



Volume 11, Issue 4 /2019

ISSN 2312-3125 (print), ISSN 2312-931X (online)

UDC 681.5+66-933.6+338.364

Editor-in-chief:

Artemenko S., prof. (Odessa, Ukraine)

Honorary scientific consultant:

Khobin V., prof. (Odessa, Ukraine)

Deputy chief editors:

Kotlyk S., PhD (Odessa, Ukraine)

Yehorov V., PhD (Odessa, Ukraine)

Editorial Board:

Montik P., prof. (Odessa, Ukraine)

Kniazieva N., prof. (Odessa, Ukraine)

Plotnikov V., prof. (Odessa, Ukraine)

Dorofieiev Y., PhD (Kharkiv, Ukraine)

Tymchenko V., prof. (Mykolayiv, Ukraine)

Zhuchenko A., prof. (Kiev, Ukraine)

Kirichenko L., prof. (Kharkiv, Ukraine)

Radivilova T., PhD (Kharkiv, Ukraine)

Konovenko N., PhD (Odessa, Ukraine)

Apostolos Korlos, prof. (Thessaloniki, Greece)

Executive editor:

Bodiul O.S., PhD (Odessa, Ukraine)

Computer design and imposition:

Kozub O.O. (Odessa, Ukraine)

Founder:

Odessa National Academy of Food Technologies

Address of the editorial office:

Ukraine, Odessa, Kanatnaya str, 112, 65039,

tel.: (048)712-42-54, e-mail:

journal.atbp@gmail.com

It's sent for the press 23.12.2019.

It's recommended for printing and publishing online by academic council of Odessa National Academy of Food Technologies

03 December 2019, protocol № 7

Articles are printed in original language

It's allowed to use materials from the journal according to the Creative Commons license: CC-BY.

It's printed in publishing house of Diol Print corp. (Odessa). Circulation is 101 copies.

Журнал реферується і індексується 14-ма провідними Світовими базами даних і індексними системами: EBSCO Information Services, ISSN, CrossRef, NBUV, Directory of Open Access Journals (DOAJ), ROAD, Google Scholar, OCLC WorldCat, Bielefeld Academic Search Engine (BASE) ULRICHS WEB Global Serials Directory, Index Copernicus International.

Журналу присвоєно Міжнародний стандарт якості ISO 26324: 2012. Стандарт свідчить про те, що кожній статті опублікованій в нашому журналі в обов'язковому порядку присвоюється Міжнародний цифровий ідентифікатор DOI номер (Digital Object Identifier). Це в свою чергу гарантує, що доступ до матеріалу статті буде доступний для читачів незалежно від будь-якого роду форс-мажорних ситуацій.

Згідно з Міжнародними нормами журналу присвоєна ліцензія Creative Commons CC-BY Attribution, яка фіксує звід правил щодо захисту авторських прав авторів. Для збільшення рівня цитованості статей, опублікованих в нашому журналі вченими з усього Світу, і, як наслідок, збільшення індексу цитування наших авторів, редакція журналу АТБП оформляє всі пристатейні списки літератури відповідно до IEEE Citation Style (стиль цитування Міжнародної асоціації Institute of Electrical and Electronics Engineers).



АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ І БІЗНЕС-ПРОЦЕСІВ ЗМІСТ

Голубков П., Пугников Д., Егоров В. Комп'ютерний зір у вирішенні проблеми розпізнавання форми кубічного пельменя.....	4
Жуковецька С. Л., Слушна Н. В., CFD-моделювання руху холодоагенту по трубопроводу мультизональної системи кондиціонування повітря.....	10
Жученко О. А., Хібеба М. Г. Дослідження температурних полів в процесі формування вуглецевих виробів в режимі пресування.....	16
Максимов М. М., Давидов В. О. Моделювання балансування енергосистеми за умови утримання в ній значної частки джерел енергії, що не диспетчеризуються.....	27
Мулеса О. Ю., Снитюк В. Є., Герзанич С. О. Метод нечіткої класифікації на основі послідовного аналізу вальда..	35
Жигайло О. М., Нечепуренко В. В., Добровольський В. В. Автоматизації замісу тіста з використанням нейронної мережі.....	41
Плотников В. М., Борцова Ю. В. Захист даних засобом цифрового підпису.....	49
Шейкус А. Р. Математичне моделювання динамічних режимів процесу ректифікації при застосуванні рухливих керуючих впливів.....	55
Ковальчук Д. А., Мазур О. В. Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: імітаційне моделювання.....	68

AUTOMATION OF TECHNOLOGICAL AND BUSINESS-PROCESSES CONTENT

Golubkov P., Putnikov D. Yehorov V. Computer vision in solving problems of recognition of form of dumplings production of cubic form.....	4
Zhukovetska S. L., Slushna N. V. CFD-modeling piping movement of refrigerant multisonal air conditioning systems.....	10
Zhuchenko A. A., Khibeba M. G. Carbon products formation process in the press mode temperature fields research.....	16
Maksimov M. M., Davydov V. O. Modeling the balancing of the energy grid on condition of maintenance in her significant proportion of non-dispensable energy sources.....	27
Mulesa O., Snytyuk V., Gerzanich S. A fuzzy classification method based on the sequential wald analysis.....	35
Zhigailo O. M., Nечepurenko V. V., Dobrovolskiy V. V. Dough mixing automation by using neural networks	41
Plotnikov V. M., Bortsova Iu. V. Data protection with digital signature.....	49
Sheikus A. R. Dynamic simulation of mobile control actions on the distillation process.....	55
Kovalchuk D. A., Mazur O. V. A research of steam-air mixtures heat utilization processes: simulation modeling.....	68



УДК 004.93

КОМП'ЮТЕРНИЙ ЗІР У ВИРІШЕННІ ПРОБЛЕМИ РОЗПІЗНАВАННЯ ФОРМИ КУБІЧНОГО ПЕЛЬМЕНЯ

Голубков П.¹, Путников Д.², Егоров В.³^{1,2,3}Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, УкраїнаORCID: ¹0000-000207663-6772; ²0000-0003-2577-8858, ³0000-0003-4699-834XE-mail: ¹pavelsergeevichgolubkov@gmail.com; ²ulkiorrira@gmail.com; ³mechatronics.robotlab@gmail.com

