increase the temperature of the model liquid applying to separation. The model liquid, which was heated to 60° C concentration of organic impurity in the final stage of purification is two times less than for model liquid with temperature 20° C. Along with it we can see that the concentration of organic impurities in a model liquid is greater than the maximum allowable. In other words, it is necessary to continue residence time of the model liquid for purification or use the hybrid schemes, which combine the pervaporation with sorption by membrane elements.

In the future research is planned to continue pervaporation at different temperatures, and its combination with sorption by membrane elements.

Keywords: pervaporation; water purification; membrane element; organic impurity; model liquid ; technological parameters of process water purification;

Вступ

Щороку ми спостерігаємо прорив науки та техніки в різних галузях, який призводить до зростання кількості населення Землі. Цей процес в

свою чергу потребує збільшення кількості виробничих підприємств, а також відповідних енергетичних і сировинних ресурсів для їх продуктивного функціонування. Таким чином постає

проблема вичерпності та забруднення природних ресурсів.

Одним з таких ресурсів є вода, і вона присутня у всіх сферах людської діяльності. Тому водопідготовка та водопостачання стають важливими елементами як промисловості так і побуту.

На сьогодні одним з питань водопідготовки та водоочистки стало утворення значної кількості води (водних суміш), яка містить різноманітні органічні і неорганічні з'єднання, що суттєво забруднюють наявні водні ресурси. Традиційні технології очищення води, які засновані на коагуляції та відстоюванні, на окисненні чи іонному обміні виявляються малоекективними в умовах більш жорстких вимог до якості води [1, 2]. Виникає необхідність більш ретельної підготовки води для різноманітних потреб людини та очистки стічних вод і утилізації відходів за допомогою екологічно безпечних і малозатратних процесів. До таких технологій, що динамічно розвиваються і активно впроваджуються в практику, в першу чергу слід віднести мембрани технології. Їх перевагою є не тільки отримання очищеної води відповідної якості, а й можливість вилучення цінних компонентів, які в подальшому можуть буди регенеровані і використані у виробництві.

Мембрани методи очищення води засновані на властивості мембран пропускати переважно одні речовини набагато краще, ніж інші. Особливу увагу слід надати первапорациї, оскільки саме в цьому процесі за допомогою непористих мембран видаляють із води домішки органічних речовин (спиртів, ацетону, бензолу, толуолу, хлорпохідних аліфатичних вуглеводнів та ін.). При здійсненні цього процесу суміш, що розділяється і концентрат є рідкими, а перміат, пройшовши через мембрану, виділяється у вигляді пари [3].

Аналіз літературних даних показує, що переважне число досліджень у сфері мембраних технологій розглядають питання створення нових матеріалів для мембран та їх наступну модифікацію [4]. На ряду з вибором матеріалу, актуальним є вивчення впливу різних технологічних параметрів на ефективність розділення і вивчення механізму процесу переносу [5, 6, 7].

Використання первапорациї досліджується у багатьох практичних аспектах, таких як:

- очищення різних стічних вод [8, 9, 10, 11];
- видалення легколетких органічних компонентів з ґрунтової та питної води;
- регенерація органічних компонентів [12];
- поділ продуктів ферментації в біотехнології [4, 13];
- розділення суміші органічних компонентів [4, 14, 15, 16].

Але не дивлячись на сьогоднішній розвиток теоретичних та практичних досліджень, первапорацийний поділ обмежено застосовується в промисловості, хоча первапорация може бути

альтернативою для багатьох промислових процесів, таких як дистиляція, ректифікація, азеотропна і екстрактивна ректифікація, екстракція і адсорбція [13].

Порівняно з цими процесами первапорация має низку переваг перед яких висока ефективність процесу і можливість поділу азеотропних сумішей (при первапорациї ефективність розділення в основному визначається властивостями мембран, що використовуються та умовами проведення процесу, тобто фізико-хімічні властивості компонентів і суміші, що розділяються грають значно меншу роль, ніж в інших процесах поділу); безреагентність (зазвичай при проведенні первапорациї не використовуються додаткові реагенти, винятком є випадки, коли додавання цих реагентів є вимушеним прийомом для збільшення селективності розділення [17]); можливість використання низькопотенційного тепла (у разі первапорациї, на відміну від ректифікації, немає необхідності нагрівати суміш, що розділяється до температури кипіння, що відкриває можливість використання низькопотенційного тепла); енергоощадливість процесу (в первапорациї енергія витрачається на випаровування перміату.); компактність обладнання та експлуатаційні переваги (модульність мембраних установок дозволяє простим додаванням або відключенням мембраних апаратів збільшувати або знижувати продуктивність по суміші, що розділяється; для забезпечення роботи мембраних апаратів необхідно суттєво меншу кількість основного обладнання, ніж, наприклад, у випадку ректифікаційної колони, що спрошує як управління установкою, так і її вихід на технологічний режим) [18, 19].

Виділення органічних компонентів з води/водних сумішів первапорацийним поділом дозволяє не тільки очистити воду та розділити виділені компоненти на окремі фракції, а й забезпечити повторне їх використання у виробничому циклі.

Мета статті

Метою даної статті є встановлення впливу температури проведення процесу первапорацийного очищення води від органічних домішок шляхом експериментальних досліджень.

Основна частина

Для проведення дослідження первапорацийного процесу виділення органічної домішки було використано експериментальну установку, що дозволяє варіювати способи відводу парів органічних речовин, гідродинамічні і температурні режими.

До складу даної установки входять наступні основні апарати (рис.1): кожухотрубний теплообмінник 1, в якому вихідна суміш (модельна

рідина) підігрівається до необхідної температури (гарячий теплоносій – вода), мембраний апарат 2 (в цьому апараті безпосередньо проходить процес розділення суміші) з металевим корпусом і сорочкою для охолоджуючого теплоносія, в якості якого використовується холодна вода із стаціонарної водопровідної мережі, збірник конденсату 3.

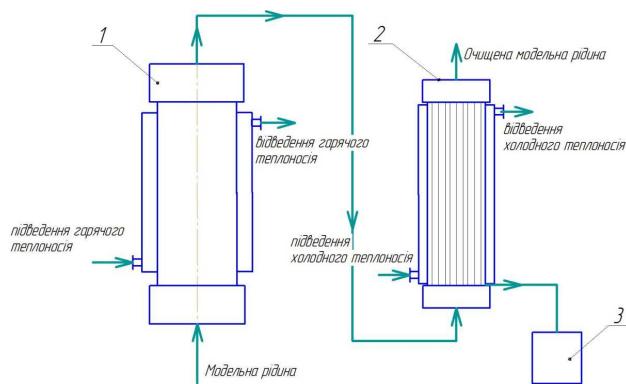


Рис. 1 – Схема експериментальної установки:
1 – коксухотрубний теплообмінник; 2 – мембраний апарат; 3 – збірник конденсату.

Органічні домішки, які були виділені в мембраниому апараті, конденсуються на стінці цього апарату за рахунок охолоджуючого теплоносія сорочці. Сконденсована речовина відводиться через штуцер до збірнику конденсату.

При дослідженні первапорациї при різних температурних режимах у якості вихідної суміші використовується вода з органічною домішкою чотирьох хлористим вуглецем (модельна рідина) об'ємом 2 л. Концентрація чотирьох хлористого вуглецю – 3,13 мг/л.

Таблиця 1. – Визначення концентрації органічних компонентів з часом перебування на очистці за зміни температурного режиму

Найменування органічної речовини, температурний режим	Вих. конц.	2 години	4 години	5 годин	6 годин	ГДК	Результат порівняння з ГДК
Чотирьоххлористий вуглець	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	мг/л	
1. t=20°C	3,13	2,5	2,24	2,08	1,74	0,3	>N
2. t=60°C	3,1	1,6	1,5	1,4	0,8	0,3	>N

На експериментальній установці було здійснено серію дослідів з впливу температури на ступінь очистки від органічних домішок. В

експериментах використовувалася модельна рідина (суміш води з чотирьох хлористим вуглецем) при $t=60^{\circ}\text{C}$, а також при $t=20^{\circ}\text{C}$. Результати дослідів впливу температури суміші на кінцеву концентрацію органічного компоненту після первапорацийного розділення наведено у таблиці 1.

Результати проведених досліджень доводять зменшення органічної домішки у вихідній суміші при використанні для їх виділення методу первапорациї при різних температурних режимах.

Обговорення результатів

В результаті проведеного дослідження ми спостерігаємо, що при підвищенні температури вихідної суміші інтенсифікувалося проходження органічних домішок через полімерну мембрани. На рисунку 2 зображене зменшення концентрації органічної домішки (чотирьоххлористого вуглецю) при застосуванні різних температурних режимів.

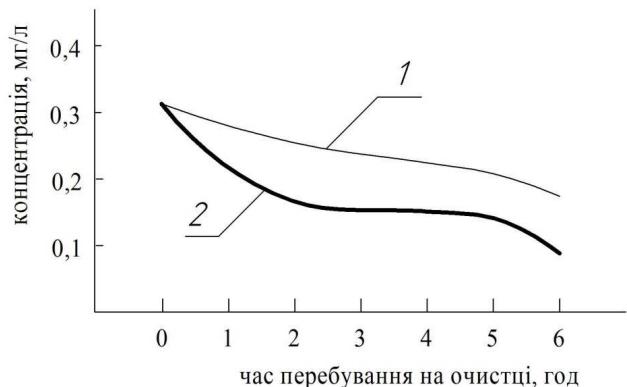


Рис. 2 – Графік залежності концентрації чотирьоххлористого вуглецю в модельній рідині:
1 – при $t = 20^{\circ}\text{C}$; 2 – при $t = 60^{\circ}\text{C}$.

Аналіз отриманих результатів показує зменшення органічної домішки у модельній рідині, що свідчить про значний ступінь очищення забрудненої води при використанні підвищеної температури вихідної суміші, але оскільки значення концентрацій є більшими за гранично допустимі значення то необхідно або продовжити час перебування модельної рідини на очистці, або використати поєднання первапорациї з наступною сорбцією мембраними елементами [20, 21, 22].

Отримані результати дозволяють оцінити вплив температури на продуктивність процесу. При збільшенні температури вихідної суміші з 20°C до 60°C концентрація органічної домішки на кінцевому етапі очистки відповідно становить 1,74 мг/л та 0,88 мг/л. Тобто інтенсифікується проходження органічних домішок через полімерну мембрани.

Висновки

Отже первапорацийний поділ дає можливість ефективно виділяти органічні компоненти з водних сумішей/води (очищення стічних вод, осушка органічних розчинників), а також з суміші органічних речовин. Перспективність первапорації пов'язана, в першу чергу з високою ефективністю процесу первапорації в порівнянні з іншими процесами поділу, з можливістю розділення азеотропних сумішей, малою енергосмінністю, безреагентністю і компактністю обладнання, а по-друге з актуальністю розв'язуваних завдань.

Аналізуючи отримані експериментальні дані, можна зробити висновок, що процес очищення інтенсифікується при збільшенні температури модельної рідини, подаваної на розділення, про що свідчить графік залежності концентрації органічного компоненту від температури (рисунок 2).

Наглядно бачимо, що використання мембраний очистки на даному етапі не забезпечило концентрації органічної домішки менших за гранично допустимі. Це свідчить про те, що необхідно або продовжити час перебування модельної рідини на очистці, або поєднати первапорацію з сорбцією мембраними елементами.

В подальшому планується продовжити дослідження первапарації при різних температурних режимах, а також її поєднання з сорбцією мембраними елементами.

Поєднання первапорації та сорбції мембраними елементами відкриває нові перспективи в очищенні води.

Список літератури

1. Запольський, А. К. Водопостачання, водовідведення та якість води: Підручник / А. К. Запольський. – К.: Вища шк., 2005. – 671 с.
2. Шапочка, М. К. Основи екології і економіки природокористування. Навчально-методичні матеріали Сумського державного Університету / М. К. Шапочка. – [Електронний ресурс] Режим доступу: <http://sumdu.telesweet.net/doc/lections/Osnovy-ekologii-i-ekonomiki-prirodopolzovaniya/8332/index.html>
3. Koros, W. J. Terminology for membranes and membrane processes/ W. J. Koros, Y. H. Ma, T. Shimidzu // *J. Membr. Sci.* – 1996. – №120. – P.149-159.
4. Поляков, А. М. Некоторые аспекты первапорационного разделения жидкых смесей. Часть 1 (обзор) / А. М. Поляков // Серия. Критические технологии. Мембранны. – 2004. – № 4 (24). – С. 29-44.
5. Дытнерский, Ю. И. Исследование гидродинамических факторов при разделении жидкых смесей с помощью полимерных пленок/ Ю. И. Дытнерский, В. Н. Головин, Н. В. Кочергин, Р. Г. Кочаров, Л. И. Ильин // *Тр. МХТИ им. Д. И. Менделеева.* – 1966. – Т. 51 № 1. – С. 39-42.
6. Эльберт, А. А. Влияние условий отвода паров, проникших через пленку, и физических свойств компонентов смеси на коэффициент разделения двойных смесей угле водородов / А. А. Эльберт, Ю. И. Дытнерский, Н. Ф. Кононов // *Журн. прикл. хим.* – 1968. – Т. 41. №10. – С. 2240-2243.
7. Эльберт, А. А. Влияние свойств компонентов жидких однородных смесей на скорость и селективность их разделения с помощью полиэтиленовых пленок/ А. А. Эльберт, Ю. И. Дытнерский, Н. Ф. Кононов // *Журн. прикл. хим.* – 1968. – Т.41 №8 – С. 1790 -1795.
8. Oliveira, T. A. C. Pervaporation-biological oxidation hybrid process for removal of volatile organic compounds from wastewaters/ T. A. C. Oliveira, J. T. Scarpello, A. G. Livingston // *J. Membr. Sci.* – 2002. – V 195. – P. 75-88.
9. Буртная, И. А. Исследование очистки сточных вод от органических веществ с использованием мембранных технологий / Буртная И. А., Литвиненко Д. В. // Материалы за 4-а международна научна практична конференция «Бъдещето проблемите на световната наука», – 2008. – Том 20. Екология. Селско стопанство. Ветеринарна наука. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД – С.19-22.
10. Буртна, I. A. Мембрани технології очищення промислових стоків від органічних компонентів / Буртна I. A., Литвиненко D. B. // Материалы за 5-а международна научна практическая конференция «Бъдещето проблемите на световната наука», – 2009. – Том 23. Екология. География и геология. Селско стопанство. Ветеринарна наука. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД – С.30-32.
11. Буртная, И. А. Исследование выделения органических веществ из сточных вод с использованием первапорационного мембранных аппарата / И. А. Буртна, Л. И. Ружинская, Д. В. Литвиненко // Материалы за 3-а международна научна практическая конференция «Умение и нововведение», – 2007. – Том 13. Лекарство. Ветеринарна наука. Химия и химические технологии. Екология. Селско стопанство. София. «Бял ГРАД-БГ» ООД – С. 56-58.
12. Marion, K. Buckley-Smith. The Use of Solubility Parameters to select membrane materials for Pervaporation of organic mixtures / K. Marion Buckley-Smith. – The University of WAIKATO, Hamilton, NewZealand. – 2006. – P. 18-56.
13. Lipnizki, F. Use of Pervaporation-Bioreactor Hybrid Processes in Biotechnology./ F. Lipnizki, S. Hausmanns, G. Laufenberg, R. Field, B. Kunz // *Chem. Eng. Tech.* – 2000. – V.23 №7. – P.569-577.
14. Garcia Villaluenga, J.P. A review on the separation of benzene/cyclohexane mixtures by pervaporation processes / J.P. Garcia Villaluenga, A. Tabe-Mohammadi // *J. Membr. Sci.* – 2000. – V. 169 №1. – P. 159-164.
15. Flanders, C. L. Separation of C6 isomers by vapor permeation and pervaporation through ZSM-5 membranes / C. L. Flanders, V. A. Tuan, R. D. Noble, J. L. Falconer // *J. Membr. Sci.* – 2000. – V. 176 №1. – P. 43-49.
16. Luo, G. S. Separation of ethyl tert-butyl ether-ethanol by combined pervaporation and distillation / G. S. Luo, M. Niang, P. Schaetzel // *Chem. Eng. J.* – 1997. – V. 68, № 1. – P. 139 - 143.
17. Huang, R. Y. M. Pervaporation Membrane Separation Processes / R. Y. M. Huang // Elsevier, Amsterdam. – 1991. – 479 p.
18. Wytherley, R. W. The separation of meta- and paraxylene by pervaporation in the presence of CBr₄, a selective feed-complexing agent / R. W. Wytherley, F. P. McCandless // *J. Membr.Sci.* – 1992. – V. 67, №1 – P. 67-81.
19. Дытнерский, Ю. И. Основные процессы и аппараты химической технологии: пособие по проектированию/

- под ред. Ю. И. Дытнерского. – Москва: Химия. – 1991. – 496 с.
20. **Буртна, І.** Процеси переносу в полімерних мембранах. Частина 2 / **І. Буртна** // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2013. – Т. 2, N 11(62). – С. 41-44. DOI : 10.15587/1729-4061.2013.11731.
21. **Буртна, І.** Процеси переносу в полімерних мембранах. Частина 4 / **І. Буртна, О. Гачечиладзе** // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 2, N 6(68). – С. 4-11. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.23383.
22. **Буртна, І.** Математична модель процесу сорбції полімерними мембраними елементами рідких органічних речовин / **І. Буртна, Л. Ружинська, М. Мурашко, Л. Руденко** // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2014. – Т. 6, N 6(72). – С. 19-23. DOI : 10.15587/1729-4061.2014.32027.