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation of technological and business - processes.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

DOI:

Анотація. В статті вирішується задача розпізнавання форми продукції випускаємої новим комплексом обладнання з виробництва пельменної продукції особливої, кубічної форми. Випуск продукції складної важкорезалізовуваної форми використовується для збільшення економічної складової і виключення підробок. При виготовленні товарів виникає ряд труднощів, які необхідно подолати. Однією з них є облягання фаршу з мінусовою температурою в тісто яке має кімнатну температуру. Провівши ряд активних експериментів з замороженим фаршем і теплим тістом, отримавши і обробивши отримані результати, ми прийшли до висновку, що створюване обладнання повинно мати не тільки систему автоматичного керування, що включає в себе можливість керувати комплексом, а й містити алгоритми, які дадуть можливість розраховувати за математичними моделями необхідну для підтримання властивостей тісту температуру. А також включити в можливості комплексу комп'ютерну обробку отриманої продукції і використовуючи сучасні технології комунікацій, забезпечити передачу інформації, яка буде доступна для віддаленої роботи як самого комплексу, так і інформації про вироблену ним продукцію. Використовуючи нову, важкорезалізовану форму і сучасні технології, створений комплекс в майбутньому дасть можливість не тільки виробляти нову продукцію з формою захищеної від підробки, а й скоротити витрати виробництва. Ефективність буде обумовлена ще й в тому, що на продукцію такої форми, може бути підвищена ціна з міркування змісту в собі краєвих інгредієнтів і можливість використання більш компактною упаковки. Так як в пачках маючих в собі напівфабрикати кубічної форми фактично буде відсутній вільне місце на відміну від сучасних пачок з пельменній продукцією, що містить до 20% повітря. Це, так само дасть приріст ефективності при зберіганні і переміщенні продукції. Варто звернути увагу ще і на те, що дане обладнання зможе виробляти нові види продукції напівфабрикатів, що включають в себе не тільки використовуються в даній час поширені інгредієнти, такі як свинина і яловичина, а й м'ясо птиці, риби і містити безліч різних рецептів фаршу і тіста. Що в свою чергу розширить асортимент виробляємої продукції напівфабрикатів. Кінцевою стадією приготування пельменя є його перевірка та відбракування. Якщо форма пельменя відповідає регламенту, його відправляють на подальшу заморозку, в протилежному випадку, його відправляють на переробку, при цьому вноситься коригування у систему керування температурою нагріву. Сучасні комп'ютерні методи дозволяють отримувати ці дані з фото. Існує 3 методи обробки фото для виявлення необхідних властивостей: статичні методи, методи порівняння із зразком, нейронні мережі. У роботі розглядається розпізнавання пельменя з використанням бібліотеки відкритого доступу OpenCV, яка вже має безліч функцій розпізнавання та постійно дописується новими.

Abstract. The article solves the problem of recognizing the shape of products produced by a new complex of equipment for the production of dumplings of special, cubic shape. The production of complex difficult-to-sell products is used to increase the economic component and eliminate counterfeiting. When manufacturing goods, there are a number of difficulties that need to be overcome. One of them is a minced-temperature fork in the dough that has room temperature. Having conducted a series of active experiments with frozen minced meat and warm dough, having received and processed the obtained results, we came to the conclusion that the created equipment should have not only an automatic control system, which includes the ability to control the complex, but also contain algorithms that will allow to calculate mathematical models necessary to maintain the properties of the test temperature. And also to include in the complex capabilities of computer processing of received products and using modern communication technologies, to ensure the transfer of information that will be available for remote work of the complex itself, as well as information about its products. Using a new, hard-to-realize shape and modern technologies, the complex will in the future not only produce new products with a form of tamper-proof, but also reduce production costs. Efficiency will also be conditioned by the fact that for the products of this form, the price may be increased considering the



content of the best ingredients and the possibility of using a more compact packaging. Since packs of cubic semi-finished products will actually have no free space, unlike modern packs of ravioli products containing up to 20% air. This will also increase efficiency when storing and moving products. It is also worth noting that this equipment will be able to produce new products of semi-finished products, which include not only currently used common ingredients such as pork and beef, but also poultry, fish and many different recipes minced meat and dough. Which, in turn, will expand the range of products manufactured semi-finished products. The final stage of dumpling preparation is to check and reject it. If the dumpling shape meets the regulations, it is sent for further freezing; otherwise, it is sent for processing, with adjustment to the heating temperature control system. Modern computer methods allow you to retrieve this data from a photo. There are 3 photo processing methods to identify the required properties: static methods, sample comparison methods, neural networks. The paper examines ravioli recognition using the OpenCV open access library, which already has many recognition features and is constantly being updated with new ones.

Ключові слова: харчова промисловість, напівфабрикати, пельмені, виробництво, робототехніка, OpenCV, комп'ютерний зір, відкритий код, розпізнавання зображення, алгоритм розпізнавання.

Keywords: food industry, semi-finished products, dumplings, production, robotics, OpenCV, computer vision, open source, image recognition, recognition algorithm.

Вступ.

Python – це високорівнева мова програмування загального призначення, орієнтована на підвищення продуктивності розробника і читання коду. Синтаксис ядра Python мінімалістичний. У той же час стандартна бібліотека включає великий обсяг корисних функцій.

OpenCV – бібліотека алгоритмів комп'ютерного зору, обробки зображень та чисельних алгоритмів загального призначення з відкритим кодом. Реалізована на C / C ++, також розробляється для Python, Java, Ruby, Matlab, Lua та інших мов. Може вільно використовуватися в академічних і комерційних цілях — поширюється в умовах ліцензії BSD.

На даний момент існує багато задач у яких треба прийняти якесь рішення, яке буде залежить від наявності об'єкта на зображенні чи просто класифікувати його. Можливість розпізнавати до недавнього вважалась привілеєм людей, проте зараз все змінюється.