Bibliography (transliterated)

- 1 **Zapol's'kij, A. K.** Vodopostachannja, vodoovidvedennja ta jakist' vodi: Pidruchnik. – Kyiv: Vishha shk., 2005, 671.
- 2 **Shapochka, M. K.** Osnovi ekologii i ekonomiki prirodokoristuvannja. Navchal'no-metodichni materiali Sums'kogo derzhavnogo Universitetu. [Web] <http://sumdu.telesweet.net/doc/lections/Osnovy-ekologii-i-ekonomiki-prirodopolzovaniya/8332/index.html>
- 3 **Koros, W. J., Ma, Y. H., Shimidzu, T.** Terminology for membranes and membrane processes. *Journal of Membrane Science*, 1996, **120**, 149-159.
- 4 **Poljakov, A. M.** Nekotorye aspekty pervaporacionnogo razdelenija zhidkih smesej. Chast' 1 (obzor). *Seriya. Kriticheskie tehnologii. Membrany*, 2004, **4** (24), 29-44.
- 5 **Dytnerskij, Ju. I., Golovin, V. N., Kochergin, N. V., Kocharov, R. G., Il'in, L. I.** Issledovanie gidrodinamicheskikh faktorov pri razdelenii zhidkih smesej s pomoshh'ju polimernyh plenok. *Tr. MHTI im. D. I. Mendeleva*, 1966, **51**(1), 39-42.
- 6 **Jel'bert, A. A., Dytnerskij, Ju. I., Kononov, N. F.** Zhurn. prikl. him., Vlijanie uslovij otvoda parov, pronikshih cherez plenku, i fizicheskikh svojstv komponentov smesi na kojefficient razdelenija dvojnyh smesej ugle vodorodov. 1968, **41**(10), 2240-2243.
- 7 **Jel'bert, A. A., Dytnerskij, Ju. I., Kononov, N. F.** Vlijanie svojstv komponentov zhidkih odnorodnyh smesej na skorost' i selektivnost' ih razdelenija s pomoshh'ju polijetilenovyh plenok. *Zhurn. prikl. him.*, 1968, **41**(8), 1790 -1795.
- 8 **Oliveira, T. A. C., Scarpello, J. T., Livingston A. G.** Pervaporation-biological oxidation hybrid process for removal of volatile organic compounds from wastewaters. *Journal of Membrane Science*, 2002, **195**, 75-88.
- 9 **Burtnaja, I. A., Litvinenko, D. V.** Materiali za 4-a mezhdunarodna nauchna praktichna konferencija «B#desheto problemite na svetovnata nauka» (Materials 4th International Scientific Conference "Future problems of world science"), Sofia, 2008, 19-22.
- 10 **Burtnaja, I. A., Litvinenko, D. V.** Materiali za 5-a mezhdunarodna nauchna praktichna konferencija «B#desheto problemite na svetovnata nauka» (Materials 5th International Scientific Conference "Future problems of world science"), Sofia, 2009, 30-32.
- 11 **Burtnaja, I. A., Ruzhinskaja, L. I., Litvinenko, D. V.** Materiali za 3-a mezhdunarodna nauchna praktichna konferencija «Umenie i novov#edenija» (Materials 3rd international scientific conference "knowledge and innovation"), Sofia, 2007, 56-58.
- 12 **Marion, K. Buckley-Smith** The Use of Solubility Parameters to select membrane materials for pervaporation of organic mixtures. The University of WAIKATO, Hamilton, NewZealand, 2006, 18-56.
- 13 **Lipnizki, F., Hausmanns, S., Laufenberg, G., Field, R., Kunz, B.** Use of Pervaporation-Bioreactor Hybrid Processes in Biotechnology. *Chemical Engineering & Technology*, 2000, **23**(7), 569-577.
- 14 **Garcia Villaluenga, J. P., Tabe-Mohammadi, A.** A review on the separation of benzene/cyclohexane mixtures by pervaporation processes. *Journal of Membrane Science*, 2000, **169**(1), 159-164.
- 15 **Flanders, C. L., Tuan, V. A., Noble, R. D., Falconer, J. L.** Separation of C6 isomers by vapor permeation and pervaporation through ZSM-5 membranes. *Journal of Membrane Science*, 2000, **176**(1), 43-49.
- 16 **Luo, G. S., Niang, M., Schaetzle, P.** Separation of ethyl tert-butyl ether-ethanol by combined pervaporation and distillation. *Chemical Engineering Journal*, 1997, **68**(1), 139 - 143.
- 17 **Huang, R. Y. M.** Pervaporation Membrane Separation Processes. Elsevier, Amsterdam, 1991, 479 p.
- 18 **Wytcherley, R. W., McCandless, F. P.** The separation of meta- and paraxylene by pervaporation in the presence of CBr4, a selective feed-complexing agent. *J. Membr.Sci.*, 1992, **67**, 67 - 81.
- 19 **Dytnerskij, Ju. I.** Osnovnye processy i apparaty himicheskoy tehnologii: posobie po proektirovaniyu, Moscow: Himija, 1991, 496 p.
- 20 **Burtnaya, Y.** Protsey perenosu v polimernykh membranakh. Chastyna 2. *Skhidno-Yevropeys'kyj zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, 2013, **2**, 11(62), 41-44. DOI: 10.15587/1729-4061.2013.11731
- 21 **Burtnaya, Y., Hachechyladze, O.** Protsey perenosu v polimernykh membranakh. Chastyna 4. *Skhidno-Yevropeys'kyj zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, 2014, **2**, 6(68), 4-11. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.23383.
- 22 **Burtnaya, Y., Ruzhyns'ka, L., Murashko, M., Rudenko, L.** Matematichna model' protsesu sorbsiyi polimernymy membrannymy elementamy ridkykh orhanichnykh rechovyn. *Skhidno-Yevropeys'kyj zhurnal peredovykh tekhnolohiy*, 2014, **6**, 6(72), 19-23. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.32027

Надійшла (received) 15.10.2015

УДК 577.152.3-026.5:664.29:633.31

ТЕРМООПТИМУМ И ТЕРМОСТАБИЛЬНОСТЬ ПЕКТИНМЕТИЛЭСТЕРАЗЫ И ПОЛИГАЛАКТУРОНАЗЫ ФЕРМЕНТНОГО ПРЕПАРАТА ИЗ ЛЮЦЕРНЫ

А. Т. БЕЗУСОВ, Т. И. НИКИТЧИНА*

Кафедра биотехнологии, консервированных продуктов и напитков, Одесская национальная академия пищевых технологий, Одесса, УКРАИНА

* email: alex-n@te.net.ua

АННОТАЦІЯ Дослідженій вплив температури на швидкість ферментативних реакцій при дії пектинмієстераази і полігалактуронази ферментного препарату люцерни. Методом потенціометра визначили вплив температури на стабільність ферменту, швидкість розпаду фермент-субстратного комплексу і спорідненість ферменту до субстрату. Отримані дані свідчать про стабільність ферментів, виділених з люцерни. Цей показник перевищує дані препарату мікробіологічного походження "Пектофетидин П20х", що дозволяє проводити ферментативну реакцію при високих температурах, підвищуючи технологічні властивості рослинного ферменту.

Ключові слова: ферменти, пектинмієстерааза, полігалактуроназа, люцерна, температура, пектин.

АННОТАЦІЯ Исследовано влияние температуры на скорость ферментативных реакций при воздействии пектинмієстераазы и полігалактуроназы ферментного препарата люцерны. Потенциометрическим методом определили влияние температуры на стабильность фермента, скорость распада фермент-субстратного комплекса и спротив фермента к субстрату. Полученные данные свидетельствуют о стабильности ферментов, выделенных из люцерны. Этот показатель превышает данные препарата микробиологического происхождения «Пектофетидин П20х», что позволяет проводить ферментативную реакцию при высоких температурах, повышая технологические свойства растительного фермента.

Ключевые слова: ферменты, пектинмієстерааза, полігалактуроназа, люцерна, температура, пектин.

TEMOPTRIMUM AND THERMOSTABILITY OF PECTIN METHYLESTERASE AND POLYGALACTURONASE OF ENZYMATIC PREPARATIONS FROM ALFALFA

А. BEZUSOV¹, Т. NIKITCHINA^{2*}

Department of Biotechnology, canned foods and beverages, Odesa national academy of food technologies, Odesa, UKRAINE

ABSTRACT Most necessary for industry along with amylolytic and proteolytic enzymes there are enzymes of pectolytic complex. In modern technologies of food productions enzymes preparations with pectolytic activity found application in the technological operations of lighting up of juices (apple, vine, pear), and also at the production of juices with pulp (citrus, plum, tomato), that does them irreplaceable at processing of berries, fruit, vegetables. In basis of their use in technologies ability of deesterification lies and to depolymerize a pectin (pectinase and pectaza accordingly). The use of the enzymes preparations with pectolytic activity, got by a microbiological synthesis, is wide in modern technologies. Source of such preparations are genetically modified mycelia mushrooms. Practically all products of microbial biotechnology can contain undesirable elements are by-products of vital functions of microorganisms, and require an obligatory certification and examination. Research of alternative pectolytic enzymes of grassy culture is alfalfas, allows to get clean preparations ecologically. Experiments showed that influence of temperature on stability of enzyme, speed of disintegration of enzyme-substance complex and affinity of enzyme to substance exceed data of preparation of microbiological origin of "Pectofoetidin P20x", that allows to conduct a enzymes reaction at high temperatures, promoting technological properties of vegetable enzyme. The conducted analysis allowed estimating as far as sharply a necessity costs for the industrial receipt of enzymes preparations of phylogenous.

Keywords: enzymes, pectin methylesterase, polygalacturonase, alfalfa, temperature, pectin.

Введение

Растительное сырьё является богатым источником не только биологически активных веществ, но и ферментов, которые не загрязнены токсичными продуктами метаболизма бактерий и микроорганизмов, и, таким образом, выгодно отличаются от ферментных препаратов микробиологического происхождения, которые

широко используются отечественной промышленностью.

Известно, что разработка нового ассортимента пищевых продуктов с содержанием пектина, особенно низкометоксилированного, имеет большое значение в лечебно-профилактических рационах питания для регуляции обмена холестерина, как антидотов и радиопротекторов. Получение низкометоксилированного пектина возможно с помощью биотехнологических методов, в том числе обработки

пектинових веществ или пектинсодержащего сырья пектинмethylэстеразой.

Растительные пектинмethylэстеразы содержатся в таком традиционном для Украины сырье как томаты, морковь, свекла, яблоки, айва, баклажаны, кабачки, сладкий перец, стручки гороха, арбузные корки, лук, тыква, чеснок, листья табака, фасоль. Перечисленное сырьё является стратегически важным, так как используется для производства пищевых продуктов. Оптимальным решением использования традиционного сырья является использование отходов и некондиционного сырья, или переработка нетрадиционного листового и травяного сырья – люцерны, сирени, маиса, ириса, клевера, подорожника, репы, другое [1–3].

Ферментный препарат с высокой пектинмethylэстеразной активностью, полученный нами из люцерны, можно применять для производства различных пищевых продуктов, в первую очередь, в технологиях соковых производств. Для успешного применения препарата необходимо знать, при каких условиях проявляемая им активность максимальна и какие факторы влияют на ферменты данного препарата. Принципиальное значение для ферментов имеют субстрат и его концентрация, pH среды взаимодействия, а также её температура.

Цель работы

Целью работы стало исследование влияния температуры на скорость ферментативных реакций, стабильность ферментного препарата люцерны и кинетику деэтерификации пектиновых веществ.

Изложение основного материала

Особенностью ферментов является проявление активности только в определённом интервале температур, причём в ряде случаев для действия определённого ферmenta существует только определённый температурный оптимум. Для изучения поставленной цели необходимо выполнить следующее: установить истинное обратимое влияние температуры на скорость реакции (в условиях насыщения субстратом); определить влияние температуры на сродство ферmenta к субстрату; исследовать влияние температуры на стабильность ферmenta, который может необратимо инактивироваться при значениях, отличающихся от оптимального.

Данные сведения имеют большое практическое значение для применения разработанного ферментного препарата люцерны для пищевой промышленности при производстве пектинсодержащих продуктов функциональной направленности.

Известно, что ферменты, как класс биологических молекул, обладают очень низкой стабильностью. Стандартная свободная энергия

нативной конформации ферmenta в обычных условиях, как правило, лишь на 20...60 кДж/моль меньше свободной энергии денатурированной формы. Поэтому даже небольшие отклонения внешних условий от тех, которые характерны для микроокружения ферmentов в клетке, могут оказаться достаточными, чтобы нарушить структуру и функцию ферmentов, то есть инактивировать их [4, 5].

При проведении ферментативной реакции особенно важно влияние температуры: с одной стороны – увеличение начальной скорости, с другой – денатурация ферmenta под действием температуры, обуславливающая непрерывное уменьшение концентрации активного ферmenta. Оптимальная температура зависит от соотношения между влиянием температуры на скорость ферментативной реакции и её влиянием на скорость деструкции ферmenta [6]. Учитывая эти теоретические аспекты, рассматривали термическую стабильность пектинмethylэстеразы и полигалактуроназы ферментного препарата люцерны.

Обсуждение результатов

Для количественной оценки термической стабильности ферментного препарата из люцерны используются различные величины: константа скорости мономолекулярной инактивации ферmenta, либо константы скорости на глубине инактивации 50 или 75 %, полупериод жизни ферmenta, доля остаточной активности ферmenta после его инкубации в течение фиксированного времени при определённой температуре [7, 8, 9]. Стабильность ферmentов оценивали сравнительно со стабильностью пектинмethylэстеразы и полигалактуроназы в препарате «Пектофоетидин П20x» (рис. 1, рис. 2).



Рис. 1 – Зависимость активности пектинмethylэстеразы ферментного препарата люцерны (ФПЛ) и препарата «Пектофоетидин П20x» от времени и температуры: 1 – ФПЛ при $t=80^{\circ}\text{C}$; 2 – препарат «Пектофоетидин П20x» при $t=65^{\circ}\text{C}$; 3 – ФПЛ при $t=65^{\circ}\text{C}$; 4 – препарат «Пектофоетидин П20x» при $t=50^{\circ}\text{C}$; 5 – ФПЛ при $t=50^{\circ}\text{C}$; 6 – препарат «Пектофоетидин П20x» при $t=32^{\circ}\text{C}$; 7 – ФПЛ при $t=32^{\circ}\text{C}$

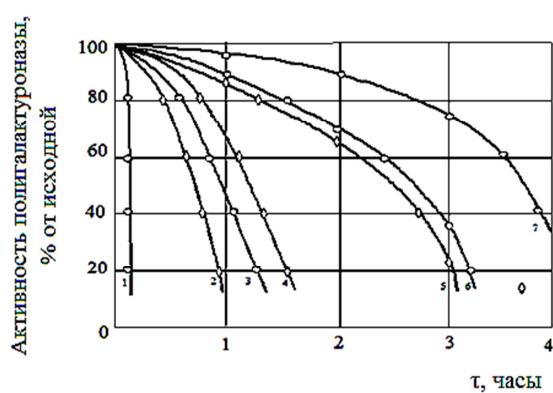


Рис. 2 – Залежність активності полигалактуронази ферментного препарату люцерни (ФПЛ) і препарату «Пектофетидин П20х» від часу та температури: 1 – ФПЛ при $t=80^{\circ}\text{C}$; 2 – препарат «Пектофетидин П20х» при $t=65^{\circ}\text{C}$; 3 – ФПЛ при $t=65^{\circ}\text{C}$; 4 – препарат «Пектофетидин П20х» при $t=50^{\circ}\text{C}$; 5 – препарат «Пектофетидин П20х» при $t=32^{\circ}\text{C}$; 6 – ФПЛ при $t=50^{\circ}\text{C}$; 7 – ФПЛ при $t=32^{\circ}\text{C}$

Паралельно изучали зависимость активностей пектинмилэстеразы и полигалактуроназы ферментного препарата люцерны от температуры (рис. 3).

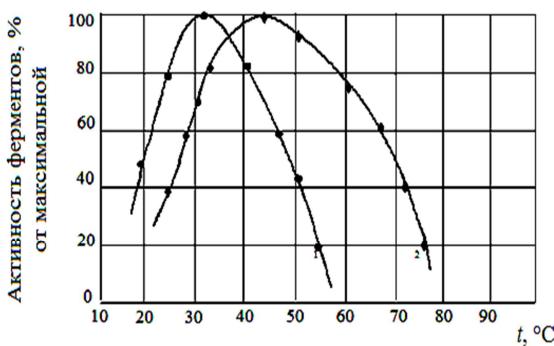


Рис. 3 – Залежність активності пектинмилэстерази (1) і полигалактуронази (2) від температури в ферментному препараті люцерни

Полученные данные свидетельствуют о том, что стабильность обоих ферментов, выделенных из люцерны, превышает этот показатель препарата микробиологического происхождения «Пектофетидин П20х», что позволяет проводить ферментативную реакцию при более высоких температурах, а значит и с большей эффективностью.

По результатам кинетических исследований определяли оптимальные условия проведения процесса, судя о степени сродства субстратов и ингибиторов, чтобы дать характеристику природы ферментативного процесса [10]. Участие в

механизмах ферментативных реакций промежуточных соединений:



где E – пектинмилэстераза или полигалактуроназа люцерны, выполняющий функцию катализатора химической реакции; S – яблочный или цитрусовый пектин; K_M и $K_{\text{кам}}$ – константы Михаэлиса и катализитической диссоциации химической реакции; ES – фермент-субстратный комплекс; P – продукт химической реакции.

Данный механизм приводит к следующей зависимости стационарной скорости реакции от концентрации яблочного или цитрусового пектина (уравнение Михаэлиса):

$$\vartheta = \frac{d[S]}{d\tau} = -d[S] = \frac{V_{\max}[S]}{K_M + [S]}, \quad (2)$$

где ϑ – скорость химической реакции, кмоль/м³·мин; [S] – концентрация субстрата; τ – время химической реакции, мин; V_{\max} – это кинетическая константа, с помощью которой можно характеризовать эффективность работы фермента, физический смысл которой – предел, к которому стремится скорость реакции при бесконечном повышении концентрации субстрата.

Физический смысл K_M заключается в том, что она представляет собой константу равновесия между двумя реакциями, приводящими к распаду фермент-субстратного комплекса и той реакцией, которая ведет к образованию этого комплекса.

С помощью K_M можно характеризовать сродство данного фермента к данному субстрату. Чем меньше K_M , тем больше сродство фермента к данному субстрату, а значит тем выше равновесие первого этапа ферментативной реакции сдвинуто вправо – в сторону образования фермент-субстратного комплекса. Значит, будут созданы наилучшие условия для протекания и второго этапа ферментативного процесса. При таких условиях для достижения эффективного превращения субстрата требуется малая концентрация субстрата. Значит, и V_{\max} теоретически может быть достигнута при малых количествах субстрата. Если K_M высока, то это означает, что сродство фермента к такому субстрату низкое и реакция при небольших концентрациях субстрата протекает неэффективно.

Параметры V_{\max} и K_M в большинстве случаев имеют эффективное значение, поскольку включают константы скоростей элементарных химических актов многостадийного ферментативного процесса.

На основании предварительного изучения зависимостей активности пектинмилэстеразы от концентрации ферментного препарата (линейную зависимость наблюдали до значения активности фермента 15,5 Ед/см³), pH и температуры среды,

изучали скорости деметоксилирования цитрусового и яблочного пектинов; сравнивали их со скоростями реакций деэтерифициации, катализируемых промышленным ферментным препаратом «Пектофоетидин П20х». Показано (рис. 4), что выделенный препарат деэтерифицирует и цитрусовый, и яблочный пектин значительно активнее, чем «Пектофоетидин П20х».

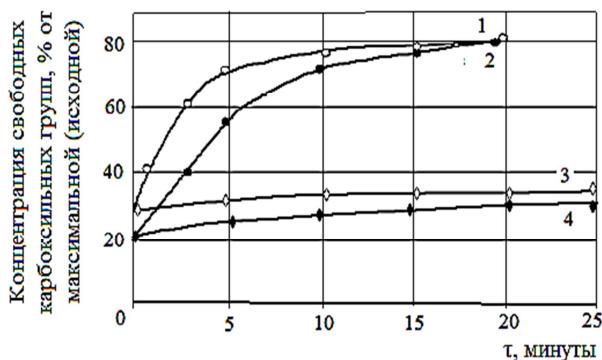


Рис. 4 – Динамика деметоксилирования различных пектинов под действием ферментов: 1 – яблочный пектин и пектинмethylэстераза «Пектофоетидин П20х»; 2 – цитрусовый пектин и пектинмethylэстераза «Пектофоетидин П20х»; 3 – яблочный пектин и пектинмethylэстераза ФПЛ; 4 – цитрусовый пектин и пектинмethylэстераза ФПЛ

При этом максимальная степень деметоксилирования составила 80,0 %. Изучение влияния начальной степени этерификации на скорость ферментативного деметоксилирования (рис. 5) позволяет интерпретировать данные, представленные на рис. 4 как зависящие от природы пектина и от начальной степени этерификации, чем, и обусловлено различие в виде кривых 1 и 2 на рис. 4.

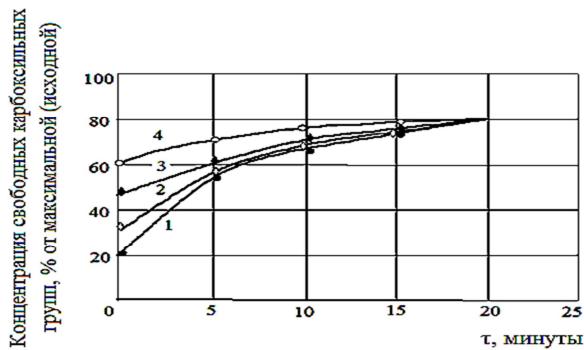


Рис. 5 – Динамика деметоксилирования яблочного пектина под действием пектинмethylэстеразы ферментного препарата люцерны от начальной степени этерификации: 1- начальная степень этерификации пектина 80 %; 2 - начальная степень этерификации пектина 68 %; 3 - начальная степень этерификации пектина 40 %

этерификации пектина 68 %; 3 - начальная степень этерификации пектина 54 %; 4 - начальная степень этерификации пектина 40 %

Изучение данных кинетики деметоксилирования цитрусового и яблочного пектинов ферментным препаратом люцерны (рис. 6), преобразованных в координатах Лайнуивера-Берка, позволило определить для пектинмethylэстеразы ферментного препарата люцерны $K_M = 4,5 \times 10^{-4}$ моль/дм³ и $V_{max} = 2,28 \times 10^{-6}$ моль/с по яблочному пектину; $K_M = 1,74 \times 10^{-4}$ моль/дм³ и $V_{max} = 2,27 \times 10^{-6}$ моль/с по цитрусовому пектину. Эти значения лежат в пределах соответствующих значений для пектинмethylэстеразы микробиологического происхождения.



Рис. 6 – Зависимость скорости реакции деэтерифициации яблочного пектина под действием пектинмethylэстеразы ферментного препарата люцерны от начальной степени этерификации: 1- начальная степень этерификации пектина 80 %; 2 - начальная степень этерификации пектина 68 %; 3 - начальная степень этерификации пектина 40 %.

Как следует из полученных результатов, пектинмethylэстераза ферментного препарата люцерны обладает большим сродством к яблочному пектину, чем к цитрусовому, при практически одинаковых максимальных скоростях распада интермедиата на продукты реакции. Различие констант Михаэлиса для пектинов означает, что для достижения данной скорости реакции деэтерифициации яблочного пектина требуется большая концентрация субстрата. Анализируя полученные данные о меньшем сродстве пектинмethylэстеразы ферментного препарата люцерны к цитрусовому пектину и данные о предельной степени деэтерифициации 80,1 % при всех изученных начальных значениях степени этерификации, можно предположить, что этот предел (80,1 %), дальше которого ферментативная реакция прекращается, обусловлен именно снижением родства деэтерифицированной формы к пектинмethylэстеразе. Эффект может быть обусловлен возрастшим статическим зарядом молекулы пектина и её пространственной конформацией.

ВЫВОДЫ

Определены температурный оптимум и термостабильность пектинмethylэстеразы ферментного препарата люцерны. Установлено, что максимальная активность пектинмethylэстеразы наблюдается при температуре 32 °C, что выше активности пектинмethylэстеразы микробного происхождения в используемых промышленных препаратах. Данный факт можно использовать для повышения температур реакционных смесей и увеличения скорости реакций модификации пектиновых веществ.

Изучена кинетика деметоксилирования цитрусового и яблочного пектинов ферментным препаратом люцерны.

Установлено, что для пектинмethylэстеразы ферментного препарата люцерны $K_M = 4,5 \times 10^{-4}$ моль/дм³ и $V_{max} = 2,28 \times 10^{-6}$ моль/с по яблочному пектину и $K_M = 1,74 \times 10^{-4}$ моль/дм³ и $V_{max} = 2,27 \times 10^{-6}$ моль/с по цитрусовому пектину. Таким образом, пектинмethylэстеразы ферментного препарата люцерны обладает большим сродством к яблочному пектину, чем к цитрусовому, при равных скоростях распада интермедиата на продукты реакции. Получение и использование ферментного препарата люцерны позволяет повысить рентабельность пектиносодержащего сырья и получить целый ряд функциональных продуктов, и таким образом решить проблему импортозамещения в отечественной пищевой промышленности.

Список литературы

1. Atwell, W. A. Starches / W. A. Atwell, D. J. Thomas // *J. St. Paul, MN*: American Association of Cereal Chemists. – 1997. – P. 25-30.
2. Galliard, T. Starch; Properties and Potential / T. Galliard // Society of Chemical Industry. Chichester, UK: John Wiley and Sons. – 1987. – P. 40-68.
3. Whistler, R. L. Starch Chemistry and Technology [Text]: 2nd ed. / R. L. Whistler, J. N. Miller, E. F. Paschall, F. L. Orlando // Academic Press. – 1984. – P. 135-324.
4. Kravtchenko, T. P. Analytical comparison of three industrial pectin preparations / T. P. Kravtchenko, A. O. J. Voragen, W. Pilnik // Carbohydr. Polym. – 1992. – Vol. 18. – 1824 p.
5. Thom, D. G. Interaction associations of alginates and pectins / D. G. Thom, Y. S. M. Dec, E. K. Morris et al // *Progr. Food Nutr. Sci.* – 1982. – Vol. 6. – P. 97-108.
6. Kim, W. J. Effect of chemical composition on compressive mechanical properties of lowester pectin gels / W. J. Kim, V. N. M. Rao and Smit // *Journal Food Science*. – 1998. – vol. 43. – №2. – P. 572-575
7. Bender, M. L. The Bioorganic Chemistry of Enzymatic Catalysis / M. L. Bender // Society of Chemical Industry. Chichester, UK: John Wiley and Sons. – 1984. – P. 143-178.
8. Варфоломеев, С. Д. Кинетические методы в биохимических исследованиях / С. Д. Варфоломеев, С. В. Зайцев. – М.: МГУ. – 1982. – 342 с.
9. Даниляк, Н. И. Ферментные системы / Н. И. Даниляк, В. Д. Семачевский, Л. З. Дудученко, И. А. Трутнева. – Киев: Наукова думка. – 1989. – 279 с.
10. Березин, И. В. Практический курс химической и ферментативной кинетики / И. В. Березин, А. А. Киселёв. – М.: МГУ. – 1976. – 320 с.

Bibliography (transliterated)

1. Atwell, W. A., Thomas, D. J. Starches. *J. St. Paul, MN*: American Association of Cereal Chemists, 1997, 25-30.
2. Galliard, T. Starch; Properties and Potential. *Society of Chemical Industry*. Chichester, UK: John Wiley and Sons, 1987, 40-68.
3. Whistler, R. L., Miller, J. N., Paschall, E. F., Orlando, F. L. Starch Chemistry and Technology. *Academic Press*, 1984, 135-324.
4. Kravtchenko, T. P., Voragen A. O. J., Pilnik W. Analytical comparison of three industrial pectin preparations: *Carbohydr. Polym.*, 1992, **18**, 1824 p.
5. Thom, D. G. Interaction associations of alginates and pectins. *Progr. Food Nutr. Sci.*, 1982, **6**, 97–108.
6. Kim W. J., Rao V. N. M. and Smit. Effect of chemical composition on compressive mechanical properties of lowester pectin gels. *Journal Food Science*, 1998. **2(43)**, 572-575
7. Bender, M. L. The Bioorganic Chemistry of Enzymatic Catalysis : *John Wiley and Sons*, 1984, 143-178.
8. Varfolomeev S. D., Zajcev S. V. Kinetic methods are in biochemical researches. Moskow: MGU, 1982, 342 p.
9. Daniljak N. I., Semachevskij V. D., Duduchenko L. Z., Trutneva I. A. Fermentnye sistemy. Kiev: Naukova dumka, 1989, 279 p.
10. Berezin I. V., Kiseliov A. A. Practical course of chemical and enzymes kinetics. Moskow: MGU, 1976, 320 p.

Надійшла (received) 15.10.2015

КОНТРОЛЬ ГЕРМЕТИЧНОСТІ УПАКОВОК МОЛОЧНИХ ПРОДУКТІВ**I. П. ЗАВАЛЬНЮК**

Кафедра технологій переробки та зберігання с.-г. продукції, Херсонський державний аграрний університет, Херсон,
УКРАЇНА
email: zavalnyukinna@rambler.ru

АННОТАЦІЯ В статті наголошується на важливості та необхідності контролю герметичності упаковок з метою збереження якості молочної продукції. Виконаний детальний огляд найбільш розповсюджених систем неруйнівного контролю герметичності тары молочних продуктів. В роботі акцентується увага на високій ефективності та функціональноті акустичних методів дефектоскопії харчових контейнерів з продуктами. Запропоновано структуру і функціональну схему установки ультразвукового сканування герметичних упаковок молочних продуктів. Розглянутий математичний апарат акустичної голограмії, як одного з методів отримання акустичних зображенень.

Ключові слова: неруйнівний контроль герметичності, дефекти упаковок, візуально-оптичні системи дефектоскопії, ультразвукове сканування, акустична голограмія.

АННОТАЦИЯ В статье отмечается важность и необходимость контроля герметичности упаковок с целью сохранения качества молочной продукции. Выполнен подробный обзор наиболее распространенных систем неразрушающего контроля герметичности тары молочных продуктов. В работе акцентируется внимание на высокой эффективности и функциональности акустических методов дефектоскопии пищевых контейнеров с продуктами. Предложена структура и функциональная схема установки ультразвукового сканирования герметичных упаковок молочных продуктов. Рассмотрен математический аппарат акустической голограммы, как одного из методов получения акустических изображений.

Ключевые слова: неразрушающий контроль герметичности, дефекти упаковок, визуально-оптические системы дефектоскопии, ультразвуковое сканирование, акустическая голограмма.

TESTING OF SEALING OF DAIRY PRODUCTS PACKAGES**I. ZAVALNIUK**

Department of «Processing And Storage of Agricultural Products», Kherson State Agricultural University, Kherson, UKRAINE

ABSTRACT A wide range of packaging materials and containers for dairy products makes high requirements for mechanical strength and sealing of packages. The importance and necessity of testing packaging in order to keep the quality of dairy products is emphasized in the article. Made a detailed overview of the most widespread visually-optical systems of defectoscopy packaging – Ishida IX-GA-B3043, HEUFT pakCheck, BBULL SEAMAGE/CW/X. The aim of the article is to determine the feasibility and evaluate the efficiency of the ultrasonic method for monitoring the sealing of packaging of dairy products in a production environment. The paper focuses on the efficiency and functionality of the ultrasonic defectoscopy methods of food containers with products. Application of BAI-technology (Backscattered Amplitude Integral) constructing acoustic imaging allows to reveal defects the joint hermetically soldered of plastic packages to 38 microns. The structure and functional scheme of installation ultrasound scanning sealed packages of dairy products that can be integrated into the production line flow are proposed. For the processing and storage of testing results, and imaging of the defect with a high resolution is expedient to use the method of acoustic holography is stressed. The mathematical apparatus of acoustic holography - Fourier transform, is considered. Thus, the acoustic ultrasound scan allows you to define, research of sealing and reliability of joints materials reveal heterogeneity, the presence of delimitations and explore volume and structural defects of various materials. Moreover, for testing of sealing and defects bottled milk products should be used to visually-optical method, for inspection and the monitoring of plastic, polyethylene, or multilayer film packaging is effective acoustic ultrasound scan.

Keywords: non-destructive testing of sealing, defects of packaging, visually-optical inspection systems, ultrasound scan, acoustic holography.

Вступ

За останні роки у більшості країн розроблений і освоєний промисловий випуск широкого асортименту пакувальних матеріалів, закупорювальних засобів і споживчої тары для молочних продуктів різної консистенції, функціонального призначення, термінів зберігання і реалізації. Наприклад, молоко розливають в пакети з поліетиленових або багатошарових плівок, сир фасують у вакуумну

упаковку, кисломолочні продукти в пакети з комбінованих матеріалів на основі картону або термоформованої упаковки з полістиролу і поліпропілену, молочні консерви розливають у банки з білої жерсті [1, 2, 3].

Вимоги до упаковки молочної продукції у багатьох аспектах жорсткіші, ніж для інших харчових продуктів, а саме [4]:

1) висока механічна міцність;

2) високий ступінь герметичності (непроникність і стійкість до дії мікроорганізмів, максимальні водо-, газо-, паро- і ароматонепроникність, висока тепlostійкість);

3) жорсткість або еластичність залежно від функціонального призначення упаковки, виду фасувально-пакувального устаткування;

4) стійкість до старіння;

5) низька світлонепроникність, що обумовлює захисні властивості пакувальних матеріалів;

6) інертність по відношенню до продукту і відсутність виділення шкідливих для здоров'я людини речовин.

Герметичність пакувальної тари зазвичай забезпечується кришками з основного матеріалу, підвищена герметичність – фольгою з термоадгезійним покриттям або висічками під термозварювання із даного матеріалу.

В процесі закупорювання молочних продуктів можливе виникнення наступних дефектів: зрушення, змінання або ушкодження фольги ущільнювача, перекіс кришок, попадання в шов упаковки залишків продукту, порушення міцності і цільності зварного шва полімерної і комбінованої упаковки, що порушує герметичність і викликає можливість протікання.

Проведення дефектоскопії герметичних упаковок молочних продуктів має важливе значення в цілях збереження якості та безпечності продуктів впродовж терміну зберігання. Найбільш відомими системами неруйнівного контролю герметичності тари молочних продуктів нині є наступні:

1) система рентгенівського контролю Ishida IX-GA-B3043 [5], яка здатна виявляти найдрібніші частинки металу, скла, пластика і гуми в різній бутильованій молочній продукції. Устаткування оснащене автоматичним контролем позиціонування продукту з певним кроком на стрічці подання. Ця система може бути вбудована у виробничу потокову лінію;

2) оптична система контролю HEUFT pakCheck [6] призначена для контролю контейнерів Тетра-Пак. Вона визначає невеликі витоки розміром в $0,09 \text{ mm}^2$ у верхньому шві закупорювання або в області закупорки; відхилення від висоти рівня наливання в 2 мм визначаються з точністю в 99%; машина визначає незначні відхилення (у 2 мм) позиції закупорки в горизонтальному/вертикальному положенні з точністю 99%; здійснює зчитування коду для контролю дати терміну придатності з точністю 99,9%; відбраковує контейнер з дефектом на виробничих швидкостях до 72000 конт/год;

3) автоматична система контролю BBULL SEAMAGE/CW/X [7], яка завдяки оптичному випромінюванню здійснює перевірку герметичності вакуумних упаковок з продуктами в умовах виробництва. Ця система контролює наявність залишків продукту на шві упаковки; визначає наповненість контейнера до 0,1 г; перевіряє чужорідні тіла в упаковці, а саме, скло ($>2\text{mm}^3$), метал ($>1\text{mm}^3$),

пластик; сканує наявність етикетки і штрих-коду на коректність нанесеної інформації, а також дати виробництва і термінів придатності продукту.

Отже, найпоширеніші перераховані системи мають принцип дії заснований на використанні радіаційного і візуально-оптичного методів дефектоскопії [8], які відрізняються високою чутливістю і можливістю проведення безперервного контролю у виробничих умовах. Проте у разі використання рентгенівського випромінювання обов'язкова наявність додаткових захисних фіранок оглядової камери. Застосування ж візуального контролю має наступні обмеження: за технологічністю – візуальний доступ, зазвичай потрібно спеціальні оптичні засоби; за розшифровкою – необхідне додаткове використання інших методів контролю для розпізнавання, виявлення і вимірювання дефектів.

Мета роботи

Великий інтерес представляє визначення технічної можливості і оцінювання ефективності застосування ультразвукового методу контролю герметичності упаковок молочних продуктів в умовах виробництва.

Викладення основного матеріалу

Ультразвукова дефектоскопія використовує пружні хвилі (подовжні, зсувні, поверхневі, нормальні, вигинисті) широкого УЗ-диапазону [9]. Пружні хвилі випромінюються у безперервному або імпульсному режимі і вводяться у виріб за допомогою п'єзоелектричного або електромагнітоакустичного перетворювача, що збуджується генератором електромагнітних коливань. При поширенні в матеріалі виробу, пружні хвилі затухають в різному ступені, а зустрічаючи дефекти (порушення суцільності або однорідності матеріалу), відбиваються, заломлюються і розсіюються, змінюючи при цьому свою амплітуду, фазу та інші параметри. Приймають їх тим же або окремим перетворювачем і після відповідної обробки сигнал подають на індикатор або записуючий пристрій.

Використання ультразвуку з метою підвищення якості контролю перевірки цілісності герметизації харчових контейнерів з продуктами пропонується авторами [10]. Спосіб полягає в скануванні, уздовж сполучної зони, променем послідовності імпульсів ультразвукової енергії. Після прийому послідовності відбитих імпульсів визначають похідну за часом однієї затримки за часом і амплітуди вказаної прийнятої послідовності імпульсів. Далі формують сигнал, що відображає якість герметичного з'єднання уздовж вказаної сполучної зони за допомогою порівняння, однієї з вказаних похідних за часом із заздалегідь заданим пороговим значенням, відділяють вказаний контейнер, якщо індикативний сигнал

відображає порушення з'єднання уздовж вказаної сполучної зони. Важливо, щоб передавана послідовність імпульсів не накладалася на відбиту і прийняту послідовність імпульсів. Для цього ультразвуковий промінь направляють під кутом $10^\circ \leq \alpha \leq 18^\circ$ відносно нормалі до сполучної зони. Обов'язковий водяний прошарок між сполучною зоною і передавачем/приймачем, для чого контейнер з передавачем/приймачем занурюють у водяну ванну або локально створюють місток з рідини за допомогою нанесення води на сполучну зону і всмоктування рідини із сполучної зони відразу ж після сканування такої зони.

Автори акцентують увагу, що часто контур сполучної зони контейнерів не буває ідентичним для усіх контейнерів даного типу, наприклад, внаслідок виробничих допусків. Тому передбачений варіант відстежування контура сполучної зони, після чого відбувається автоматичне керування рухом передавача/приймача відносно тракторії сполучної зони (рис. 1).

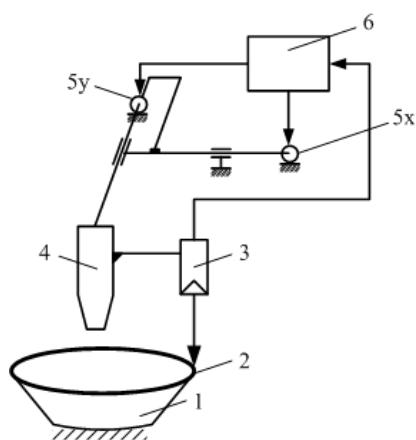


Рис. 1 – Схематичне представлення дії пристрою ультразвукової дефектоскопії з скануванням форми сполучної зони: 1 – харчовий контейнер; 2 – сполучна зона; 3 – слідкувальна голівка; 4 – передавач/приймач; 5x і 5y – приводи, що керують рухом передавача/приймача в напрямках x/y; 6 – блок керування.

Одним з ефективних акустичних методів неруйнівного контролю герметичності пакувань та дефектів різних матеріалів є ультразвукове сканування виробів. Можна виділити два основні режими сканування [11, 12]:

1) режим «сигнал-еко», коли працює лише один перетворювач. На основі інформації про амплітуду, фазу і час прийому відбитої хвилі піксель за пікселем будеться зображення сканованої ділянки;

2) «наскрізний режим», використовує два перетворювача. Один з них знаходиться під досліджуваним зразком і має можливість приймати ультразвукові хвилі, що пройшли крізь зразок. При отриманні зображення в цьому режимі результат має

більшу високу якість сканування за рахунок використання ще одного перетворювача.

Зображення, що отримується на основі цих методів, будеться попіксельно і порядково.

Значний розвиток ультразвукова дефектоскопія гнучких пластикових герметичних упаковок харчових продуктів отримала завдяки співпраці членів науково-дослідних лабораторій Packaging Laboratory і Bioacoustics Research Laboratory в Університеті штату Іллінойс в Urbana-Champaign. Доведено [13, 14], що застосовуючи BAI (Backscattered Amplitude Integral) технологію побудови зображень можливе виявлення дефектів стику герметично паяних пластикових пакетів до 38 мкм (для порівняння межа візуальних методів 50 мкм) з використанням сферично фокусувального трансд'юсера на частоті 17,3 МГц.

Створення акустичного зображення і, зокрема, контрасту між різними областями усередині зразка відбувається завдяки різниці щільності його ділянок. На рис. 2. представлений результат зигзагоподібного сканування пакетованого продукту. Вертикальна чорна область розміром близько 25,5 мм показує канал дефекту, а пунктирна лінія зображує тракторію переміщення випромінювача. Кроки сканування по осіх абсцис і ординат $x_{step} = 0,25$ мм і $y_{step} = 0,5$ мм, відповідно.

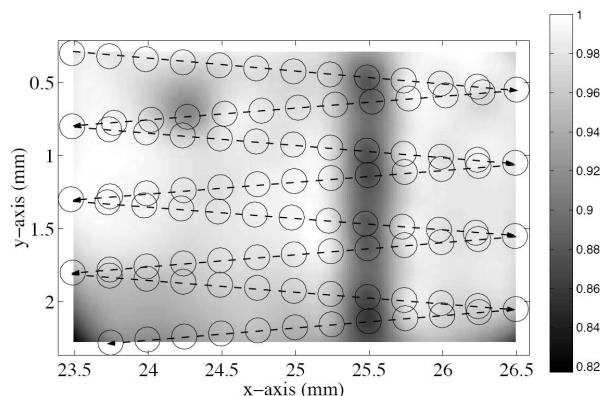


Рис. 2 – Зображення 2D-сканування зразка за BAI-технологією

Таким чином, ультразвукові хвилі дуже чутливі до змін і неоднорідностей середовища при їх проходженні крізь зразок, в першу чергу це стосується щільності та еластичності матеріалу.

На рис. 3 представлена функціональна схема пропонованої установки контролю герметичності упаковок молочних продуктів, яка може бути інтегрована в потокову виробничу лінію.

Після того, як пластикові ємності або поліетиленові багатошарові пакети заповнюються продуктом і закупорюються відповідним способом, вони за допомогою конвеєра поступають у водяну ванну, де відбувається ультразвукове сканування для визначення негерметичності, порушення з'єднань або стиків з отриманням зображення поверхні.

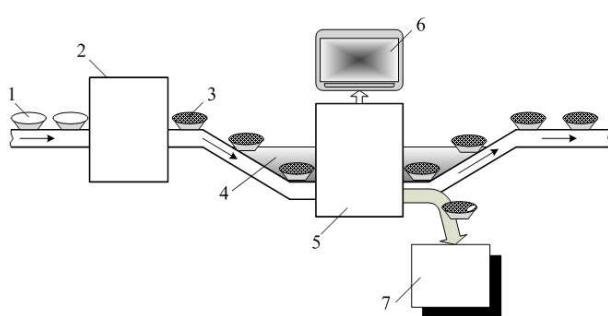


Рис. 3 – Функціональна схема установки ультразвукового контролю герметичності упаковок молочних продуктів: 1 – незаповнена тара; 2 – апарат фасування і закупорювання тари; 3 – заповнені продуктом і закупорені смності; 4 – ванна з водою; 5 – ультразвуковий дефектоскоп; 6 – дисплей; 7 – збір відбракованих виробів.