Розділяють 3 групи методів розпізнавання образів:

- Порівняння із зразком. У цю групу входить класифікація по найближчому середньому, класифікація по відстані до найближчого сусіда. Також в групу порівняння зі зразком можна віднести структурні методи розпізнавання.

- Статистичні методи. Як видно з назви, статистичні методи використовують деяку статистичну інформацію при вирішенні задачі розпізнавання. Метод визначає приналежність об'єкта до конкретного класу на основі ймовірності. В ряді випадків це зводиться до визначення апостеріорної ймовірності приналежності об'єкта до певного класу, за умови, що ознаки цього об'єкта взяли відповідні значення. Прикладом служить метод на основі байєсівського вирішального правила.

- Нейронні мережі. Окремий клас методів розпізнавання. Відмінною особливістю від інших є здатність навчатися.

Розглянемо загальний алгоритм розпізнавання. Загальна послідовність дії при розпізнаванні виглядає так:

- Попередня обробка зображення — згладжування, фільтрація перешкод, підвищення контрасту;

- Бінаризація зображення і виділення контурів об'єктів;

- Початкова фільтрація контурів по периметру, площі, коефіцієнту форми;

- Приведення контурів до єдиної довжини, згладжування;

- Перебір всіх знайдених контурів, пошук шаблону, максимально схожого на даний контур.

Бібліотека OpenCV надає можливість розробникам легко детектувати контури зображення і маніпулювати ними. Для пошуку контурів пропонується використовувати функцію `cvFindContours()`. Функція `cvFindContours` відшукує контури від монохромного зображення і повертає число знайдених контурів. Після того, як контури виявлені — їх можна вивести в зображення за допомогою функції `cvDrawContours()`.

Для згладжування і отримання більш акуратних контурів використовуємо функцію `cvApproxPoly()`. Коли камера рухається на якомусь об'єкті, то важливо визначити напрямок руху.

В цьому випадку можна використовувати наступну функцію в OpenCV — `phaseCorrelate`. Функція використовується для визначення зрушень між двома зображеннями (масивами).

Проте треба розуміти аби чітко виділяти контур та ідентифікувати пельмені, перш за все необхідно знати як працює камера і як вона сприймає кольори, які фактори можуть вплинути на результати. Основними факторами що заважають можна назвати освітлення та нечіткість знімку. Використання кольору в обробці зображень обумовлено двома основними причинами. По-перше, колір є тим важливим ознакою, який часто полегшує розпізнавання і виділення об'єкта на зображенні. Будь-яке зображення складається із пікселів, а піксель в свою чергу має колір. Колір пікселя записують у форматі RGB.

RGB – це адитивна кольорова модель, як правило, що описує спосіб кодування кольору для відтворення кольору за допомогою трьох кольорів, які прийнято називати основними.

**Основна частина.**

Алгоритм системи розпізнавання працює таким чином: система повинна отримати загальну інформацію про середу знаходження об'єкту, далі основною метою є аналіз та оцінка того що зображено. Для того аби ідентифікувати зображення потрібно виділити основні признаки, тобто унікальну інформацію. Після чого ПЗ забезпечення зможе проаналізувати та виділити необхідні об'єкти. Нижче приведений алгоритм загальної роботи системи (рис. 1).

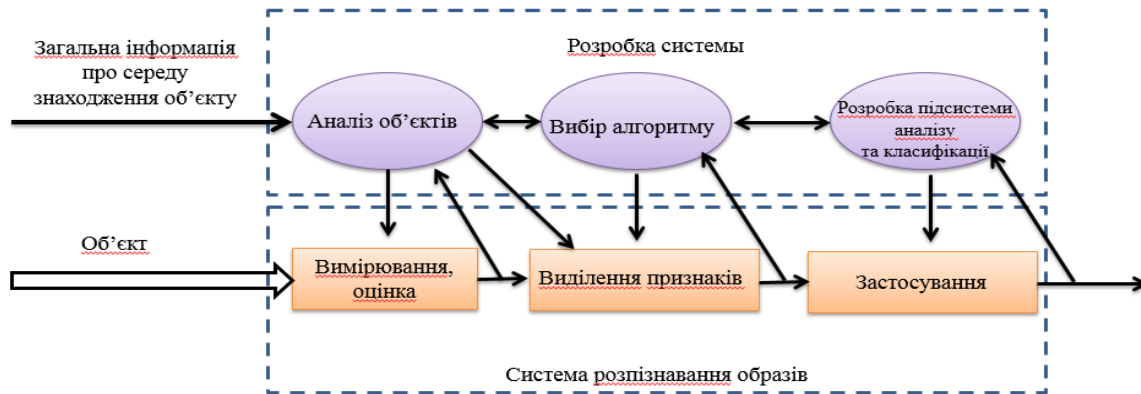


Рис. 1 – Алгоритм роботи

Open CV – бібліотека алгоритмів комп'ютерного зору, обробка зображення та чисельних алгоритмів загального призначення. Реалізована на C/C++, також розробляється для Python, Java, Ruby, Matlab, Lula та інших мов.

Опис функцій та позначень:

1) CV — модуль обробки зображень і комп'ютерного зору

- базові операції над зображеннями (фільтрація, геометричні перетворення, перетворення кольорних просторів);
- аналіз зображень (вибір відмінних ознак, морфологія, пошук контурів, гістограми);
- аналіз руху, спостереження за об'єктами;
- виявлення об'єктів, зокрема осіб;
- калібрування камер, елементи відновлення просторової структури

2) Highgui — модуль для введення / виведення зображень і відео, створення призначеного для користувача інтерфейсу

- захоплення відео з камер і з відео файлів, читання / запис статичних зображень.

При роботі алгоритму зображення проходить декілька етапів, перш за все зображення перетворюється із кольорового у сірі відтінки та робиться декілька розмитим для того аби зменшити шуми і підвищити точність (рис.3.6.3.6).

Для того аби розмити зображення ми використовуємо фільтр Гауса. Оскільки всі результати виявлення краю легко впливають на шум зображення, важливо відфільтрувати шум, щоб запобігти помилковому виявленню шуму. Щоб згладити зображення, застосовується гауссовий фільтр для згортання з зображенням. Цей крок трохи згладить зображення, щоб зменшити наслідки очевидного шуму на детекторі краю. Рівняння для ядра гауссового фільтра розміру $(2k + 1) \times (2k + 1)$ дається:

$$H_{ij} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} \exp\left(-\frac{(i - (k + 1))^2 + (j - (k + 1))^2}{2\sigma^2}\right); 1 \leq i, j \leq (2k + 1)$$

Важливо зрозуміти, що вибір розміру гауссовського ядра вплине на продуктивність детектора. Чим більше розмір, тим нижче чутливість детектора до шуму. Крім того, помилка локалізації для виявлення краю дещо збільшиться із збільшенням розміру ядра гауссовського фільтра.

Наступним кроком ми знаходимо контури кожного об'єкту на зображенні. Визначення градієнта інтенсивності зображення та контуру у зображенні може вказуватись у різних напрямках, тому алгоритм Санпу використовує чотири фільтри для виявлення горизонтальних, вертикальних та діагональних країв у розмитому зображенні. Оператор виявлення краю повертає значення для першої похідної в горизонтальному напрямку (G_x) та вертикальному напрямку (G_y). З цього можна визначити градієнт краю і напрямок:

$$G = \sqrt{G_x^2 + G_y^2}$$

$$\Theta = \text{atan2}(G_y, G_x),$$

де G можна обчислити за допомогою функції `hypot`, а `atan2` — арктангенна функція з двома аргументами. Кут напрямку краю округлений до одного з чотирьох кутів, що представляють вертикальну, горизонтальну та дві діагоналі (0° , 45° , 90° та 135°). Регулювання краю в кожній колірній області буде встановлено на певні значення кутів, наприклад, θ в $[0^\circ, 22,5^\circ]$ або $[157,5^\circ, 180^\circ]$ відображається 0° .



Цей крок робиться з метою ідентифікації усіх об'єктів аби потім виділити лише потрібні(рис.3.6.3.7).

Відстеження краю по гістерезису

Виявлення контурів стосовно фотографії

До сих пір пікселі з сильним краєм, безумовно, повинні брати участь в кінцевому крайовому зображенні, оскільки вони витягуються з істинних країв зображення. Проте, будуть деякі суперечки про пікселі зі слабким краєм, так як ці пікселі можуть бути або вилучені з істинного краю, або через зміни шуму / кольору. Щоб отримати точний результат, слабкі краю, викликані останніми причинами, повинні бути видалені. Зазвичай слабкий крайній піксель, викликаний істинними краями, буде пов'язаний з сильним крайовим пікселем, в той час як шумові відгуки не пов'язані. Для відстеження крайового з'єднання застосовується аналіз BLOB-об'єктів, дивлячись на слабкий крайовий піксель і його 8-суміжні сусідні пікселі. Поки в BLOB-об'єкті присутня один піксель з сильним краєм, цю точку слабого краю можна ідентифікувати як точку, яка повинна бути збережена.

Поліпшення визначення Canny Edge

У той час як традиційне виявлення контурів Canny забезпечує відносно просту, але точну методологію для завдання виявлення контурів, з більш жорсткими вимогами до точності і надійності виявлення, традиційний алгоритм не може впоратися з складним завданням виявлення контурів. Основні недоліки традиційного алгоритму можна узагальнити наступним чином:

1. Фільтр Гаусса застосовується для згладжування шуму, але він також згладить кордон, що вважається височастотним ознакою. Це збільшить ймовірність пропуску слабких ребер і появи ізольованих ребер в результаті.

2. Для обчислення амплітуди градієнта старий алгоритм виявлення країв Канні використовує центр в невеликому вікні сусідства 2×2 для обчислення середнього значення кінцевої різниці для подання амплітуди градієнта. Цей метод чутливий до шуму і може легко виявити помилкові краю і втратити реальні краю.

3. У традиційному алгоритмі виявлення фронту Canny буде два фіксованих глобальних порогових значення для фільтрації помилкових фронтів. Однак, оскільки зображення стає складним, для різних локальних областей будуть потрібні дуже різні порогові значення, щоб точно визначити реальні краю. Крім того, глобальні порогові значення визначаються вручну за допомогою експериментів традиційним методом, що призводить до ускладнення розрахунків, коли необхідно мати справу з великою кількістю різних зображень.

4. Результат традиційного виявлення не може досягти задовільно високої точності одиночного відгуку для кожного фронту — з'являться багатоточкові відгуки.

Однак, деякі з контурів не закриті – тобто лінії контурів не замкнені. Щоб це виправити застосуємо операцію «закриття». Після чого виявляємо контури об'єктів на зображенні(рис.3.6.3.8). Для цього використовуємо функцію `cv2.findContours`.

Пельмень являє собою квадрат. У квадраті чотири вершини. Тому, якщо ми розглянемо контур і виявимо, що він має чотири вершини, то ми можемо припустити, що це пельмень, а не інший предмет на зображенні. Для кожного з контурів ми обчислюємо периметр, використовуючи `cv2.arcLength`, а потім апроксимуємо (згладжуємо) контур, використовуючи `cv2.approxPolyDP`.

Причина, по якій ми апроксимуємо контур, полягає в тому, що він може не бути ідеальним прямокутником. Через зашумлення і тіні на фото ймовірність того, що у коробки буде рівно 4 вершини, невелика. Апроксимуючи контур, ми вирішуємо цю проблему.

Для того аби перевірити роботу коду було проведено ряд есперементів із різними видами кольорів, зображень та їх положенням. Для того аби знизити шуми зображення було трансформовано у відтінки сірого та дещо розмито. В результаті чого кольорове зображення стало чорно-білим, проте кожний колір має свій відтінок сірого у палітрі. Для відладки коду та для того аби визначити, які кольори будуть розпізнаватися безпомилково, а які ні, був проведений експеремент із найбільш використовуваними кольорами.