Смності, у яких виявленій дефект сполучного шва видаляються з потоку з видачею інформації про місце дефекту. Упаковки, що пройшли перевірку по транспортеру, після обсушування, спрямовуються для подальших операцій відповідно до технологічного процесу.

Для отримання акустичного зображення доцільно використовувати когерентний метод – акустичну голограмію, оскільки системи, що реалізують даний метод, дозволяють формувати зображення дефектів з високим розділенням, проводити додаткову обробку первинних даних і отриманого зображення для покращення його якості, здійснювати документування, зберігання результатів контролю та їх відображення в будь-якому зручному для оператора вигляді. Все це можливо завдяки вимірюванню фазової, амплітудної і часової характеристик реєстрованого акустичного поля після його взаємодії з дефектом.

Зазвичай акустичне поле вимірюється приймачами, які забезпечують його лінійну реєстрацію, а саме, реєстрацію амплітуди, що дозволяє використовувати різні методи цифрової обробки даних для побудови зображення.

Одним із методів числового відновлення зображення є метод оберненої хвилі. Нехай у двовимірній площині xz акустичне поле $U(x, z)$, розсіюється дефектом, який розташований на глибині z . Тоді перетворювач, що пересувається вздовж осі x по поверхні вводу, буде реєструвати поле $U(x, 0)$.

Фур’є-образ реєстрованого поля можна записати у вигляді [15]:

$$F[U(x, 0)] = \int U(x, 0) \exp(jk f_x x) dx,$$

а у виді спектру пласких хвиль:

$$B(x, y) = \exp[jk(\alpha x + \gamma)],$$

де F – пряме одновимірне перетворення Фур’є; $k = 2\pi/\lambda$ – хвильове число; $f_x = 1/\lambda \sin \theta_x$; $\alpha = kf_x$ і $\gamma = \sqrt{1 - \alpha^2}$ – напрямні косинуси; θ_x – максимальний кут, під яким видно з поверхні дефекту область переміщення перетворювача. Ця область визначається шириною діаграми спрямованості перетворювача і доступною для сканування зоною на поверхні вводу об’єкта контролю. Після використання рівняння Гельмгольца для спектру на другій лінії, можна отримати:

$$F[U(x, z)] = F[U(x, 0)] \exp\left(jkz\sqrt{1 - \alpha^2}\right), \quad (1)$$

тобто поширення хвилі в напрямку z проявляється у відносних фазових відмінностях складових (1).

Отже, вираз який визначає зображення дефекту можна визначити із (1), як модуль амплітуди розсіяного поля на лінії дефекту z_d :

$$|U(x, z_d)| = \left| F^{-1} \left\{ F[U(x, 0)] \exp\left(jkz_d\sqrt{1 - \alpha^2}\right) \right\} \right| \quad (2)$$

де F^{-1} – зворотне перетворення Фур’є.

Багатократне повторення алгоритму (2) для різних значень координати z дозволить отримати розподіл поля по всьому перетину. Такий алгоритм є широко використовуваним у голографічних системах. Причому, на практиці вимірювання проводять в дискретних точках, тому необхідно у розрахунках використовувати дискретне перетворювання Фур’є, а для зменшення часу обробки – швидке перетворювання Фур’є.

Обговорення результатів

Ультразвукове акустичне сканування є одним з найбільш функціональних методів неруйнівного контролю герметичності. Воно дозволяє вирішувати завдання у багатьох областях, наприклад:

- 1) визначення, дослідження герметичності і надійності стиків матеріалів;
- 2) неруйнівне і швидке дослідження об’ємних і структурних дефектів різних матеріалів;
- 3) виявлення неоднорідностей, різниці щільності, напружень і відшарувань;
- 4) вимірювання товщини шару.

Причому оптимальним методом розпізнавання форми і розмірів дефекту засобами ультразвукового контролю необхідно вважати когерентні методи контролю, а саме комп’ютерну акустичну голограмію. Оскільки в когерентних методах за рахунок додаткової обробки фазової, амплітудної і часової характеристик зареєстрованого акустичного поля можна отримати зображення неоднорідностей з високим розділенням, а відповідно, і визначити наявність порушення герметичності пакування з високою точністю.

Висновки

Проведений аналіз передових технологій контролю герметичних упаковок молочних продуктів показав, що використання візуально-оптичного методу дефектоскопії доцільне у разі випуску бутильованої молочної продукції.

Ефективнішим методом контролю герметичності пластикової, поліетиленової або багатошарової плівкової упаковки є ультразвукове акустичне сканування. Цей метод дозволяє визначити розшарування упаковки, наявність в шві залишків продуктів, порушення суцільності матеріалу, зміну положення фольги ущільнювача. Причому розмір визначуваного дефекту упаковки може складати близько 38 мкм.

Список літератури

- 1 Український портал упаковочної промисловості [Електронний ресурс] – Режим доступу до сайту: <http://www.packaging.kiev.ua/>. – Назва з екрану.
- 2 Компанія «Мир упаковки» [Електронний ресурс] – Режим доступу до сайту: <http://www.miru.ru/>. – Назва з екрану.
- 3 Brody, A. L. Packaging Milk and Milk Products, in Dairy Processing & Quality Assurance / A. L. Brody; ed R. C. Chandan // Wiley-Blackwell, Oxford, UK. – October, 2008.
- 4 Сирохман, І. В. Товарознавство пакувальних товарів і тарі / І. В. Сирохман, В. М. Завгородня. – К.: Центр учбової літератури, 2009. – 616 с.
- 5 IX-GA X-ray System. Technical Information [Електронний ресурс] – Режим доступу до сайту: http://www.ishidaeurope.com/our-products/Ishida_xray_inspection-systems/. – Назва з екрану.
- 6 HEUFT pakCheck. HEUFT SYSTEMTECHNIK GMBH [Електронний ресурс] – Режим доступу до сайту: <http://www.heuft.com/>. – Назва з екрану.
- 7 BBULL SEAMAGE/CW/X. INSPECTION POSSIBILITEIS [Електронний ресурс] – Режим доступу до сайту: <http://www.bbull.com/>. – Назва з екрану.
- 8 Shuangyang, Z. Fast Inspection of Food Packing Seals Using Machine Vision / Z. Shuangyang // Digital Manufacturing and Automation (ICDMA). – 2010. – №1. – P. 724-726.
- 9 Неразрушающий контроль: справочник в 7 т. / [под общ. ред. В. В. Клюева]. – М.: Машиностроение, 2004. – Т.3: Ультразвуковой контроль / И. Н. Ермолов, Ю. В. Ланге. – 2004. – 864 с.
- 10 Пат. 2326378 Российская Федерация, МПК G01N 29/04. Способ и устройство для изготовления и ультразвуковой дефектоскопии соединительной зоны герметизированных контейнеров для пищевых продуктов / Штек Юрген (DE), Леманн Мартин (CH), Риммер Карстен (DE); патентообладатель Леманн Мартин (CH) – № 2005116310/28; заявл. 31.10.2002; опубл. 10.06.2008, Бюл. №16.
- 11 Ozguler, A. Food Package Inspection by Ultrasonic Imaging / A. Ozguler, S. A. Morris, W. D. O'Brien // National Food Processors Association Journal. – 2000. – February, №2. – P. 20-22.
- 12 Adams, T. Non-destructive acoustic micro imaging of package seals / Tom Adams // Sealing Technology. – 2000. – April, Issue 76. – P. 7-9.
- 13 Frazier, C. H. High-contrast ultrasound images of defects in food package seals / C. H. Frazier, Q. Tian, A. Ozguler, S.A. Morris, W.D. O'Brien // Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on. – 2000. – № 47(3). – P. 530-539.
- 14 Xiangtao Yin. The Study of Ultrasonic Pulse-Echo Subwavelength Defect Detection Mechanism / Yin Xiangtao // Ph.D. Thesis. – University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003. – 116 p.
- 15 Ермолов, И. Н. Расчеты в ультразвуковой дефектоскопии / И. Н. Ермолов, А. Х. Вопилкин, В. Г. Бадалян. – М.: ООО НПЦ НК «ЭХО+», 2004. – 108 с.

Bibliography (transliterated)

- 1 Ukrainian portal packaging industry [Web] - Access to the site: <http://www.packaging.kiev.ua/>.
- 2 The company "World of Packaging" [Web] - Access to the site: <http://www.miru.ru/>.
- 3 Brody, A. L. Packaging Milk and Milk Products, in Dairy Processing & Quality Assurance. Wiley-Blackwell, Oxford, UK, October, 2008.
- 4 Sirokhman, I. V., Zavgorodnya, V. M. Commodity packaging products and packaging. Kiev: Tsentr uchbovoi literaturi, 2009, 616 p.
- 5 IX-GA X-ray System. Technical Information [Web] – Access to the site: http://www.ishidaeurope.com/our-products/Ishida_xray_inspection-systems/.
- 6 HEUFT pakCheck. HEUFT SYSTEMTECHNIK GMBH [Web] – Access to the site: <http://www.heuft.com/>.
- 7 BBULL SEAMAGE/CW/X. INSPECTION POSSIBILITEIS [Web] – Access to the site: <http://www.bbull.com/>.
- 8 Shuangyang, Z. Fast Inspection of Food Packing Seals Using Machine Vision. Digital Manufacturing and Automation (ICDMA). – 2010, 1, 724-726.
- 9 Klyuyev, V. V., Yermolov, I. N., Lange, U. V. Non-destructive testing: a reference book in 7 v.; V.3: Ultrasonic testing. Moscow: Mashinostroyeniye, 2004, 864 p.
- 10 ShTEK Jurgen, Lemann Martin, Rimer Karsten Method and device for fabrication and ultrasonic testing of connective zone of food sealed containers. Patent 2326378 Russian Federation, Int. Cl. G01N 29/04; appl. 31.10.2002, publ. 10.06.2008. Bull. № 5.
- 11 Ozguler, A. Food Package Inspection by Ultrasonic Imaging. National Food Processors Association Journal, 2000, February, 2, 20-22.
- 12 Adams, T. Non-destructive acoustic micro imaging of package seals. Sealing Technology, 2000, April, 76, 7-9.
- 13 Frazier, C. H. High-contrast ultrasound images of defects in food package seals. Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, IEEE Transactions on, 2000, 47(3), 530-539.
- 14 Xiangtao Yin. The Study of Ultrasonic Pulse-Echo Subwavelength Defect Detection Mechanism. Ph.D. Thesis. University of Illinois at Urbana-Champaign, 2003, 116.
- 15 Ermolov, I. N. Calculations in the ultrasonic defectoscopy. Moscow: NPC NK «ECHO+», 2004, 108 p.

Надійшла (received) 22.10.2015

УДК 662.735

ДОСЛІДЖЕННЯ ОКИСНЮВАЛЬНОЇ СТАБІЛЬНОСТІ АВІАЦІЙНИХ МІНЕРАЛЬНИХ ГІДРАВЛІЧНИХ ОЛИВ

O. Я. КУЗНЄЦОВА

Кафедра теоретичної та прикладної фізики, Національний авіаційний університет, Київ, УКРАЇНА
email: elena2055@iukr.net

АННОТАЦІЯ. У статті подано результати дослідження структурно-групового складу високомолекулярних продуктів окиснення вуглеводнів та елементного складу золи зразків мінеральної оливи «Гідронікол F-51». Встановлено, що при тривалому використанні оливи перебігають процеси термоокиснюваного ущільнення олефінів, деструкція антиокиснювальної присадки феніл- α -нафтіламін, утворення асоціатів та високомолекулярних моноолефінових вуглеводнів. Встановлено високий вміст алюмінію, магнію, кальцію, заліза, титану, барію у складі золи, що свідчить про інтенсивне зношування агрегатів гіdraulічної системи повітряного судна при тривалому використанні оливи, внаслідок окиснення вуглеводнів оливи.

Ключові слова: окиснення вуглеводнів, елементний склад золи, зношування агрегатів гіdraulічної системи.

АННОТАЦИЯ: В статье представлены результаты исследования структурно-группового состава высокомолекулярных продуктов окисления углеводородов и элементного состава золы образцов минерального масла «Гидроникойл F-51». Установлено, что в процессе длительной эксплуатации масла протекают процессы термоокислительного уплотнения олефинов, деструкция антиокислительной присадки фенил- α -нафтамин, образование ассоциатов и высокомолекулярных моноолефиновых углеводородов. Установлено большое количество алюминия, магния, кальция, железа, титана, бария, содержащееся в золе, что подтверждает интенсивный износ агрегатов гидравлической системы воздушного судна при длительной эксплуатации, в результате окисления углеводородов масла.

Ключевые слова: окисление углеводородов, элементный состав золы, износ агрегатов гидравлической системы.

RESEARCH OXIDATION STABILITY OF AVIATION MINERAL HYDRAULIC OILS

O. KUZNETSOVA

Department of Theoretical and Applied Physics, National Aviation University, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT. Mineral oils are intended for work during great while, and must have the sufficient guaranteed resources of shelf life, under that understand ability of oil to save chemical composition and operating properties within the limits of the rationed values, to provide reliability of work of the hydraulic system. During time of exploitation of oil under the action of change of concentration of oxygen of air, high temperatures, the dissolved water, contact with metals there are oxidation of hydrocarbons and, as a result, reduction of the guaranteed shelf life of oil resource. ICAO is accepted directive of Doc 9735, that envisages strategic activity of every state - member ICAO, on creation of the global system of providing of safety of flights. In a context last it is necessary to create the home quality control system of hydraulic oils of type of "Hydraunycoil FH-51", that would provide information about the level of the guaranteed shelf life of oil resource in the flow of the long- term of his use in the aircraft hydraulic system.

The structural-group composition of high molecular oxidants of hydrocarbons and element composition of ash of samples of mineral oil of "Hydraunycoil FH-51" are in this connection established. It is set that the processes of thermo oxidation compression of olefines, destruction of antioxidants additive of phenyl- α -naphthylamine, formation of associates and high molecular monoolefine hydrocarbons, flow in the process of the protracted exploitation of oil. The plenty of aluminium, magnesium, calcium, iron, titan, barium, contained in an ash, is set, that confirms the intensive wear of aggregates of the hydraulic system of aircraft during the long-term operation, as a result of oxidation of hydrocarbons of oil.

Keywords: oxidation of hydrocarbons, element composition of ash, wear of aggregates of the hydraulic system.

Вступ

Експлуатаційні властивості гіdraulічної оливи забезпечуються певним вуглеводневим складом при її виробництві та визначаються через певні показники якості. Встановлення відповідності значень показників якості гіdraulічної оливи нормам чинних інструкцій, які задають межі її використання, відбувається в процесі контролю якості. Мінеральні оливи, призначенні для роботи впродовж тривалого часу, мають вирізнятися достатнім гарантovаним ресурсом придатності, під яким розуміють здатність

оливи зберігати хімічний склад і експлуатаційні властивості в межах, що забезпечують надійність роботи гіdraulічної системи. За час експлуатації оливи під дією змінної концентрації кисню повітря, високих температур, контакту з металами, розчиненої води спричиняється окиснення вуглеводнів та, як наслідок, зменшення гарантованого ресурсу придатності оливи. Чинна технологія контролю якості, яка не змінювана впродовж більше 30 років, регламентує при тривалому використанні лише періодичний відбір проб оливи з гідросистеми повітряного судна для візуального тестування на

© О. Я. КУЗНЄЦОВА, 2015

наявність води і механічних домішок та, за необхідності, долив оліви в бак до нормованого об'єму [1]. Контроль якості гіdraulічної оліви при тривалому використанні на предмет погіршення експлуатаційних властивостей за рахунок перетворень у її вуглеводневому складі чинною інструкцією не передбачено.

Таким чином, актуальну є задача дослідження окиснювальної стабільності оліви при тривалому використанні з метою визначення показників якості для характеристики рівня гарантованого ресурсу придатності оліви при тривалому використанні. Останнє, в кінцевому підсумку, задаватиме шляхи удосконалення технології контролю якості мінеральних гіdraulічних олів типу «Гідронійл» FH-51.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

ІКАО прийнята директива Doc 9735 «Руководство по непрерывному моніторингу в рамках Універсальної программи проверок організації контроля за обсяженням безпасності полетов» (МНМ УППКБП), яка передбачає стратегічну діяльність кожної держави – члена ІКАО, в тому числі й України, з створення, починяючи з державного рівня та закінчуєчи експлуатантами авіаційної техніки, аеропортами, виробниками авіаційного палива і гіdraulічних олів, та паливозправними компаніями глобальної системи з забезпечення безпеки польотів [2]. Необхідність створення системи з контролю безпеки польотів на міжнародну рівні викликана низкою причин, що виявлені останнім часом, та впливають на якість паливно-мастильних матеріалів та гіdraulічних олів.

У контексті вищесказаного необхідно дослідити стан хімічного складу гіdraulічних олів типу «Гідронійл» FH-51 при тривалому використанні з метою удосконалення вітчизняної системи контролю якості.

Слід зазначити, що існує вкрай мало робіт, присвячених дослідженю питань, пов'язаних саме з властивостями мінеральних олів для гіdraulічних систем повітряних суден.

Автори робіт [3,4] досліджували можливість поліпшення протизносних властивостей робочих рідин гідроприводів транспортних машин. Авторами розроблена математична модель формування оболонок поверхнево-активних речовин на продуктах зносу в умовах інтенсифікації адсорбційних процесів електростатичним полем; розкрито механізм формування граничних змащувальних шарів на поверхнях вузлів тертя гідроприводів транспортних машин при електрообробці робочої рідини, показано, що швидкість зношування в результаті електрообробки робочої рідини знижується і залежить від розмірів продуктів зносу.

У роботах [5-10] проведено дослідження старіння гіdraulічних олів типу РМ під час зберігання та експлуатації в автономних гідроприводах систем управління ракетно-космічною технікою. Встановлено основні процеси старіння, які визначають зміну якості цих олів в умовах експлуатації, визначено оптимальний груповий вуглеводневий склад, який забезпечує їхній високий ресурс роботи.

Автори [11] досліджували методи очистки авіаційної гіdraulічної оліви від води та механічних забруднень, які застосовуються на етапі заправлення оліви в гіdraulічну систему повітряного судна. Дослідники показали, що з причин забруднення авіаційних гіdraulічних рідин емульсійною водою та механічними домішками в 10–12 разів знижується ресурс насосів гіdraulічної системи, а тривалість нормального функціонування плунжерних пар паливорегулювальної апаратури – у три рази, в тому числі, із кожних 100 авіаційних ситуацій в гіdraulічних системах повітряних суден 15 % спричинено забрудненням робочих рідин. Лабораторні випробування розробленого методу показали високу ефективність цього методу тонкого очищення гіdraulічних рідин. Слід зазначити, що наявність в гіdraulічній оліві емульсійної, розчиненої води та механічних домішок при тривалому використанні значно прискорює процеси окиснення вуглеводнів оліви, виступаючи, таким чином, супутніми факторами, які спричиняють старіння оліви.

Таким чином, аналіз публікацій показав, що науковці приділяють увагу, в основному, дослідженю способів та методів покращення протизносних властивостей гіdraulічних олів, розробленню ефективних методів їх очищення від води та механічних домішок, водночас не приділяючи проблемі дослідження окиснювальної стабільності авіаційної мінеральної оліви «Гідронійл FH-51» при тривалому використанні необхідної уваги. Отже, зазначена проблема залишається актуальною.

Об'єкт, ціль та задачі дослідження

Об'єктом дослідження є окиснювальна стабільність оліви «Гідронійл FH-51» при тривалому використанні.

Метою роботи є дослідження високомолекулярних продуктів окиснення оліви «Гідронійл FH-51».

Відповідно до поставленої мети дослідження визначено такі задачі:

- дослідження структурно-групового складу високомолекулярних продуктів окиснення зразків оліви;
- дослідження елементного складу золи зразків оліви.