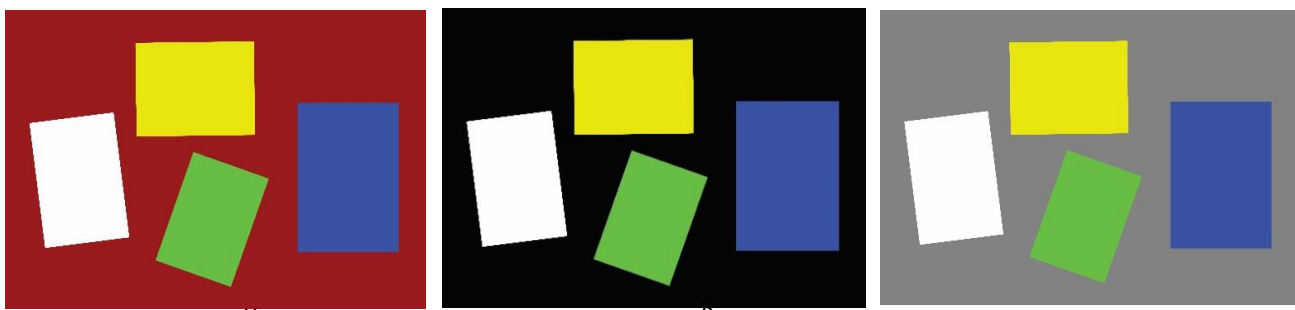


Рис. 2 – Розпізнавання прямокутників різного кольору

В результаті проведення дослідження було виявлено, що на зображенні (рис. 2, а) розроблений код не зміг виявити прямокутних синього кольору, на зображенні (рис. 2, б) – були знайдені всі 4 прямокутники, на зображенні (рис. 2, в) - розроблений код не зміг виявити прямокутних синього та зеленого кольорів.



У результаті роботи алгоритму ми отримали такі результати обробки зображення. Наше вхідне зображення має вигляд (рис. 3).



Рис. 3 – Пельменний продукт кубічної форми для ідентифікації

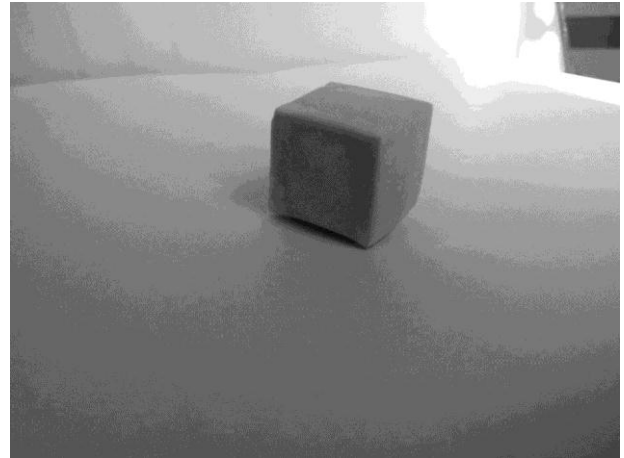


Рис. 4 – Зниження шумів

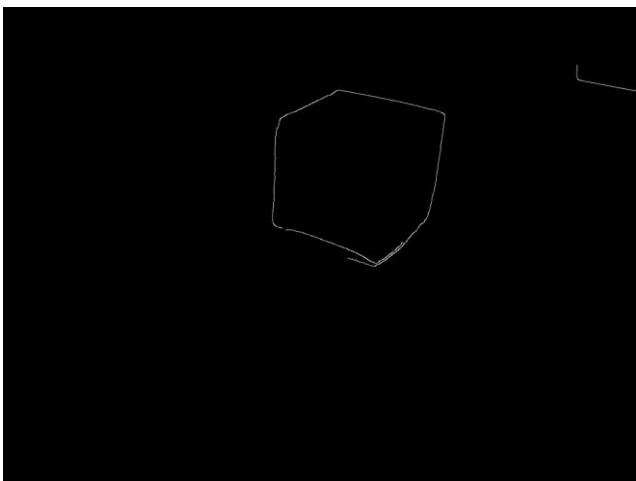


Рис. 5 – Знаходження контуру

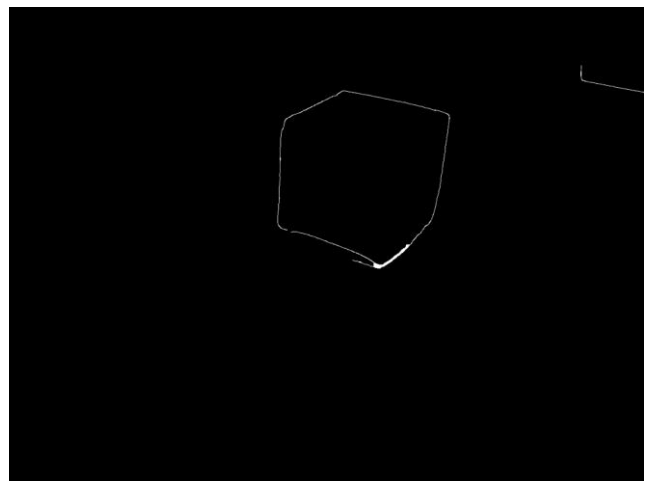


Рис. 6 – Замикання контуру

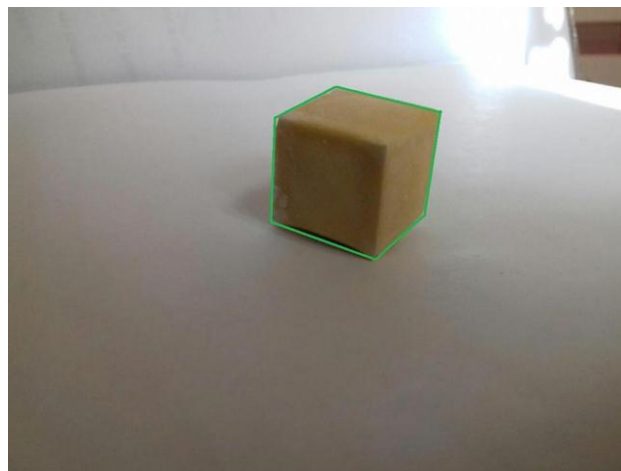


Рис. 7 – Виявлення контуру



Отже, можна сказати, що фон на якому знаходиться зображення також впливає на результат розпізнавання. Також провели досліді щодо знаходження контурів об'єктів, які розташовані по різному. В результаті аналізу, можна сказати, що виявлення контурів залежить від багатьох факторів. Із самих важливих можна виділити:

- освітленість приміщення;
- колір самого об'єкта;
- середа в якому цей об'єкт розташований;
- положення об'єкту.

Нижче представлений код реалізації алгоритму ідентифікації об'єкту та його виділення з поміж інших.

```
import numpy as np //імпортуємо необхідні бібліотеки
import cv2
image = cv2.imread(«example.jpg») //завантажує зображення
gray = cv2.cvtColor(image, cv2.COLOR_BGR2GRAY)// змінює колір на відтінки сірого
gray = cv2.GaussianBlur(gray, (3, 3), 0) // зменшує чіткість
cv2.imwrite(«gray.jpg», gray) //формує зображення
edged = cv2.Canny(gray, 10, 250) //визначаємо контури
cv2.imwrite(«edget.jpg», edged)// формуємо зображення
kernel = cv2.getStructuringElement(cv2.MORPH_RECT, (7, 7)) //викликаємо ф-цію
закриття контурів
closed = cv2.morphologyEx(edged, cv2.MORPH_CLOSE, kernel) //застосовуємо функцію
cv2.imwrite(«closed.jpg», closed)
cnts = cv2.findContours(closed.copy(), cv2.RETR_EXTERNAL, //знаходить контури та
рахає ix
cv2.CHAIN_APPROX_SIMPLE) [1]
total = 0
for c in cnts: //цикл по контурам
    peri = cv2.arcLength(c, True) //обчислюємо периметр
    approx = cv2.approxPolyDP(c, 0.02 * peri, True) //згладжуємо контур
    if len(approx) >= 4: //якщо є 4 вершини, то це коробка
        cv2.drawContours(image, [approx], -1, (0, 255, 0), 4)
        total += 1
print(«I find {0} pelmen on this image».format(total))
cv2.imwrite(«output.jpg», image)
```

Висновки. У роботі було досягнуто, завдяки бібліотеці OpenCV, що використовується розробниками у сфері компютерного зору при обробці фотографій, розпізнавання пельменя кубічної форми. А саме таких його властивостей, як форма. Як видно з рисунків контур пельменя після обробки точно відтворює форму оригіналу, що дозволяє використовувати його у системі автоматичного керування нагрівом пельменного продукту.

Список використаних джерел

- [1] Berry M.R., Bradshaw J.G., Kohnhorst A.L. Heating Characteristics of Ravioli in Brine and in Tomato Sauce Processed in Agitating Retorts // Journal of Food Science. 1985. No 3 (50). С. 815–822;
- [2] Morgan M.T., Haley T.A. Design of Food Process Controls Systems 2007. 485–552 с;
- [3] Martin C.K. [и др.]. Measuring food intake with digital photography // Journal of Human Nutrition and Dietetics. 2014. No SUPPL.1 (27). С. 72–81;
- [4] Yousefi-Darani A. [и др.]. Closed loop control system for dough fermentation based on image processing // Journal of Food Process Engineering. 2018. No 5 (41);
- [5] Lima J., Moreira J.F.P., Sousa R.M. Remote supervision of production processes in the food industry 2016. 1123–1127 с;
- [6] Kolberg D., Zühlke D. Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies 2015. 1870–1875 с.

References

- [1] M. R. Berry, J. G. Bradshaw, and A. L. Kohnhorst, “Heating Characteristics of Ravioli in Brine and in Tomato Sauce Processed in Agitating Retorts,” *Journal of Food Science*, vol. 50, no. 3, pp. 815–822, 1985; <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1985.tb13803.x>
- [2] M. T. Morgan and T. A. Haley, “Design of Food Process Controls Systems,” in *Handbook of Farm Dairy and Food Machinery*, 2007, pp. 485–552; <https://doi.org/10.1016/B978-081551538-8.50019-4>



- [3] C. K. Martin, T. Nicklas, B. Gunturk, J. B. Correa, H. R. Allen, and C. Champagne, "Measuring food intake with digital photography," *J. Hum. Nutr. Diet.*, vol. 27, no. SUPPL.1, pp. 72–81, 2014; <https://doi.org/10.1111/jhn.12014>
- [4] A. Yousefi-Darani, O. Paquet-Durand, V. Zettel, and B. Hitzmann, "Closed loop control system for dough fermentation based on image processing," *J. Food Process Eng.*, vol. 41, no. 5, 2018; <https://doi.org/10.1111/jfpe.12801>
- [5] J. Lima, J. F. P. Moreira, and R. M. Sousa, "Remote supervision of production processes in the food industry," in *IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management*, 2016, vol. 2016–January, pp. 1123–1127;
- [6] D. Kolberg and D. Zühlke, "Lean Automation enabled by Industry 4.0 Technologies," in *IFAC-PapersOnLine*, 2015, vol. 48, no. 3, pp. 1870–1875. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.359>

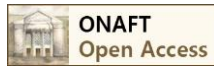
УДК 004.928

CFD-МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ ХОЛОДОАГЕНТУ ПО ТРУБОПРОВОДУ МУЛЬТИЗОНАЛЬНОЇ СИСТЕМИ КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ

Жуковецька С. Л.¹, Слушна Н. В.²

кафедра Комп'ютерної інженерії ОНАХТ
ORCID: ¹0000-0002-2199-5874, ²0000-0002-0940-5069
E-mail: ¹feirefly@gmail.com

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation of technological and business - processes.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI:

Анотація. Технології просторової візуалізації і симуляції роботи технологічного обладнання набули особливої актуальності завдяки тому, що забезпечують істотно більш наочний спосіб розгляду проєктованого об'єкта. Віртуальні прототипи, в ролі яких виступають 3D моделі, дозволяють проаналізувати роботу обладнання перед прийняттям проєктних рішень. При вивченні та дослідженні моделей істотну допомогу надає анімація – тобто відтворення і демонстрація моделі в процесі її формування або зміни.