Матеріали та методи дослідження

Олива «Гідронікайл» FH-51 виробляється фірмою NYCO відповідно до специфікації AIR 3520/B (Франція), узгоджена на відповідність специфікаціями MIL-H-5606F департаменту повітряних сил США, DEF STAN 91-48/1 Управління з гарантії якості Міністерства оборони Великобританії, і відповідає нормам технічних вимог ГОСТ 6794 (Росія) на робочу рідину АМГ-10. Мінеральна олива «Гідронікайл» FH-51 виробляється на основі низькозастигаючої фракції з застосуванням процесу глибокої деароматизації з продуктів гідрокрекінгу парафіністих нафт, і складається з парафінових, нафтенових та ароматичних вуглеводнів, кількісний вміст яких нормований. До оливи додаються загущуюча, антиокислювальна і протизносна присадки для підвищення її експлуатаційних властивостей, призначена для гідравлічних систем авіаційної техніки для роботи в інтервалі температур навколошнього середовища від -60 до +55 С.

Досліджувалися модельні зразки гідравлічної оливи «Гідронікайл FH-51» на етапі поставки M1 (товарна), та відібрани з реальних гідравлічних систем повітряних суден (ПС) через напрацювання відповідно 300 та 380 годин зразки M2 і M3, та зразок M4 відпрацьованої оливи злитої із гідросистеми ПС після 3600 годин напрацювання.

Досліджувалися зразки залишків після дистиляції оливи на фракції. Для розділення модельних зразків залишків на окремі концентрати використано рідинно-хроматографічний метод та методику, яка подана в роботі [12]. Фізико-хімічні характеристики структурно-групового складу концентратів модельних зразків досліджено методом мас-спектрометрії [13].

Визначення елементного складу золи зразків оливи виконано методом атомно-емісійної спектрометрії за методикою [14].

Результати дослідження

В табл. 1 подано результати хроматографічного розділення зразків залишків оливи. Концентрати отримано промиванням хроматографічної колонки розчинниками. Кисневмісні сполуки вимито з хроматографічної колонки етанолом, парафіни – гексаном, ароматичні вуглеводні – бензолом.

Як бачимо, вміст кисневмісних сполук збільшується з часом роботи оливи в гідравлічній системі повітряного судна, парафінових вуглеводнів зменшується, суттєво зростає вміст ароматичних вуглеводнів, та спостерігається зменшення вмісту антиокислювальної присадки феніл- α -нафтіламіну. В табл.2 подано результати визначення молекулярно-масового розподілу моноолефінових вуглеводнів в модельних зразках оливи M1 і M4 відповідно. Бачимо, що з часом роботи оливи зменшився вміст гомологів C₁₂, C₁₄ та практично у 2 рази збільшився

вміст гомологів C₁₆ і C₁₈, а також утворилися високомолекулярні гомологи C₂₀ і C₂₂.

Таблиця 1 – Фізико-хімічні характеристики зразків залишків оливи «Гідронікайл FH-51»

Сполуки	Вміст, % відн.			
	M1	M2	M3	M4
Кисневмісні	35,2	26,7	29,4	2,5
Парафіни	35,9	35,5	28,0	29,4
Ароматичні вуглеводні	7,2	13,6	26,3	3,1
Феніл- α -нафтіламін	72,9	37,4	18,0	9,2
Карбонідні окиснені сполуки (втрати)	1,5	0,2	2,0	34,1

Таблиця 2 – Фізико-хімічні характеристики моноолефінів

Сполуки та їхня молекулярна маса, а.о.м.	Кількість атомів вуглецю в молекулі	Вміст, % відн.	
		M1	M4
Моноолефіни	–	47,8	57,1
168	12	35,4	27,0
182	13	8,7	2,6
196	14	33,4	26,6
210	15	5,2	–
224	16	8,2	16,1
238	17	5,0	7,6
252	18	4,4	9,7
266	19	–	–
280	20	–	6,8
294	21	–	–
308	22	–	3,6

В табл. 3 подано результати визначення елементного складу золи модельних зразків M2 і M3 відповідно.

Бачимо, що спостерігається, насамперед, збільшення в 5 разів вміст золи у зразку оливи M3 порівняно з зразком M2, а також елементного складу алюмінію, магнію, кальцію, заліза, титану, барію.

Обговорення результатів

Високий вміст кисневмісних сполук як у зразку M1, так і в зразках M2 і M3 обумовлений як початковим вмістом кисневмісних сполук [15], в цих зразках (див. табл. 1), так і вмістом моноолефінів (див. табл. 2). З табл. 1 бачимо, що у зразку залишку M4 оливи вміст кисневмісних сполук зменшився порівняно із зразком M1 у 14 разів, що спричинено процесом термоокиснювального ущільнення олефінів, а також ущільненням нафено-ароматичних вуглеводнів других фракцій [16]. Результатом цих процесів є утворення 34,1 % осаду у зразку оливи

M4, який при хроматографічному розділенні зразку M4 не вимився з колонки.

Таблиця 3 – Фізико-хімічні характеристики золи зразків оліви «Гідронікол FH-51»

Вміст золи та її елементний склад	Вміст, % мас.	
	M2	M3
Вміст золи	0,061	0,305
Кремній	>5	>5
<u>Алюміній</u>	2	>5
<u>Магній</u>	0,3	>5
<u>Кальцій</u>	0,2	>5
<u>Залізо</u>	0,1	1
Марганець	0,008	0,008
Нікель	0,02	0,02
<u>Титан</u>	0,04	0,15
Мідь	0,05	0,05
Свинець	0,010	0,015
<u>Цинк</u>	0,3	0,3
Кадмій	0,01	0,3
Олово	0,001	0,003
Фосфор	>1	>1
Літій	0,002	0,005
<u>Барій</u>	0,2	>1

При цьому, внаслідок деструкції парафінів, їх відносний вміст зменшився у зразках M2, M3, M4 в порівнянні із зразком M1 (див. табл. 1). В наслідок дегідрування наftenових структур збільшується вміст високомолекулярних ароматичних вуглеводнів у зразках M2 і M3 відповідно у 2 рази та майже 4 рази в порівнянні із зразком M1.

Зменшення відносного вмісту у зразках M2 і M3 оліви (див. табл. 1) антиокиснюальної присадки феніл- α -нафтіламіну у порівнянні із зразком M1, спричинено її деструкцією з розривом C-N-зв'язків та утворенням асоціатів з ароматичними, ненасиченими і кисневмісними, ароматичними і наftenо-ароматичними сполуками.

Поданий у табл.2 молекулярно-масовий розподіл моноолефінових вуглеводнів у зразку M1 показує, що вказані сполуки є олігомерами етилену (парні значення мас основних гомологів C₁₂, C₁₄, C₁₆ і т.д.). Встановлено, що в процесі тривалого застосування оліви в гідралічній системі ПС (зразок M4) змінився склад моноолефінів, а саме, зменшився вміст перших гомологів C₁₂ і C₁₄ та збільшився вміст гомологів C₁₆ і C₁₈, та утворилися високомолекулярні гомологи C₂₀ і C₂₂, тобто моноолефінові вуглеводні деструктурують і ущільнюються. У свою чергу, знайдено збільшення загального вмісту моноолефінових вуглеводнів у зразку M4 на 9,3% у порівнянні із зразком M1.

Результати, подані в табл. 3 показують, що вміст золи, тобто нерозчинних в оліві твердих частинок, які накопичилися в зразках залишків оліви,

збільшився у 5 разів з часом напрацювання у зразку M3 порівняно з зразком M2. Встановлений високий вміст металів (алюмінію, магнію, кальцію, заліза, титану, барію) у складі золи зразку M3 у порівнянні з зразком M2 (див. табл. 3) свідчить про інтенсивне зношування деталей гідросистеми повітряного судна при тривалому використанні оліви.

Висновки

В результаті проведених досліджень:

- встановлено, що при тривалому використанні оліви «Гідронікол FH-51» перебігають процеси термоокиснювального ущільнення олефінів, нафено-ароматичних вуглеводнів інших фракцій, деструкція антиокиснюальної присадки феніл- α -нафтіламін, утворення асоціатів та високомолекулярних моноолефінових вуглеводнів;
- встановлено, що при тривалому використанні, внаслідок окиснення вуглеводнів, зростає агресивність оліви «Гідронікол FH-51» до металів, що спричиняє підвищення зношування агрегатів гідралічної системи повітряного судна.

Список літератури

- 1 **Doc 9735.** «Руководство по непрерывному мониторингу в рамках Универсальной программы проверок организации контроля за обеспечением безопасности полетов», ИКАО, 2011. – [Электронный ресурс] – Режим доступа до сайта: <http://www.icao.int>.
- 2 **Інструкція** з забезпечення заправлення повітряних суден паливно-мастильними матеріалами і технічними рідинами в підприємствах цивільного авіаційного транспорту України. Наказ Державаслужби № 416. – [Електронний ресурс] – Режим доступу до сайту: www.uazakon.com/documents/date_bh/pggsnwsb/pg7.htm.
- 3 **Лисіков, Є. М.** Роль продуктів зносу трибосполучень гідроприводів в умовах обробки робочої рідини електростатичним полем./ **Є. М. Лисіков, О. С. Шуліка** // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. Техніка та технологія виконання будівельних, колійних та перевантажувальних робіт на транспорті. – Харків, 2004. – Вип. 58. – С. 54-58.
- 4 **Лисіков, Є. М.** Формування локальних електрических полів на продуктах зносу поверхонь тертя гідроприводів колійних та будівельних машин/ **Є. М. Лисіков, С. В. Воронін, О. С. Шуліка, Є. А. Бобров** // Зб. наук. праць УкрДАЗТ. Удосконалення управління експлуатацією роботою залізниць. – Харків. – 2005. – Вип.66. – С.112-117.
- 5 **Шабалина, Т. Н.** Влияние состава маловязких гидравлических масел на трибологические свойства / **Т. Н. Шабалина, С. Э. Каминский, В. А. Тыщенко** // Наука и технологии в промышленности. – 2004. – № 2. – С.66-71.
- 6 **Шейкина, Н. А.** Влияние углеводородного и структурно-группового состава основ гидравлических масел РМ и МГ-7-Б на их эксплуатационные свойства / **Н. А. Шейкина, В. А. Тыщенко, Т. Н. Шабалина, О. Е. Шабалина** //Известия ВУЗов. Серия «Химия и

- химическая технология». – 2005. – Т.48. – Вып.10. – С. 43-47.
- 7 Шейкина, Н. А. Механизм ингибирующего действия дифениламина в процессе окисления гидравлических масел/ Н. А. Шейкина, Л. В. Петров, Б. Л. Психа, В. В. Харитонов, В. А. Тыщенко, Т. Н. Шабалина // Нефтехимия. – 2006. – Т. 46. – №1. – С. 37-43.
- 8 Тыщенко, В. А. Количественная характеристика окисляемости гидравлических масел / В. А. Тыщенко, Б. Л. Психа, В. В. Харитонов, Т. Н. Шабалина, Н. А. Шейкина //Нефтехимия. – 2003. – Т. 43. – №5. – С. 366-372.
- 9 Тыщенко, В. А. Оценка старения гидравлических масел/ В. А. Тыщенко, Т. Н. Шабалина, Е. В. Лобзин, Л. А. Полякова, Л. Д Калинина // Химия и технология топлив и масел. – 1993. – №7. – С.35-36.
- 10 Шейкина, Н. А. Кинетическая модель механизма окисления гидравлических масел при 120-140С / Н. А. Шейкина, Л. В. Петров, Б. Л. Психа, В. В. Харитонов, В. А. Тыщенко, Т. Н. Шабалина // Нефтехимия. – 2004. – Т. 44. – №4. – С. 284-288.
- 11 Гаража, В. В. Очистка авиационных гидравлических и моторных масел от эмульсионной воды и механических примесей в квазистационарном электрическом поле/ В. В. Гаража, С. А. Халиль // Вестник КМУГА. – К. – КМУГА. – 1998. – №1. – С. 82-87.
- 12 Закупра, В. А. Ускоренная жидкостная хроматография масел в производстве сульфонатных присадок / Закупра В. А., Крыгина П. М., Рыбалкин В. Н., Танасов И. И. // Химия и технология топлив и масел. – 1988. – № 9. – С. 35-38.
- 13 Полякова, А. А. Молекулярный масс-спектральный анализ нефтей / А. А. Полякова. – М.: Недра, 1973. – 184 с.
- 14 Кюрган, С. К. Эмиссионный спектральный анализ нефтепродуктов/ С. К. Кюрган. – М.: Химия, 1969. – 296 с.
- 15 Вихрестюк, М. І. Склад, структура і роль кисневмісних сполук в мастильних матеріалах різного призначення/ М. І. Вихрестюк, Ю. Л. Іщук // Катализ і нефтехимія. – 2003. – № 11. – С. 55-61.
- 16 Кузнецова, О. Я. Дослідження старіння мінеральних гідравліческих олій. II. Гомологічно-груповий склад фракцій / О. Я. Кузнецова // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2015. – №3/4(23). – С. 64-68.
- 3 Lysikov, Ye. M., Shulika, O. S. Rol' produktiv znosu trybopoluchen' hidropryvodiv v umovakh obroboky robochoyi ridyny elektrostatychnym polem, Zb. nauk. prats' UkrDAZT. Tekhnika ta tekhnolohiya vykonannya budivel'nykh, kolivnykh ta perevantazhuval'nykh robit na transporti, Kharkiv, 2004, **58**, 54-58.
- 4 Lysikov, Ye. M., Voronin, S. V., Shulika, O. S., Bobrov, Ye. A. Formuvannya lokal'nykh elektrychnykh poliv na produktakh znosu poverkhon' tertya hidropryvodiv kolivnykh ta budivel'nykh mashyn, Zb. nauk. prats' UkrDAZT. Udoskonalenna upravlinnya ekspluatatsiynoyu robotoyu zaliznyts', Kharkiv, 2005, **66**, 112-117.
- 5 Shabalina, T. N., Kaminskij, S. Je., Tyshchenko, V. A. Vlijanie sostava malovjazkih gidravlicheskih masel na tribologicheskie svojstva, Nauka i tehnologii v promyshlennosti, 2004, **2**, 66-71.
- 6 Shejkina, N. A., Tyshchenko, V. A., Shabalina, T. N., Shabalina, O. E. Vlijanie uglevodorodnogo i strukturno-gruppovogo sostava osnov gidravlicheskih masel RM i MG-7-B na ih jekspluatacionnye svojstva, Izvestija VUZov. Serija «Himija i himicheskaja tehnologija», 2005, **10**(48), 43-47.
- 7 Shejkina, N. A., Petrov, L. V., Psiha, B. L., Haritonov, V. V., Tyshchenko, V. A., Shabalina, T. N. Mehanizm ingibirujushhego dejstvia difenilamina v processe okislenija gidravlicheskih masel, Neftehimija, 2006., **1**(46), 37-43.
- 8 Tyshchenko, V. A., Psiha, B. L., Haritonov, V. V., Shabalina, T. N., Shejkina, N. A. Kolichestvennaja harakteristika okisljaemosti gidravlicheskih masel, Neftehimija, 2003, T. 43, **5**, 366-372.
- 9 Tyshchenko V.A., Shabalina T.N., Lobzin E.V., Poljakova L.A., L.D Kalimina Ocenna starenija gidravlicheskih masel, Himija i tehnologija topliv i masel, 1993, **7**, 35-36.
- 10 Shejkina N.A., Petrov L.V., Psiha B.L., Haritonov V.V., Tyshchenko, V. A., Shabalina, T.N. Kineticeskaja model' mehanizma okislenija gidravlicheskih masel pri 120-140S, Neftehimija, 2004, T. 44, **4**, 284-288.
- 11 Garazha, V. V., Halil', S. A. Ochistka aviacionnyh gidravlicheskih i motornyh masel ot jemul'sionnoj vody i mehanicheskikh primesej v kvazipostojannom jelektricheskem pole. Vestnik KMUGA, Kyiv: KMUGA, 1998, **1**, 82-87.
- 12 Zakupra, V. A., Krygina, P. M., Rybalkin, V. N., Tanasov, I. I. Uskorennaia zhidkostnaja hromatografija masel v proizvodstve sul'fonatnyh prisadok, Himija i tehnologija topliv i masel, 1988, **9**, 35-38.
- 13 Poljakova, A. A. Molekuljarnyj mass-spektral'nyj analiz neftej, Moskow: Nedra, 1973, 184 p.
- 14 Kjuregan, S. K. Jemissionnyj spektral'nyj analiz nefteproduktov, Moskow: Himija, 1969, 296 p.
- 15 Vihrestjuk, M. I., Ishhuk, Ju. L. Sklad, struktura i rol' kisnevmissnih spoluk v mastil'nih materialah riznogo priznachennja, Kataliz i neftehimija, 2003, **11**, 55-61.
- 16 Kuznyetsova, O.Ya. Doslidzhennya starinnya mineral'nykh hidravlichnykh olyv. II. Homolohichno-hrupovyy sklad fraktsiy, Tekhnolohichnyy audyt ta rezervy vyrobnytstva. 2015, **3**/4(23), 64-68.

Bibliography (transliterated)

- 1 Doc 9735. «Rukovodstvo po nepreryvnому monitoringu v ramkah Universal'noj programmy proverok organizacii kontrolja za obespecheniem bezopasnosti poletov», ICAO, 2011. [Web] <http://www.icao.int>.
- 2 Instruktsiya zabezpechennya zapravlennya povityranykh suden palyvno-mastyl'numy materialamy i tekhnichnymy ridynamy v pidpryyemstvakh tsyvil'noho aviatychnoho transportu Ukrayiny. Nakaz Derzhaviasluzhby # 416. [Web] www.uazakon.com/documents/date_bh/pggsnwsb/pg7.htm.

Надійшла (received) 06.10.2015

УДК 006.83:637

РОЗРОБЛЕННЯ ФІЗИЧНИХ МЕТОДІК ДЛЯ ОЦІНКИ ЯКОСТІ ТВАРИННОЇ СИРОВИНІ

Д. М. ОДАРЧЕНКО*, М. С. ОДАРЧЕНКО, Т. В. КАРБІВНИЧА, Є. Л. ГАСАЙ

Кафедра товарознавства, управління якістю та екологічної безпеки, Харківський державний університет харчування та торгівлі, Харків, УКРАЇНА

*email: laboratory119@mail.ru

АННОТАЦІЯ Розглядаються питання розробки методик вимірювання фізичних властивостей рідкої фази, що виділяється з м'яса під час заморожування-розвільнення. З цією метою науково обґрунтовано спосіб отримання проб із продовольчої сировини тваринного походження та надано їм характеристику за стандартними методами. Виходячи з агрегатного стану проб та їх властивостей, запропоновано використовувати оптичну, електрофізичну та кріоскопічну методики для ідентифікації бройлерів відповідно до умов вирощування, а також для виявлення якісної фальсифікації продукції риболовства та птахівництва у разі повторного заморожування

Ключові слова: бройлери, карась сріблястий, товарознавча оцінка, пробопідготовка, рідка фаза, фізичні методики

АННОТАЦИЯ Рассматриваются вопросы разработки методик измерения физических свойств жидкой фазы, выделяющейся из мяса при замораживания-размораживания. С этой целью научно обоснованно способ получения проб из продовольственного сырья животного происхождения и предоставлены им характеристику по стандартными методами. Исходя из агрегатного состояния проб и их свойств, предложено использовать оптическую, электрофизическую и криоскопические методики для идентификации бройлеров в соответствии с условиями выращивания, а также для выявления качественной фальсификации продукции рыболовства и птицеводства в случае повторного замораживания

Ключевые слова: бройлеры, серебряный карась, товароведная оценка, пробоподготовка, жидкая фаза, физические методики

DEVELOPMENT OF PHYSICAL METHODS FOR MERCHANTISING EXPERTISE OF FOOD RAW MATERIALS OF ANIMAL ORIGIN

D. ODARCHENK^{*}, M. ODARCHENK^O, T. KARBIVNYCHA, YE. GASAY

Department of commodity science, quality management and ecological safety, Kharkiv State University of Food Technology and Trade, Kharkiv, UKRAINE

ABSTRACT The article is devoted to the improvement of the assessment tovarovednyh raw food of animal origin through the development of methods of measuring the physical properties of the liquid phase, which is released from meat during freezing-thawing.

Using standard methods of evaluation conducted tovarovednaja research facilities, which resulted in not found specific differences in anatomical and morphological, structural and mechanical properties of broilers sampled from households and from the market, as well as silver carp catch different seasons. The values of the chemical composition of the main indicators of broilers lying in the range given in the literature, therefore, to identify them in accordance with the growth conditions of these data are not enough.

Developed and scientifically substantiated method of obtaining samples of raw food of animal origin, which provides for the allocation of the ground meat of the liquid phase by 3 cycles of freezing and centrifugation.