У даній статті описується моделювання потоку рідини в замкнутому контурі на основі твердотільної просторової моделі елементів мультизональної системи кондиціонування. В якості системи просторового моделювання та аналізу використаний продукт компанії SolidWorks Inc. Для моделювання потоку використовується інструмент Flow Simulation, який включений в SolidWorks і реалізує методи обчислювальної гідродинаміки.

При підготовці до дослідження була створена просторова модель і сформована розрахункова область. Суть формування розрахункової області зводиться до виділення на моделі замкнутого контуру, що відповідає умовам наявності стінок зіткнення і обмеженості вхідних і вихідних отворів.

Після чого задача аналізу протікання рідини по замкнутому контуру зводиться до вирішення стаціонарної задачі внутрішнього типу. В цьому випадку замкнута порожнина – це і є рідинний простір, а заглушки на кінцях отворів трубопроводу є тими елементами, які завершують формування системи "рідина-тіло". Для такої системи вже можливе проведення гідрогазодинамічного аналізу за допомогою Flow Simulation.

Використання комплексу сучасних програмних засобів забезпечило візуальну оцінку картини перебігу холодоагенту по трубопроводу мультизональної системи кондиціонування, необхідну для визначення проблемних місць.

Abstract. The technologies of spatial visualization and simulation of the operation of technological equipment have become particularly relevant due to the fact that they provide a significantly more visual way of considering the designed object. Virtual prototypes, such as 3D models, allow you to analyze the operation of equipment before making design decisions. In the study and research of models, animation provides significant assistance, which reproduces and demonstrates the model in the process of its formation or change.

This paper describes the modeling of a fluid flow in a closed loop based on a solid-state spatial model of the elements of a multi-zone air conditioning system. The SolidWorks Inc. product was used as a system for spatial modeling and analysis. To



simulate the flow, the Flow Simulation tool was used, which is available in SolidWorks and implements computational methods of fluid dynamics.

At the first stage of the work, a spatial model was created and a computational domain was formed. The point of the formation of the computational domain is to isolate a closed loop on the model, which satisfies the conditions for the presence of contact walls and the limitations of the inlet and outlet openings.

After that, the task of analyzing the fluid flow in a closed loop is reduced to solving a stationary problem of an internal type. In this case, the closed cavity is the liquid space, and the plugs at the ends of the pipeline openings are those elements that complete the formation of the «liquid-body» system. For such system, it is already possible to perform hydro-gas-dynamic analysis using the Flow Simulation.

Using a complex of modern software allowed us to obtain the basic parameters of fluid motion and heat transfer, as well as to provide a visual assessment of flow patterns in order to identify the problem areas.

Ключові слова: комп'ютерна анімація; просторове моделювання; дослідження руху; SolidWorks.

Keywords: computer animation, spatial modeling; studies of the movement; SolidWorks.

Вступ.

Проблеми в галузі опалення, вентиляції та кондиціонування повітря є різноманітними. Для будівельних проектів стає все більш важливим мати інформацію про клімат в приміщенні заздалегідь. Концептуальні помилки можуть бути виключені з реалізації на ранній стадії проекту за рахунок використання методу комп'ютерного моделювання і симуляції. Симуляція як «віртуальна випробувальна лабораторія» забезпечує більш глибоке розуміння складних фізичних явищ, ніж випробування або вимірювання.

У зв'язку з розвитком програмної і апаратної бази обчислювальної техніки і можливості проведення чисельного просторового моделювання потоків рідини в замкнутому просторі, виникла можливість використовувати комп'ютерне моделювання в якості початкового методу дослідження руху холодоагенту по трубопроводу мультизональної системи кондиціонування в заданому приміщенні.

Метою роботи є просторове моделювання і симуляція руху холодоагенту по трубопроводу мультизональної системи кондиціонування.

Об'єкт дослідження. Як об'єкт дослідження була розглянута мультизональна система кондиціонування. Мультизональна система – це один з варіантів вирішення завдання з кондиціонування декількох приміщень відразу. Система складається з зовнішнього блоку і декількох внутрішніх блоків, кожен внутрішній блок може управлятися централізовано або локально (рис. 1).

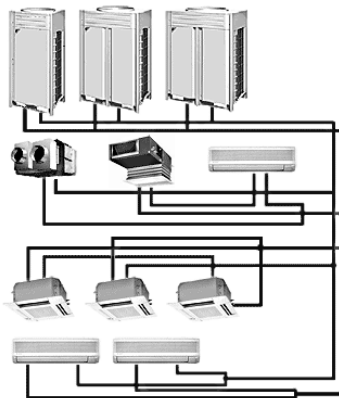


Рис. 1 – Схематичне зображення мультизональної системи кондиціонування повітря

Методи дослідження.

Відтворення фізичного процесу руху потоку в заданому об'єкті є суттю *CFD*-моделювання. *CFD*-моделювання (обчислювальна гідродинаміка) – це підрозділ обчислювальної гідродинаміки, який включає сукупність фізичних, математичних і чисельних методів, що призначені для обчислення характеристик потокових процесів.

В результаті *CFD*-моделювання створюється об'єкт дослідження з візуалізацією колірним полем градієнта практично будь-яких параметрів гідро-газо-динамічних потоків. Отже, виникає можливість візуально побачити не тільки всю картину розподілу гідро-газодинамічних потоків, вплив зовнішніх факторів, а й побачити всі параметри, які цікавлять, в будь-якій точці 3-D простору досліджуваного об'єкта.