An optical technique that is based on the ability of colloids liquid phase extracted from the meat, and polarized light to dissipate. It was determined that the liquid phase of broilers, grown under poultry factories have large values of the angle of light scattering that may be due to their high content of protein. It is shown that the cyclical nature of the freezing of poultry and fishing reduces the values of the angle light scattering. Polarimetric technique found that solutions of liquid phase separated from the meat to be refreezing, have lower light path, especially for fish raw material, which can be used for the qualitative detection of tampering.

Designed electrophysical method based on measuring the current at different voltages in the liquid phases of broiler meat. It is proposed to use for the freezing point depression tovarovednyh assessment methodology which is based on the ability of substances to reduce the temperature of the liquid phase solvent crystallization. Set value of the average molar mass of the solutes in the liquid phase of the raw materials of animal origin.

Keywords: broilers, silver carp, merchandising expertise, sample preparation, liquid phase, physical methods

Вступ

М'ясо та м'яспродукти в харчуванні людей мають важливе значення, адже вони служать джерелом повноцінного білка, жиру, мінеральних та екстрактивних речовин, деяких вітамінів, споживання

яких є необхідним для нормального функціонування організму. Особливе місце в сегменті м'яспродуктів посідає м'ясо продуктів птахівництва та риболовства, яке у зв'язку з високим вмістом повноцінного білку (більше 20%) по праву належить до дієтичних продуктів харчування [1].

© Д. М. ОДАРЧЕНКО*, М. С. ОДАРЧЕНКО, Т. В. КАРБІВНИЧА, Є. Л. ГАСАЙ, 2015

Традиційно під час оцінки якості м'яса основну роль відіграють такі показники: вміст компонентів, що використовуються організмом для біологічного синтезу та покриття енергетичних витрат; органолептичні характеристики (зовнішній вигляд, запах, колір, консистенція); відсутність токсичних речовин і патогенних мікроорганізмів. Методи ж, які дозволяють тісю чи іншою мірою вирішити питання ідентифікації та виявлення фальсифікації продукції, складні, потребують дорогого обладнання, реактивів та висококваліфікованих спеціалістів. До того ж, їх важко адаптувати до таких складних багатокомпонентних систем, як м'ясопродукти, тому вони не дозволяють установити ідентифікаційні ознаки, а також виявити фальсифікацію (порушення умов зберігання).

У зв'язку з вищезазначенним створення спеціальних адаптованих методик ідентифікації та виявлення фальсифікації продовольчої сировини тваринного походження є актуальним завданням, розв'язання якого зможе попередити потрапляння у товарообіг небезпечної продукції, і тим самим, зберегти здоров'я нації.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

Теоретичним підґрунтам даного дослідження стали праці вітчизняних учених І.В. Сирохмана, Н.В. Притульської, Г.О. Бірти щодо розвитку методології товарознавства та експертизи продуктів тваринного походження, а також праці А.А. Дубініної, В.А. Павлової, М.А. Ніколаєвої, І.П. Чепурного, в яких систематизовано та узагальнено дані щодо понять ідентифікації та фальсифікації харчових продуктів [2-5].

Ціль та задачі дослідження

Метою дослідження є удосконалення товарознавчої оцінки продовольчої сировини тваринного походження шляхом розробки методик вимірювання фізичних властивостей рідкої фази, що виділяється з м'яса під час заморожування-роздморожування.

Для досягнення поставленої мети необхідно було розв'язати такі задачі:

- науково обґрунтувати спосіб підготовки об'єктів дослідження до товарознавчої оцінки з визначенням його раціональних параметрів;
- провести товарознавчу оцінку об'єктів дослідження та за допомогою стандартних методів дослідити споживні властивості бройлерів та карасів сріблястих відповідно до вимог нормативно-технічної документації;
- надати характеристику рідким фазам, одержаним із м'яса бройлерів та карасів сріблястих, за органолептичними, фізико-хімічними та мікробіологічними показниками;

- науково обґрунтувати використання оптичної, електрофізичної, кріоскопічної методик в товарознавчій оцінці продуктів птахівництва, риболовства та проаналізувати вплив споживних властивостей вихідної сировини на зазначені характеристики рідких фаз.

Наукове обґрунтування способу пробопідготовки тваринної сировини до аналізу

До вирішення поставлених задач підходили з позицій того, що продовольча сировина тваринного походження, а саме – м'ясо є полідисперсною системою, якої можна виділити дві фази. При цьому, залежно від параметрів зовнішнього середовища можливий перехід компонентів із однієї фази в іншу без протікання хімічних реакцій [6].

Розроблено робочу гіпотезу, яка засновуючись на положеннях термодинаміки та колоїдної хімії, передбачає, що речовини, які свідчать про зворотність властивостей сировини, а також відіграють роль в її ідентифікації, можуть знайти відбиття у фізико-хімічних властивостях саме рідкої фази.

За робочою гіпотезою був запропонований спосіб підготовки об'єктів дослідження до товарознавчої оцінки, який передбачає вилучення з подрібненого м'яса рідкої фази шляхом послідовно виконуваних операцій заморожування-центрифугування. Використання в методіци циклічності даних операцій розв'язує 2 завдання: підвищує вихід рідкої фази та дозволяє досягти зворотності фазової рівноваги, за рахунок відсутності явища седиментації [7].

Визначено чинники, що впливають на якість розділення м'яса на фази, серед яких: швидкість і тривалість центрифугування, кількість циклів, а також особливості хімічного складу та структури вихідної сировини. Встановлено, що використання більших швидкостей центрифугування (5000 хв^{-1}) дозволяє на 3-му циклі отримати максимальний вихід рідкої фази (з білого м'яса бройлерів – 14%, з червоного – 12%, з рибної сировини – 28%).

Матеріали та методи визначення якісної фальсифікації продукції птахівництва

Відомо, що властивості м'яса бройлерів обумовлені, в першу чергу, породою (кросом), віком, умовами утримання та годування. Для виявлення інформаційної фальсифікації продукції птахівництва та досягнення об'єктивності в ідентифікації виду бройлеру відповідно до умов вирощування використовували бройлерів одного кросу та віку. Для цього із торговельної мережі було обрано виробника птиці ТМ «Гаврилівські курчати», який вирощує бройлерів кросу «РОСС 308»; середня тривалість вирощування птиці до забою складає 45 діб (це були дослідні зразки). В якості контрольних зразків використовували бройлерів цього ж кросу та віку, але

вирощені в умовах домашнього господарства. Обрані продукти птахівництва досліджували як у охолодженню стані так і у разі повторного заморожування.

Розробленню фізичних методик вимірювання властивостей рідких фаз, передувала товарознавча оцінка вихідної сировини з використанням стандартних методів дослідження. В результаті не виявлено характерних відмінностей в органолептических, анатомічно-морфологічних властивостях бройлерів, вирощених в умовах домашнього господарства та птахофабрики. Установлено відмінності у хімічному складі для білого та червоного м'яса бройлерів.

Далі було надано характеристику пробам, одержаним із м'яса бройлерів за запропонованим способом пробопідготовки. Відзначено, що вони становлять собою однорідні, непрозорі рідини, без осаду, грудочок жиру та білка з блідо-рожевим (для білого м'яса) або червоно-бурум (для червоного м'яса) кольором. Під час дослідження основних компонентів сухої речовини рідкої фази встановлено, що вміст білка як для білого, так і червоного м'яса вище в рідких фазах, одержаних із дослідного зразка, що зумовлено умовами годування бройлерів. Високий вміст жиру у рідких фазах із червоного м'яса дослідних зразків бройлерів, вочевидь, обумовлений використанням клітинного способу утримання птиці. Наступним етапом дослідження була розробка фізичних методик для дослідження властивостей рідких фаз, які було обрано виходячи з агрегатного стану проб та їх хімічного складу.

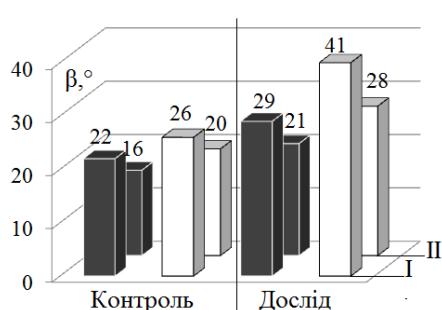


Рис. 1 – Кут розсіювання світла ($\beta, {}^\circ$) у рідких фазах зі свіжого (I) та повторно замороженого (II) м'яса бройлерів: □ – біле м'ясо, ■ – червоне м'ясо

Оптичні методики дослідження рідких фаз використовували з точки зору того, що вони становлять собою колоїдні розчини, а отже, мають здатність розсіювати та поляризувати світло [8].

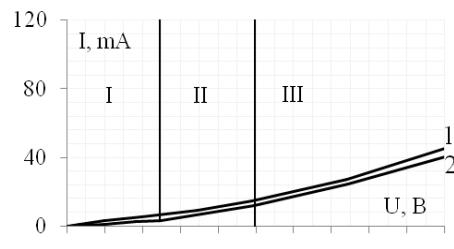
За допомогою оптичної методики (рис. 1), встановлено, що значення кута розсіювання світла β для рідких фаз із дослідних зразків вище, ніж у контрольних зразках: на 7° у червоному м'ясі та на 15° – у білому, що в першу чергу обумовлено наявністю білків та їх структурою. Проводячи

кореляцію з хімічним складом вихідної сировини, низькі значення кута розсіювання світла у рідких фазах із червоного м'яса можна пояснити високим вмістом жиру (до 4,46%).

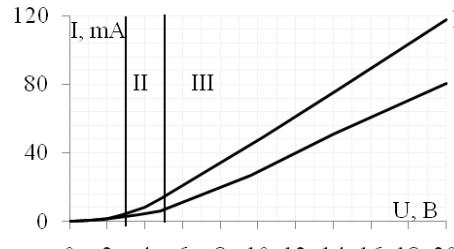
Установлено, що методика дослідження оптичних властивостей рідких фаз чутлива також до циклів заморожування, а тому може бути застосована для виявлення якісної фальсифікації замороженого м'яса. Виявлено, що зі збільшенням циклів заморожування значення кута розсіювання світла β зменшуються, що є характерною ознакою сировини, яка підлягала повторному заморожуванню.

Вибір електрофізичної методики зумовлений тим, що внутрішньоклітинна речовина м'яса є електролітом, а отже, має здатність проводити електричний струм [9]. Для проведення вимірювань складали стандартний електричний ланцюг.

В результаті використання електрофізичної методики виявлено, що для досліджуваних зразків рідких фаз явно виражена нелінійність характеристик залежності сили струму від напруги, що пояснюється електрохімічною взаємодією електролітів, спричиняючих каталізацію електрохімічних реакцій. Наведені криві розділили на три характерні ділянки ВАХ (рис. 2), для яких розраховано питомий опір та густину сили струму. Характер зміни значень цих показників за ділянками аналогічний, як для рідких фаз із білого м'яса, так і з червоного: значення питомого опору за ділянками зменшується, а густина сили струму – відповідно збільшується, а на третіх ділянках дані значення для бройлерів із торговельної мережі майже вдвічі більші, ніж для контролю.



а



б

Рис. 2 – Сила струму за різних значень напруги в рідких фазах із білого (1) та червоного (2) м'яса бройлерів: а – контроль, б – дослід

Кріоскопічну методику дослідження властивостей рідких фаз обрали з позицій того, що певна кількість хімічних компонентів, які відіграють роль в ідентифікації даного виду сировини, знаходяться в розчинному стані та знижують точку (або температуру) замерзання розчинника [10].

Використовуючи другий закон Рауля розраховані значення середньої молярної маси розчинених речовин. Виявлено, що для контрольних зразків характерними є менші значення даного показника, що свідчить про наявність у таких рідких фазах у переважній більшості низькомолекулярних речовин за типом кріопротекторів, які можуть бути представленими неорганічними сполуками (мінеральні компоненти, які є складовою кормів птиці, вирощеної в умовах домашнього господарства), а також органічними (екстрактивні речовини – креатин, креатинін, глікоген, цукри, кислоти та ін., – які обумовлюють більш яскраві смако-ароматичні характеристики страв та бульйону, приготовлених із домашньої птиці).

Таким чином, науково обґрунтовано можливість використання оптичної, електрофізичної та кріоскопічної методик для товарознавчої оцінки продуктів птахівництва для ідентифікації бройлерів відповідно до умов вирощування, а також виявлення фальсифікації у разі їх повторного заморожування.

Матеріали та методи визначення повторного заморожування продукції риболовства

Для виявлення якісної фальсифікації у разі повторного заморожування продукції риболовства були обрані карасі сріблясті, як найбільш поширений та адаптований об'єкт рибного промислу.

Товарознавчою оцінкою карасів сріблястих не виявлено суттєвих відмінностей за органолептичними, анатомічно-морфологічними властивостями карасів сріблястих різних сезонів вилову. Установлено вплив сезону вилову на хімічний склад м'яса карасів сріблястих.

Надано характеристику пробам, виділеним із м'язових тканин карасів сріблястих. Відзначено, що одержані проби становлять собою однорідні, непрозорі рідини червоно-бурого кольору, без осаду, грудочок жиру та білка, із вираженим рибним запахом. Установлено, що рідкі фази з карасів сріблястих осіннього вилову мають більший вміст сухих речовин, які представлені в першу чергу білками та жирами. Аналізуючи вміст інших компонентів слід зазначити, що в рідких фазах із сировини зимового та весняного виловів спостерігається зменшення частки вуглеводів до 14,43% на 100 г с.р.), що витрачається на енергетичні процеси, а також масової частки сирої золи до 3,15% на 100 г с.р., яка витрачається на регуляторні процеси. Оптичні властивості рідких фаз із продукції риболовства дослідили за допомогою поляриметричної методики. Виявлено, що розчини

рідких фаз зі свіжої сировини мають більший шлях проходження світла, а розчини рідких фаз із замороженої – менш прозорі та просвічуються променем джерела постійного світла на відстань до 15 мм (рис. 3).

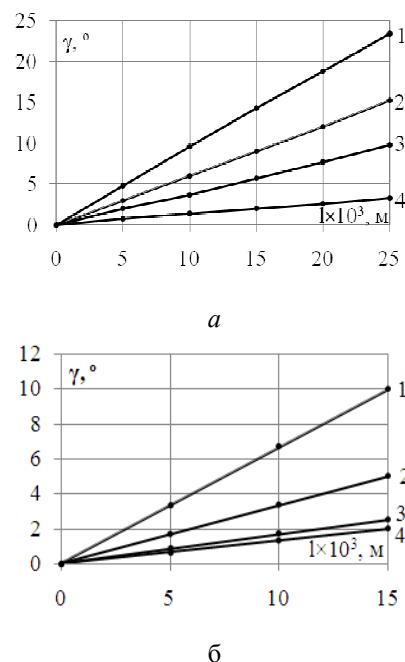


Рис. 3. – Обертання кута площини поляризації світла (γ) вздовж світлового променя (l) за різних концентрацій (1 – 100%, 2 – 50%, 3 – 25%, 4 – 10%) рідкої фази з м'язових тканин карасів сріблястих:
а – без заморожування, б – після повторного заморожування

Запропоновано використовувати кріоскопічну методику для виявлення фальсифікованої рибної сировини за аналогічною методикою, як і для продукції птахівництва. Аналіз отриманих даних показав, що в рідких фазах з рибної сировини осіннього та зимового виловів молярна маса розчинених речовин у 2,5...3 рази менша, ніж у сировині весняного вилову, що пояснюється вмістом у таких рідких фазах в переважній більшості низькомолекулярних сполук, а саме: азотистих речовин, як кінцевих продуктів обміну білків і нуклеїнових кислот [11].

Висновки

В результаті проведених досліджень встановлено:

1. Науково обґрунтовано спосіб підготовки об'єктів дослідження до товарознавчої оцінки, який полягає циклічному застосуванні операцій заморожування-центрифугування з визначенням його раціональних параметрів;

2. За допомогою стандартних методів проведено товарознавчу оцінку об'єктів дослідження,

у результаті якої не виявлено характерних відмінностей в анатомічно-морфологічних та структурно-механічних властивостях бройлерів, відібраних із домашнього господарства та з торговельної мережі, а також карасів сріблястих різних сезонів вилову;

3. Встановлено, що одержані проби – це непрозорі рідини, без осаду, грудочок жиру та білка з блідо-рожевим (для білого м'яса бройлерів) або червоно-бурим (для червоного м'яса бройлерів та карасів сріблястих) кольором та властивим запахом. Установлено, що відмінності хімічного складу м'яса відображуються на якісному складі рідких фаз;

4. Науково обґрунтовано використання оптичної, електрофізичної, кріоскопічної методик для встановлення якісної фальсифікації бройлерів (умови вирощування) та повторного заморожування продукції риболовства на прикладі карасів сріблястих.

Список літератури

1. **Feiner, G.** Meat products handbook. Practical science and technology / **G. Feiner** // Boca Raton, Boston, NY, Washington: CRC Press, Woodhead Publ, 2006.
2. **Сирохман, І. В.** Товарознавство м'ясних товарів: підручник / **І. В. Сирохман, Т. М. Лозова** // К.: Лібра. – 2009. – 378с.
3. Методи визначення фальсифікації товарів: підручник / **А. А. Дубініна** [та ін.]. – К.: Професіонал: Центр навчальної літератури. – 2010. – 272 с.
4. **Чепурной, И. П.** Идентификация и фальсификация продовольственных товаров: учебник / **И. П. Чепурной** // М.: Дашков и Ко. – 2005. – 457 с.
5. **Павлова, В. А.** Ідентифікація та фальсифікація продовольчих товарів: навч. посібник / **В. А. Павлова, Л. Д. Титаренко, В. Д. Малигіна** // – К.: Центр навчальної літератури. – 2006. – 192 с.
6. **Mogyoródi, F.** Formation and role of colloid material structures and surfaces in chemical reaction system: Part II / **F. Mogyoródi** // *Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects*. – 2008. – Vol. 319. – № 1-3. – P. 218-225.
7. **Montoya, J. M.** Press perturbations and indirect effects in real food webs / **J. M. Montoya, G. Woodward, M. C. Emmerson, R. V. Solé** // *Ecology*. – 2009. – T. 90(9). – P. 2426-2433.
8. **Vojtylov, V. V.** The effect of the size of particles on optical and electrooptical properties of colloids / **V. V. Vojtylov, M. P. Petrov, A. A. Spartakov, A. A. Trusov** // *Optics and spectroscopy*. – 2013. – Vol. 114. – № 4. – P. 630-638.
9. **Dietmar, L., Liane, P., Bernhard, S.** Characterisation of food qualityand structural stability by analytical centrifugation / **L. Dietmar, P. Liane, S. Bernhard** // *3rd International Symposium on Food Rheology and Structure*. – 2003. – P. 149-153.
10. **Zhou, Y. G.** Effect of water content on thermal behaviors of common buckwheat flour and starch / **Y. G. Zhou, D. Li, L. J. Wang, Y. Li, B. N. Yang, B. Bhandari, X. D. Chen, Z. H. Mao** // *Journal of Food Engineering*. – 2009. – Vol.93. – № 2. – P. 242-248
11. **Гасай, Є. Л.** Розроблення фізичних методик для товарознавчої оцінки продовольчої сировини тваринного походження: дисертація кандидата техн. наук / **Є. Л. Гасай** // Харк. держ. ун-т харч. та торг. – Харків. – 2014. – 244 с.

Bibliography (transliterated):

1. **Feiner, G.** Meat products handbook. Practical science and technology. *Woodhead Publ*, 2006.
2. **Sirokhman, I. V.** Tovaroznavstvo m'yasa that myasnih tovariv. Kyiv, Libra, 2009, 378 p.
3. **Dubinina, A. A.** Methodi viznachennya falsifikatsii tovariv. Kyiv: Profesional, 2010, 272 p.
4. **Chepurnoi, I. P.** Identificatsyya i falsyfykatsyya prodovolstvennih tovarov. Moskov, Dashkov I Ko, 2005, 457 p.
5. **Pavlova, V. A.** Identificatsyya ta falsyfykatsyya prodovolstvennih tovariv. Kyiv, Center navchal'noi literatury, 2006, 192 p.
6. **Mogyoródi, F.** Formation and role of colloid material structures and surfaces in chemical reaction system: Part II. *Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects*, 2008, **1-3**(319), 218-225.
7. **Montoya, J. M.** Press perturbations and indirect effects in real food webs. *Ecology*, 2009, **90**(9), 2426-2433.
8. **Vojtylov, V. V., Petrov, M. P., Spartakov, A.A., Trusov, A. A.** The effect of the size of particles on optical and electrooptical properties of colloids. *Optics and spectroscopy*, 2013, **4**(114), 630-638.
9. **Dietmar, L., Liane, P., Bernhard, S.** Characterisation of food qualityand structural stability by analytical centrifugation. *3rd International Symposium on Food Rheology and Structure*, 2003, 149-153.
10. **Zhou, Y. G., Li, D., Wang, L. J., Li, Y., Yang, B. N., Bhandari, B., Chen, X. D., Mao, Z. H.** Effect of water content on thermal behaviors of common buckwheat flour and starch. *Journal of Food Engineering*, 2009, **2**(93), 242-248
11. **Gasay, Ye. L.** Rozroblyennya fizichnih metodiv for tovaroznavchoi otsinki prodovolchoi sirovini tvarinnogo pohodzhennya, Kharkiv, 2014, 244.

Надійшла (received) 20.10.2015

УДК 665.52

ТЕХНОЛОГІЯ НАТУРАЛЬНИХ АРОМАТИЗАТОРІВ ОРІСТОВАНИХ НА ВІТЧИЗНЯНУ СИРОВИННУ І АПАРАТУРНУ БАЗУ

Н. Е. ФРОЛОВА¹, І. М. СИЛКА²

¹ Кафедра технологій оздоровчих продуктів, Національний університет харчових технологій, Київ, УКРАЇНА

² Кафедра технологій харчування та ресторанного бізнесу, Національний університет харчових технологій, Київ, УКРАЇНА
e-mail: irinasilka@ukr.net.

АННОТАЦІЯ. Проведено наукові і практичні дослідження технології, яка впроваджує фракційну вакуумну дистиляцію в переробку ефірних олій, що дозволяє отримати серію натуральних харчових ароматизаторів з однієї ефірної олії. З'ясовано технологічні стадії, встановлено параметри процесів, визначено якісні показники готових ароматизаторів. Розроблено апаратурно-технологічну схему виробництва натуральних ароматизаторів, а також рецептури ароматизаторів для внесення в харчові продукти.

Ключові слова: натуральний ароматизатор, ефірна олія, коріандер, фракціонування, технологія.

АННОТАЦИЯ В статье представлены результаты научных и практических исследований технологии предусматривающей фракционную дистилляцию эфирных масел. Установлены технологические режимы выделения фракций, которые являются готовыми ароматизаторами. Рассмотрена возможность целенаправленного комбинирования фракций с помощью пакета прикладных компьютерных программ для расширения ассортимента ароматизаторов. Данные ароматизаторы могут использоваться в ликероводочной и других отраслях пищевой промышленности.

Ключевые слова: натуральный ароматизатор, эфирное масло, кориандер, фракционирования, технология.

TECHNOLOGY OF NATURAL FLAVOURS FROM HOME RAW MATERIAL AND APPARATUS BASE

N. FROLOVA¹, I. SILKA²

¹ Department of Wellness Products Technology, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

² Department of Technology of Nutrition and Catering Business, National University of Food Technologies, Kyiv, UKRAINE

ABSTRACT Food flavors began to produce industrial way only in the XX-th century. Flavors improve the flavor, the assimilation of products and expand the assortment products of the same type. Natural flavors are especially in demand. They are represented in the Ukrainian market poorly. Essential oils belong to the natural flavor, too. Essential-oil industry of Ukraine works more for export. There are many solutions of essential oils recycling, for example, distillation, extraction, liquid gases, membrane technology and others. The purpose of this work is the study of technological stages of production of natural flavorings of local essential oils. Subject of research - essential oil from the seeds *Coriandrum sativum L.* Fractions were obtained by fractional distillation of the essential oil on the automatic setting. There are ready flavor with floral, herbal, pine aromas. Major technological conditions of temperature and pressure are presented in the article. Fractions can be mixed to produce new flavors and expand the assortment. The technical complex of instrumental analysis allows planning flavor. Package of application computer programs determines the ratio of essential oils fractions in the new flavors. These flavorings can be used beverage industry in the manufacture of hard liquor "Chernigov" and "Starokievskaya" and other sectors of the food industry. This technology is implemented in natural flavors during the year on the equipment of domestic production.

Keywords: natural flavor, essential oil, coriander, fractionation technology.

Вступ

Харчові ароматизатори – це винахід нашого часу. Саме в ХХ столітті використання харчових ароматизаторів набуло промислового значення та із ароматичних есенцій домашньої кухні ароматизатори поширилося до промислового виробництва. Варто зазначити, що ароматизатори формально не є харчовими добавками, оскільки мають дуже низькі концентрації в харчових продуктах. Вони не використовуються окремо, а лише додаються до їжі, покращуючи її аромат та засвоювання [1].

Аналіз стану питання

Ароматизатори визначають образ продукту, а

саме запах ромашки міцно асоціюється з розслаблюючою і заспокійливою дією; ментолу – із охолоджуючим ефектом; цитрусу – з оздоровлюючим і навіть з ефектом омолодження. Застосування ароматизаторів дозволяє виробляти широкий ассортимент однотипної продукції, але із різним ароматом; надавати ароматичних властивостей продуктам без запаху; відновлювати його в разі втрати при зберіганні або переробці. Технологія, розроблена колективом авторів є продовженням ефиролійної виробництва і орієнтована на вітчизняну сировину і технологічну базу, придатна як для великого поточного-механізованого виробництва, так і для підприємств малого й середнього бізнесу.

Аналіз останніх досліджень і літератури

Останнім часом ситуація на ринку ароматизаторів змінюється. Зростає інтерес до натуральних ароматизаторів, що пов'язано зі здатністю надавати продукту окрім аромату позитивної різноспрямованої біологічної дії [2]. Поряд з цим, на вітчизняному ринку помітний дефіцит асортименту натуральних харчових ароматизаторів.

До натуральних ароматизаторів, в першу чергу, відносять ефірні олії. Серед ефіроолійних рослин на території України переважають коріандр, м'ята, кмин, лаванда, троянда, шавлія, фенхель. Протягом останніх 20 років в промислову культуру введено полинь лимонну (*Artemisia balchanorum* Krach.), м'яту котячу (*Nereta cataria*), зміголовник молдавський (*Dracocephalum moldavicum* L.) [3].

За останні роки в Україні виробляється близько 100-120 тон ефірних олій на рік на суму 60-70 мільйонів гривень. Втім, незважаючи на значний досвід переробки ефірних олій, більша їхня частина експортується в інші країни і повертається в Україну у вигляді тисячі найменувань фармацевтичних препаратів, косметичних засобів, але вже за ціною в 30–50 разів дорожче [4]. Частіше інших закуповують українські ефірні олії країни Євросоюзу, і в першу чергу Франція, Англія, Голландія та Німеччина.

При переробці ефіроносів на ефірну олію, як зазначено у табл. 1, використовується лише 0,07–1,2 % сировини, а решта – відходи виробництва. А це формує високу вартість готової продукції.

Таблиця 1 – Вихід ефірних олій із ефіроолійної сировини та їхня вартість

Назва	Вихід, % мас.	Вартість за кг, \$
Насіння кропу	0,35–0,6	265,4
Коріандр	1,5–2,0	362,8
М'ята котяча	2,4–6	298,8
Кмин	3–8	266,1
Шавлія мускатна	0,4–0,6	78,2

Існуючі методи розв'язання задачі

У світі для збільшення асортименту натуральної ароматичної продукції ефірні олії підлягають різній переробці. З цією метою використовуються як традиційні технології, що добре себе зарекомендували, так і нові технологічні процеси. Так процес детерпенізації традиційно проводять паровою дистиляцією [5]. Значний розвиток отримало послідовне елююванням терпенів розчинниками (наприклад, пентан, іонні рідини, розчини етанолу) [6, 7].

Для видалення терпенів успішно використовуються зріджені гази – вуглеводні (Cn), хладони (галоїдовані вуглеводні C2, C4), які киплять при температурах нижче 0 °C і не потребують спеціального нагрівання при відгонці [8].

Фракціонування надкритичним двооксидом вуглецю дозволяє отримувати ароматичні продукти за низьких температур [9].

Існує багато інноваційних рішень виділення індивідуальних компонентів, в тому числі методом дистиляції [10], препаративної хроматографії [11]. Для отримання окремих фракцій із ефірних олій застосовують мембрани технології [12], вибіркове фракціонування [13]. Виправданим рішенням можна вважати переробку ефірних олій фракційним поділом під вакуумом, що базується на законах дистиляції складної суміші вуглеводнів [14].

Мета роботи – викладення результатів дослідження технологічних стадій виробництва натуральних харчових ароматизаторів з вітчизняних ефірних олій.

Постановка проблеми

Ефіроолійна галузь вважається однією з найрентабельніших у світі. На теренах нашої держави можна культивувати близько 75 видів ефіроносів. Однак зараз в Україні як промислову вирощують 11 видів ефіроолійних культур.

Основними центрами виробництва ефірної олії є: Алушта, Судак, Сімферополь, Прилуки, Лубни, Переяслав-Хмельницький, Драбів, Ромни. Існуючі технології або частково знищенні, або застаріли та потребують введення інноваційних рішень. Альтернативним виходом можна вважати виробництво натуральних ароматизаторів з ефіроолійної сировини, використовуючи фракційну перегонку ефірних олій під вакуумом.

Предмет дослідження – коріандрова ефірна олія (ДСТУ 4654:2006) вихідною сировиною для якої є коріандрове насіння.

Коріандр (*Coriandrum sativum* L.) займає до 80 % площ ефіроносів на Україні. При переробці 1000 кг коріандру отримують, кг: ефірна олія – 3,3; тверда фаза відходів – 990; дистиллят – 1000. Основною фракцією ефірної олії є аліфатичні терпени (69,7 %), частка моноциклічних терпенів становить 13 %, сесквітерпенів – 17,3 % [15]. Коріандрова ефірна олія характеризується високою бактерицидністю, тривають дослідження її протиракової дії.

Методи дослідження

При виконанні роботи використані сучасні фізико-хімічні методи дослідження складу (аналітична та препаративна газорідинна хроматографія, спектрофотометрія), а також методи дослідження ефірної олії коріандрової наведені у відповідному ДСТУ 4654:2006.

Газохроматографічний аналіз компонентного складу коріандрової ефірної олії проводили на хроматографі Hewlett-Packard 5890 з полум'яно-іонізаційним детектором. Умови аналізу: капілярна кварцова колонка (довжина 50 м, діаметр 0,2 мм),

нерухома фаза – карбовакс 20 М, газ-носій – гелій з постійною швидкістю 1,2 мл/хв. Введення проби з поділом потоку 1/20. Температура термостата 50 °C (2 хв), 50–200 °C (4 °C/хв), 200–280 °C (20 °C/хв), 280 °C (5 хв).

Ідентифікацію проводили контролем збіжності піків досліджуваного зразка і чистих речовин, які отримували препаративною хроматографією і молекулярною діагностикою [16]. Таким чином були ідентифіковано α -пінен, d-ліналоол, гераніол, камфора, геранілацетат, ліналілацетат. Ідентифікацію інших компонентів здійснювали за відносним часом утримання:

$$\rho = \tau_{P2}/\tau_{P1},$$

де τ_{P1} – час утримання досліджуваної речовини, τ_{P2} – час утримання речовини-мітки (α -пінен). Масові співвідношення компонентів встановлювали методом внутрішньої нормалізації. В розрахунках використовували масові коефіцієнти чутливості компонентів для полум'яно-іонізаційного детектора.

Кількісний вміст розраховували за відношенням площин піків компонентів до суми площин усіх піків на хроматограмі (метод нормалізації).

Аналізи проводилися з п'ятикратною повторюваністю. Збіжність вимірювань не менше 0,3 %. Метрологічна оцінка газохроматографічних вимірювань проводилася апаратно-програмним комплексом моделі MX-E «Хьюлетт-Паккард» (США). Метрологічні характеристики розрахунків: $S = 0,0067$; $\delta = \pm 2,26 \%$.

Результати дослідження

Для забезпечення високої якості ароматизаторів, коріандрова ефірна олія як вихідна сировина, повинна задовольняти наступні фізичні та хімічні показники наведені в табл. 2.

Таблиця 2 – Фізико-хімічні показники коріандрової ефірної олії

Назва показника	Величина показника
Зовнішній вигляд, запах, смак	Рухлива, жовтувато-блідо-зелена рідина з пряним теплим квітковим ароматом
Масова частка камфори, %	2,0–6,0
Показник заломлення при 20 °C	1,462–1,468
Кут обертання α , град	+9,0–+12,0
Кислотне число, мг KOH	1,5
Ефірне число, мг KOH, не більше	17,0
Розчинність	в 3-х об'ємах 70 %-го етанолу

Дослідження якісного та кількісного складу ефірної олії проводили на газовому хроматографі.

Основні ароматоутворюючі компоненти представлені у табл. 3.

Таблиця 3 – Склад коріандрової ефірної олії

Компонент	Вміст, %	Запах
α -пінен	6,04±0,27	Хвойний
камfen	1,3±0,06	Хвойний
мірцен	2,29±0,12	Цитрусовий
d -лімонен	4,13±0,22	Лимонний
β -фелландрен	0,25±0,05	Цитрусовий
1,8 цинеол	9,50±0,18	Камфорний
n-цимол	0,17±0,05	цитрусовий
d-ліналоол	66,8±0,16	Квітковий
d-камфора	3,2±0,08	Камфорний
ліналілацетат	0,16±0,5	Квітковий
l-борнеол	0,13±0,5	Хвойний
α -терпінеол	0,32±0,5	Квітковий
гераніол	1,42±0,5	Трояндовый
геранілацетат	2,9±0,5	Трояндовый

За наведеними даними з'ясовано, що в складі досліджуваної ефірної олії основним компонентом є аліфатичний терпеновий спирт d-ліналоол (66,8 %) з приемним запахом конвалії. Група компонентів (α -пінен, камfen, l-борнеол) мають хвойний аромат, мірцен, d-лімонен, β -фелландрен, n-цимол володіють цитрусовими відтінками аромату, 1,8 цинеол, d-камфора – запах камфори, ліналілацетат, α -терпінеол, гераніол, геранілацетат – квіткові відтінки. Цей набір компонентів можна прийняти як перший критерій для планування фракцій з такими ароматами: хвойний запах з різними тонами, перевага цитрусових тонів, камфорні відтінки, гармонійне поєднання різних тонів квіткового аромату.

На основі проведених досліджень було запропоновано апаратурно-технологічну схему виробництва харчових натуральних ароматизаторів. Данна схема передбачає виділення з ефіроолійної сировини ефірної олії та подальше її перероблення шляхом фракційної перегонки з виділенням фракцій, які мають різний аромат. Принципова технологічна схема отримання ароматизатору представлена на рис. 1.

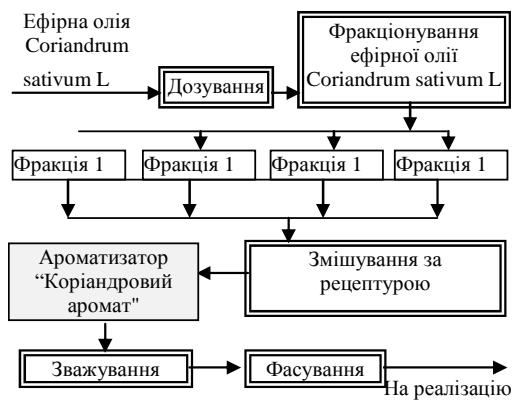


Рис. 1 – Схема отримання ароматизатору з коріандрової ефірної олії

У промисловості для фракційної перегонки летких складних сумішей застосовують різні апаратурні конструкційні рішення, основним вузлом яких є ректифікаційна колона [17].

У нашій розробці розділення коріандрової ефірної олії здійснюється на напівпромисловій автоматичній установці фракційної перегонки (УФП). Коротка технічна характеристика УФП: тип колонки – три секційна; число реальних тарілок – 20 шт.; число царг – 3 шт.; діаметр рефракційної частини – 30 мм; головка повної конденсації; регулювання флегмового числа і температури в кубі через блок управління; контроль температури – автоматичний. Елементи установки виготовлені з інертного матеріалу – термостійкого скла виробництва Simex.

Отриману зі складу ефірну олію подають у куб установки УФП, відкачують повітря до 2,64 кПа (20 мм рт. ст.) при кімнатній температурі. Включають подачу води на холодильники і повільно підвищують температуру бані і колонки до появилення відгону в головці. Установлюють режим роботи установки "на себе" протягом 35 хвилин. За тиску 1,97 кПа регулюють флегмове число в межах 1:7 і відбирають першу фракцію. Далі тиск знижують до 1,32 кПа і проводять відбір другої фракції при значенні флегмового числа 1:8. Відбір фракцій проводиться з верхньої частини колонки. За таких умов процес відбувається із забагаченням фракції найбільш летким ключовим компонентом, а також компонентами з близькими температурами кипіння, які значною мірою впливають на тональність аромату. При цьому слід зазначити, що за конкретним завданням проводиться корекція режимів фракціонування відповідно складу вихідної ефірної олії. При припиненні відбору дистилляту підвищується температура в кубі, чим досягаються нові умови рівноваги і отримання нової фракції. Робочі режими процесу наведені в табл. 4.

Таблиця 4 – Режими фракціонування коріандрової ефірної олії

№ фракції	Температура, °C			Флегмове число	Тиск кПа
	в кубі	в колоні	у парах		
1	85-91	57-59	29-32	1:7	1,97
2	90-94	57-66	33-49	1:8	1,32
3	94-97	66-79	54-58	1:10	1,32
4	97-114	79-94	60-76	1:1	1,32
Кубовий залишок	122				0,92

За наведеними умовами отримано чотири фракції та кубовий залишок. У табл. 5 представлено матеріальний баланс перегонки ефірної олії в апараті УФП (розрахунок на 1 завантаження 3,5 кг).

Усі фракції, почергово по мірі їх накопичення збиралися у герметичні скляні ємності. Загальний вихід фракцій становить 97,6 % від вихідної

Таблиця 5 – Матеріальний баланс перегонки коріандрової ефірної олії в апараті УФП

Завантажено	Отримано		
	Назва продукту	Маса продукту	% від вих.
Коріандрова ефірна олія, 3,5 кг	Фракція 1	0,184	5,3
	Фракція 2	0,252	7,2
	Фракція 3	0,400	11,40
	Фракція 4	2,118	61,2
	Куб. залишок	0,441	12,5
	Втрати	0,105	2,4

сировини. Втрати складають 2,4 % (неповне уловлювання летких низькокиплячих компонентів, втрати при захлипанні колонки).

З кожної фракції, після ретельного перемішування, відбирають середню пробу, визначають якісний склад і ароматичні властивості за загальноприйнятими і стандартизованими методами (ДСТУ 2729-94).

Оскільки компоненти ефірної олії, окрім характерного аромату мають індивідуальні температурні інтервали кипіння, зміна режимів фракційної перегонки приводить до зміни компонентного складу фракції, і, як наслідок, її аромату.

Кожна отримана фракція коріандрової ефірної олії є самостійним висококонцентрованим натуральним ароматизатором з стабільними фізико-хімічними характеристиками, що наведені в табл. 6.

Таблиця 6 – Характеристики ароматизаторів з коріандрової ефірної олії

Назва ароматизатора	Склад ароматизатора	Масова частка, %	Характеристика аромату
"Хвойний ліс"	α-пінен	56,61	Гармонічний хвойний з лимонними відтінками
	α-фелландрен	2,48	
	d-лімонен	32,19	
	цінеол	8,72	
"Травяниста насолода"	α-пінен	6,02	Гармонійне поєдання хвойних і трав'яних відтінків
	α-фелландрен	2,82	
	d-лімонен	81,77	
	цінеол	1,27	
	β-фелландрен	0,65	
	l-ліналоол	7,47	
"Квіткова фантазія"	d-лімонен	35,58	Квітковий з трав'яними відтінками
	цінеол	50,5	
	β-фелландрен	11,92	
	l-ліналоол	2,1	
"Коріандрові пающи"	цінеол	1,4	Гармонійний коріандровий
	β-фелландрен	0,12	
	l-ліналоол	89,78	
	камфора	8,7	
"Трояндо вий цвіт"	l-ліналоол	0,37	Квітковий, трояндового тону
	камфора	0,13	
	ліналілацетат	9,29	

Назва ароматизатора	Склад ароматизатора	Масова частка, %	Характеристика аромату
	l-борнеол	1,17	
	α - терпінеол	1,61	
	гераніол	87,43	

Окрім отримання натуральних ароматизаторів у вигляді окремих фракцій пропонується конструктування висококонцентрованих ароматизаторів цілеспрямованим комбінуванням фракцій. Дане конструктування здійснюється за участю технологічного комплексу розпізнання органолептичного образу та планування складу ароматизатора, який поєднує технічний комплекс інструментального аналізу та пакет прикладних комп'ютерних програм ППП "ХРОМАТОГРАФ". Це забезпечує рішення багатофакторних оптимізаційних задач прогнозування ароматичного образу і створення ароматизаторів із заданими властивостями.

Для отримання ароматизатору "Коріандровий аромат" фракції змішували в наступних кількостях, г: перша фракція – 0,81; друга фракція – 1,7; третя фракція – 4,37; четверта фракція – 36,61; п'ята фракція – 1,70, що відповідає масовому співвідношенню 1:2:3:4 = 1,0:2,1:5,4:44,4:2,1. Отриманий концентрований ароматизатор має наступний склад, мас. %: α-пінен – 4,8; камfen – 0,58; мірцен – 2,35; лімонен – 4,34; цінеол – 9,14; β-феллалдрен – 0,24; n-цимол – 0,37; камфора – 4,83; l-ліналоол – 70,9; ліналілацетат – 0,20; борнеол – 0,15; терпінеол – 0,17; гераніол – 0,70; геранілацетат – 1,45 [18].

Ароматизатор являє собою рідину злегка жовтуватого кольору з характерним чистим запахом коріандру. "Коріандровий аромат" може використовуватися замість ароматного спирту коріандрового насіння у лікеро-горілчаній промисловості при виготовленні гірких настоянок, лікерів та ін. напоїв, наприклад, "Чернігівська", "Старокиївська", як складова у розробці нових міцних, десертних і безалкогольних напоїв [19].

Промислове виробництво натурального ароматизатора "Коріандровий аромат" базується на вітчизняній апаратурній базі. Технологічне обладнання, з яким контактиують ефірна олія та продукти її переробки, мають бути виготовлені з хімічного та каталітично інертного матеріалу. Доцільно використовувати для куба промислової установки трьохгорлові колби із термостійкого скла. Ректифікаційна колона може бути цільною або складатися з декількох царг. Колона має ізоляючі вакуумні сорочки зі скла з срібним покриттям. В якості насадки слід використовувати одиничні спіральні скляні елементи величиною 2–3 мм. Головка повинна бути повної конденсації.

Технологія виробництва продуктів із ароматизатором "Коріандровий аромат" пройшла виробничі випробування в цеху ЗАТ «Фірма «Білайт».

Висновки

Беручи до уваги постійне зростання вартості ефірних олій, імпортну залежність вітчизняних ринків ароматизаторів, представлені в статті рішення економічно доцільні. Okрім урізноманітнення асортименту натуральних ароматизаторів, відбувається зниження їх вартості. Ароматизатори можна виробляти на протязі року, на вітчизняному обладнанні з використанням вітчизняної сировини різного рівня якості. Технологія придатна як для великого поточно-механізованого виробництва, так і для підприємств малого й середнього бізнесу. При незначних витратах на підприємстві можуть виробляти більше 10 тис. тон ароматизаторів щорічно.

У даній статті представлено послідовність і режими вакуумно-фракційного поділу коріандрової ефірної олії на серію висококонцентрованих ароматизаторів тривалого зберігання. При фракціонуванні відбувається одночасне концентрування ароматичних компонентів. Зміна аромату фракцій полягає в спрямованій зміні режимів процесу. Комбінування фракцій однієї ефірної олії, або різних ефірних олій за встановленими масовими співвідношеннями забезпечує численні варіанти натуральних ароматизаторів для різних галузей промисловості. Такий технологічний прийом не руйнує природні структурні зв'язки компонентів ефірних олій, зберігає їхню біологічну здатність. Ще однією суттєвою перевагою задіяного способу є отримання ароматизаторів у концентрованому вигляді і забезпечення стабільних характеристик. Технологія реалізовується протягом року на обладнанні вітчизняного виробництва.

Список літератури

1. Шелавина, Е. Погружаясь в ароматы мира / Е. Шелавина // [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://chin-ru.com/tunok-aromatizatorov/>.
2. Koroch, A. R., Juliani, H. R., Zygadlo, J. A. Bioactivity of essential oils and components // Flavour and Fragrances. Ed.R.G.Berger. New York: Springer, 2007. P. 87-115.
3. Касьяненко, М. К. Возрождая индустрию ароматов [Електронний ресурс] / День. – 2009. – 13 августа. – Режим доступу: <http://www.day.kiev.ua/uk/article/ekonomika/vidrodzhuyuchi-industriyu-aromativ>.
4. Гасуха, Л. О. Сучасний зміст продовольчої безпеки та її регіональний прояв – [Електронний ресурс]. – Режим доступу: URL: http://www.nbuv.gov.ua/portal/soc_gum/en_re/2011_8_1/85.pdf.
5. Stuart, G. R. Deterpenation of Brazilian orange peel oil by vacuum distillation / G. R. Stuart, D. Lopes, J. V. Oliveira // Journal of the American Oil Chemists' Society. – 2001. – T. 78. – № 10. – C. 1041-1044.
6. Arce, A. Essential oil terpenless by extraction using organic solvents or ionic liquids A. Arce // AIChE journal. – 2006. – T. 52 – № 6. – C. 2089-2097.
7. Lago, S. Improved concentration of citrus essential oil by solvent extraction with acetate ionic liquids S. Lago // Fluid Phase Equilibria. – 2014. – T. 361. – C. 37-44.

8. **Gironi, F.** Continuous countercurrent deterpenation of lemon essential oil by means of supercritical carbon dioxide: Experimental data and process modelling / **F. Gironi, M. Maschietti** // *Chemical Engineering Science*. – 2008. – Т. 63. – №. 3. – С. 651–661.
9. **Hu, Z.** Fractionation of Ligusticum Chuanxiong by Adsorption in Supercritical Carbon Dioxide / **Z. Hu** // *Industrial & Engineering Chemistry Research*. – 2012. – Т. 51. – № 44. – С. 14496–14502.
10. **Su, Z. Q.** Isolation of (-) Patchouli Alcohol from Patchouli Oil by Fractional Distillation and Crystallization. / **Z. Q. Su, X. L. Wu, M. J. Bao** [et al.] // *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*. – 2014. № 13. – P. 359–363.
11. **García-Risco, M. R.** Fractionation of thym Thymus vulgaris by supercritical fluid extraction and chromatography / **M. R. García-Risco** // *The Journal of Supercritical Fluids*. – 2011. – Т. 55. – №. 3. – С. 949–954.
12. **Sakamoto, K.** Differential recovery of terpene hydrocarbons and oxygenated compounds from condensates containing essential oil discharged during concentration of citrus juices using a ceramic membrane / **K. Sakamoto** et al. // *Food Science and Technology Research*. – 2003. – Т. 9. – №. 1. – С. 11–16.
13. **Fang, T.** Combination of supercritical CO₂ and vacuum distillation for the fractionation of bergamot oil / **T. Fang** et al. // *Journal of agricultural and food chemistry*. – 2004. – Т. 52. – №. 16. – С. 5162–5167.
14. **Бондаренко, Е. Ю.** Совершенствование технологии переработки плодов кoriандра способом паровой перегонки с использованием физико-химических методов // *автoreферат на соискание степени канд. техн. наук* / Краснодар, 2010. – 26 с.
15. **Matasyoh, J. C.** Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of Coriandrum sativum / **J. C. Matasyoh, Z. C. Maiyo, R. M. Ngure** [et al.] // *Food Chem.* – 2009. – Т. 113. – Р. 526–529.
16. **Фролова, Н. Е.** Ідентифікація компонентів ефірних олій в режимі препаративного виділення / **Н. Е. Фролова, В. О. Усенко, І. М. Маско** // *Харчова промисловість*. – 2005. – №4. – С. 79–82.
17. **Пат. № 19438** Україна, МПК⁷ C10G 7/00, B01D 3/14. Малогабаритна пересувна установка для фракційної перегонки вуглеводневих конденсатів. / Гориславець С. П., Ільєнко Б. К., Левченко В. П., опубл. 25.12.1997.
18. **Пат. №18131** Україна, МПК⁷ C11 B1/10, C11 B9/02. Спосіб отримання натуральних ароматизаторів «Коріандровий аромат» / Усенко В. О., Фролова Н. Е., Чепель Н.В., опубл. 16.10.2006, Бюл. №10.
19. **Пат. № 93835** Україна, МПК C12 G3/00/ Горілка осоліва «Капітан» / Українець А.І., Фролова Н.Е., Чепель Н.В., Усенко В.О.; замовник і патентовласник Націон. унів.-т харч. техн. – № 201005991; заявл. 18.05.2010, опубл. 10.01.2011, Бюл. № 1.
4. **Gasuha, L. O.** Suchasniy zmist prodovol'choi bezpeki ta ii regional'nyi proyav [Web]. http://www.nbu.gov.ua/portal/soc_gum/en_re/2011_8_1/85.pdf
5. **Stuart, G. R., Lopes, D., Oliveira, J. V.** Deterpenation of Brazilian orange peel oil by vacuum distillation. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 2001, **10**(78), 1041–1044.
6. **Arce, A.** Essential oil terpenless by extraction using organic solvents or ionic liquids. *AICHE journal*, 2006, **6**(52), 2089–2097.
7. **Lago, S.** Improved concentration of citrus essential oil by solvent extraction with acetate ionic liquids. *Fluid Phase Equilibria*, 2014, **361**, 37–44.
8. **Gironi, F., Maschietti, M.** Continuous countercurrent deterpenation of lemon essential oil by means of supercritical carbon dioxide: Experimental data and process modelling, *Chemical Engineering Science*, 2008, **3**(63), 651–661.
9. **Hu, Z.** Fractionation of Ligusticum Chuanxiong by Adsorption in Supercritical Carbon Dioxide. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2012, **44**(51), 14496–14502.
- 10 **Su, Z. Q., Wu, X. L., Bao, M. J.** [et al.] Isolation of (-) Patchouli Alcohol from Patchouli Oil by Fractional Distillation and Crystallization. *Tropical Journal of Pharmaceutical Research*, 2014, **13**, 359–363.
11. **García-Risco, M. R. et al.** Fractionation of thym Thymus vulgaris by supercritical fluid extraction and chromatography. *The Journal of Supercritical Fluids*, 2011, **3**(55), 949–954.
12. **Sakamoto, K.** et al. Differential recovery of terpene hydrocarbons and oxygenated compounds from condensates containing essential oil discharged during concentration of citrus juices using a ceramic membrane. *Food Science and Technology Research*, 2003, **1**(9), 11–16.
13. **Fang, T.** et al. Combination of supercritical CO₂ and vacuum distillation for the fractionation of bergamot oil. *Journal of agricultural and food chemistry*, 2004, **16**(52), 5162–5167.
14. **Bondarenko, E. Yu.** Sovershenstvovanie tekhnologii pererabotki plodov koriandra sposobom parovooy peregonki s ispol'zovaniem fiziko-khimicheskikh metodov. *Avtoreferat na soiskanie stepeni kand. tehn. nauk*. Krasnodar, 2010, 26.
15. **Matasyoh, J. C., Maiyo, Z. C., Ngure, R. M.** et al. Chemical composition and antimicrobial activity of the essential oil of Coriandrum sativum. *Food Chem.*, 2009, **113**, 526–529.
16. **Frolova, N. E., Usenko, V. O., Matsko, I. M.** Identifikatsiya komponentiv efirnih oliji v rezhimi preparativnogo vidilennya. *Kharchova promislovist'*, 2005, 4, 79–82.
17. **Pat. 19438** Ukraine, MPK7 C10G 7/00, B01D 3/14. Malogabaritna peresuvna ustanova dlya fraktsijinoyi peregonki vuglevodnevih kondensativ. Gorislavetsь S.P., Il'jenko B. K., Levchenko V.P., opubl. 25.12.1997.
18. **Pat. №18131** Ukraine, MPK7 S11 V1/10, S11 V9/02. Sposib otrimannya natural'nyih aromatizatoriv «Koriandroviji aromat» Usenko V.O., Frolova N.E., CHepel N.V., opubl. 16.10.
19. **Pat. 93835** Ukraine, MPK S12 G3/00/ Gorilka osoliva «Kapitan» Ukrayinetsь A.I., Frolova N.E., CHepel N.V., Usenko V.O.; zamovnik patentovlasnik Natsion. univ.-t harch. tehn. – 201005991; zayavl. 18.05.2010, opubl. 10.01.2011,

Bibliography (transliterated)

1. **Shelavina, E.** Pogruzhayas' v aromaty mira [Web] <http://chinru.com/rynom-aromatizatorov/>.
2. **Koroch, A. R., Juliani, H. R., Zygadlo, J. A.** Bioactivity of essential oils and components. *Flavour and Fragrances. Ed.R.G.Berger. New York: Springer*, 2007, P. 87–115.
3. **Kas'yanenko, M. K.** Vozrozhdaya industrii aromatov, 2009 [Web] <http://www.day.kiev.ua/uk/article/ekonomika/vidrodz-huyuchi-industriyu-aromativ>.

Наодійшила (received) 25.09.2015

ЗМІСТ

ЕНЕРГЕТИКА, МАШИНОБУДУВАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Бундза А. Б., Єлізаров О. С., Кущовий С. М. Управління температурним полем технологічного процесу екструзії виробництва алюмінієвих профілів	5
Грабовский А. В. Зависимость собственных частот и собственных форм колебаний от инерционно-жесткостных характеристик систем с конечным числом степеней свободы	11
Жеглова В. М., Яглинский В. П., Козерацкий Г. В., Обайди А. С., Москвичев Н. Н. Критериальная парето-оптимизация параметров аксиально-поршневых гидромашин	17
Завальнюк О. П. Ферозондовий перетворювач в засобах автоматичного контролю загальної міцності судна	22
Каток О. А. Дослідження розподілу модуля поздовжньої пружності металу вузла парогенератора зі зварним швом №111 і його навколошової зони	29
Кондряков Е. А. Численное моделирование испытаний дисковых образцов при термошоке в 3D постановке	34
Круглий Я. Д. Варианты учета контактного взаимодействия в бандажных полках при расчетах собственных колебаний лопаточного венца методом конечных элементов	39
Ларін О. О. Дослідження характеристик опору втомі гумових сумішей, що входять до складу елементів пневматичних шин після штучного старіння матеріалу	45
Рябчиков М. Л. Моделювання реального процесу проходження рідини крізь матеріали	51
Ткачук Б. В., Томашевский Р. С., Сокол Е. И., Лесовой В. Н. Уточнение эквивалентной электрической схемы организма для биомпедансометрии при ультрафильтрации	56
Чайковська Є. Є., Стефанюк В. В., Абросимов І. В. Узгодження виробництва та споживання енергії у складі когенераційної системи	63
Щуцька Г. В. Дифузійні властивості двошарових матеріалів	68

ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ

Воскобойник В. А. Разработка методики оптимального проектирования основных компонентов технических средств обработки информации	73
Коцювський В. М. Навчання нейромереж із функцією активації двопорогового типу	78
Левчук О. М. Проблемно-орієнтована інформаційна технологія визначення стану електронного пристрою по вихідних імпульсних і аналогових синалах	84
Дихтяр Н. Ю., Саваневич В. Е., Мовсесян Я. С. Метод иерархического отождествления измерений кадра астрономического телескопа с формулярами звездного каталога	90
Осадчий В. В., Еремеев В. С., Cioxin B. D., Горлов П. I., Сердюк I. M., Васильев В. М. Проектування WEB порталу формування інформаційної бази даних з міграції птахів в азово-чорноморському регіоні України	98
Строкань О. В., Прокопенко В. В. Інформаційно-програмна система управління мікрокліматом в зерносховищі	104
Данчук В. Д., Кривенко В. І., Олійник Р. В., Тарабан С. М. Електричне моделювання міських автотранспортних потоків	109
Шабельников А. А. Система управления зажиганием для двигателей внутреннего сгорания SECU-3L (Lite)	115

ХІМІЧНІ ТА ХАРЧОВІ ТЕХНОЛОГІЇ, ЕКОЛОГІЯ

Буртна І. А., Ружинська Л. І., Руденко Л. С. Експериментальне дослідження технологічних параметрів первапорційного очищення води	122
---	-----

Безусов А. Т., Никитчина Т. И. Термооптимум и термостабильность пектинметилэстеразы и полигалактуроназы ферментного препарата из люцерны	127
Завальнюк І. П. Контроль герметичності упаковок молочних продуктів	132
Кузнецова О. Я. Дослідження окиснювальної стабільності авіаційних мінеральних гідравлічних олив	137
Одарченко Д. М., Одарченко М. С., Карбівнича Т. В., Гасай Е. Л. Розроблення фізичних методик для оцінки якості тваринної сировини	147
Фролова Н. Е., Сілка І. М. Технологія натуральних ароматизаторів орієнтованих на вітчизняну сировинну і апаратурну базу	148

CONTENTS

ENERGY, ENGINEERING AND STRUCTURAL MATERIALS TECHNOLOGY

Bundza A., Elizarov A., Kuschoviy S. Control the temperature field of extrusion process in production aluminum profiles	5
Grabovskiy A. Dependence of natural frequencies and natural modes of the inertia and stiffness properties of systems with finitely many degrees of freedom	11
Zheglova V. M., Yaglinsky V. P., Kozeratsky G. V., Obaydi A. S., Moskvichev M. M. Pareto-optimization of kriteria parameters of axial and piston machinery hydraulics	17
Zavalniuk O. P. Fluxgate transducers in means of general hull strength automatic control	22
Kamok O. A. Investigation into the distribution of the longitudinal modulus of elasticity in the metal of welded joint No. 111 and its heat-affected zone in a steam generator	29
Kondriakov I. Numerical simulation of disk-shaped specimens tests at thermal shock in three-dimensional formulation	34
Kruglii Ya. D. Variants of the consideration of the contact interaction in the shrouds for the modal analysis of the turbine blading by finite element method	39
Larin O. An investigation of the pneumatic tire's rubber compounds on the fatigue resistance after artificial aging of the materials	45
Riabchikov M. L. Simulation of the real process of passing water through the material	51
Tkachuk B., Tomashevsky R., Sokol Y. I., Lesovoy V. N. Elaboration the body equivalent electrical circuit for bioimpedancemetry during ultrafiltration	56
Chaikovskay E., Stefanuk V., Abrosymov I. Coordination energy production and consumption in the composition of the cogeneration system	63
Shchutska Ganna Diffusion properties double-layer materials	68

INFORMATION TECHNOLOGY AND CONTROL SYSTEMS

Voskoboynik V. The development of a methodology for optimal design of the main components of technical devices of information processing	73
Kotsovsky V. Learning of neural nets with bithreshold-like activation function	78

<i>Levchuk O.</i> Problem-oriented information technology determine the state of the electronic device on the pulse and analog signals	84
<i>Dikhtyar M., Savanevych V., Movsesian Ia.</i> Method of hierarchical identification the measurements of the frame of astronomical telescope with the forms of star catalog	90
<i>Osadchy V., Eremeev V., Siokhin V., Gorlov P., Serdyuk I., Vasiliev V.</i> Designing of the web portal forming an information database on migration of birds in the azov-black sea region of ukraine	98
<i>Strokan O.V., Prokopenko V. V.</i> Information and software control system of microclimate in the granary	104
<i>Danchuk V., Kryvenko V., Oliynyk R., Taraban S.</i> Electric simulation of urban road traffic flows	109
<i>Shabelnikov A.</i> Ignition control system for internalcombustion engines SECU-3L (Lite)	115
CHEMICAL AND FOOD TECHNOLOGY, ECOLOGY	
<i>Burtna I., Ruzhinska L., Rudenko L.</i> Experimental research of technological parameters of pervaporation water purification	122
<i>Bezusov A., Nikitchina T.</i> Temoptimum and thermostability of pectin methylesterase and polygalacturonase of enzymatic preparations from alfalfa	127
<i>Zavalniuk I.</i> Testing of sealing of dairy products packages	132
<i>Kuznetsova O.</i> Research oxidation stability of aviation mineral hydraulic oils	137
<i>Odarchenko D., Odarchenko M., Karbivnycha T., Gasay Ye.</i> Development of physical methods for merchandising expertise of food raw materials of animal origin	147
<i>Frolova N., Silka I.</i> Technology of natural flavours from home raw material and apparatus base	148

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

Збірник наукових праць
Серія:
Нові рішення в сучасних технологіях
№ 46 (1155) 2015

Науковий редактор чл.-кор. НАН України, д-р техн. наук, проф. Е. 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.nsmt@gmail.com

Обл.-вид. № 42-15

Підп. до друку «30» жовтня 2015 р. Формат 60x84 1/16. Папір офсетний. Друк цифровий.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 10,0. Облік.вид.арк. 10,0.
Тираж 100 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