При використанні *CFD*-моделей створюється віртуальна копія об'єкта та моделюються процеси, які відбуваються з цим об'єктом. Робота з програмним забезпеченням, що забезпечує *CFD* моделювання, складається з трьох послідовно виконуваних етапів – моделювання, інтерпретації і візуалізації. При цьому візуалізація дозволяє відобразити результати інтерпретації – швидкість, температуру і тиск, а також потоки рідини, що рухаються по трубопроводу системи.



Найбільш популярним є комп'ютерне моделювання за допомогою систем автоматизованого проектування. Для створення моделі руху повітря в лабораторії кондиціонування було обрано середовище *SolidWorks*. *SolidWorks* є системою, що дозволяє створювати керовані розмірами твердотільні моделі, і може служити базою для вирішення багатьох інженерних завдань. Широкі можливості базового модуля поєднуються з великою кількістю спеціалізованих додатків, що робить *SolidWorks* потужним програмним комплексом, здатним гнучко налаштуватися для вирішення практично будь-яких проектних і виробничих завдань [1].

Розділ 1. Підготовка просторової моделі і розрахункової області

Щоб розрахувати фізичний процес, тобто зміну фізичних параметрів в просторі і часі, його треба спочатку математично змоделювати. Оскільки фізичні процеси – результат дії законів фізики, то найбільш відповідні фізичним процесам математичні моделі являють собою систему, що відображає закони фізики в диференціальних і / або інтегральних рівняннях (із залученням, якщо треба, напівемпіричних і емпіричних констант і залежностей) з граничними і початковими умовами, які прив'язують дану математичну модель до поставленої конкретної фізичної (інженерної) задачі, тобто визначають дані фізичні процеси в цьому завданні.

Оскільки системи диференціальних і / або інтегральних рівнянь, що використовуються в математичній моделі, зазвичай не мають аналітичного рішення, вони приводяться до дискретного виду і вирішуються на деякій розрахунковій сітці.

Результатом чисельного моделювання буде візуалізація руху рідини по трубопроводу мультизональної системи кондиціонування. Чисельна модель включає в себе:

- тривимірну модель досліджуваного приміщення, в якому передбачається монтаж мультизональної системи кондиціонування, з необхідною деталізацією;
- виділення замкнутого контуру трубопроводу в якості розрахункової області;
- граничні умови, що враховують тиск середовища і швидкість рідини на вході трубопроводу і т. д.

В якості вихідних даних просторового моделювання взяті план приміщення лабораторії та креслення блоків системи кондиціонування. Результатом є просторова твердотільна параметрична збірка, представлена на рисунку 2.



Рис. 2 – Просторова твердотільна модель

Для побудови розрахункової області модель потрібно радикально спростити та сформувати замкнений контур. Вихідна геометрична модель системи кондиціонування не має замкнутої порожнини для протікання рідини (рис. 3).

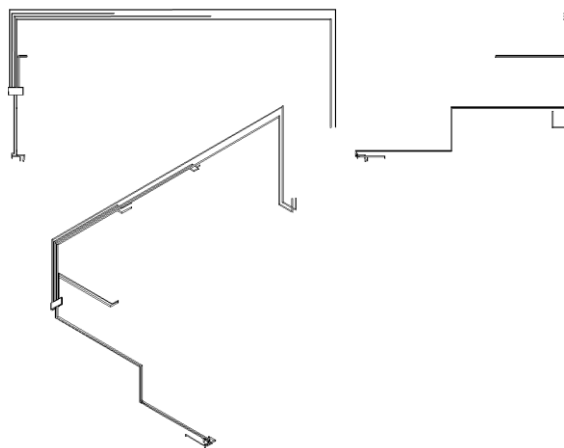


Рис. 3 – Вихідна геометрична модель



Тому були створені додаткові елементи – Заглушки – на кінцях трубопроводів. Вигляд отворів трубопроводів до встановлення заглушок та після наданий на рисунку 4.



Рис. 4 – Вигляд отвору трубопроводу а) до встановлення заглушок б) після

Отримали замкнуту порожнину, яка відповідає двом умовам: обмеженості вхідних і вихідних отворів (умова *Opening*); наявності стінок моделі (умова *Wall*). Тепер завдання аналізу протікання рідини всередині тіла можна звести до вирішення стаціонарної задачі внутрішнього (*Internal*) типу. Замкнута порожнина у внутрішній задачі – це і є її рідинний простір, а кришки є тими елементами, які, доповнюючи систему, пов'язану з тілом, роблять з неї систему "рідина – тіло", в якій вже можливе проведення гідрогазодинамічного аналізу за допомогою *Flow Simulation*.

Розділ 2. Формування граничних умов

При вирішенні внутрішніх (*Internal*) задач граничні умови задаються на поверхнях моделі, тобто на її стінках (*wall*) і отворах (*openings*, в деяких випадках, наприклад, при розрахунку природної конвекції в замкнутій порожнині моделі, такі отвори можуть бути відсутніми).

При завданні граничних умов для внутрішніх задач необхідно стежити за їх непротиворічністю. Наприклад, стаціонарна внутрішня задача не може бути вирішена, якщо задано тільки *Flow openings* (Отвори з заданим плинном) з умовою *Velocity* (Швидкість) і жодного *Pressure opening* (Отвір з заданим тиском) – в цьому випадку практично неможливо забезпечити баланс масової витрати через отвори моделі. Щоб цього уникнути, в проєкті необхідно задати, по крайній мірі, одну умову *Pressure opening* (Отвір з заданим тиском).

Для внутрішніх течій необхідно ставити граничні умови на вхідних і вихідних отворах моделі. На заглушках трубопроводів, що підходять до внутрішніх блоків поставлена умова *Environment Pressure* (Тиск зовнішнього середовища), що інтерпретується як повний тиск текучого середовища, що надходить до моделі. На заглушки трубопроводу, що виходить із зовнішнього блоку поставлена умова *Outlet Mass Flow* (Вихідна масова витрата). Завдяки цьому, крім типу основного параметра (витрата), задається напрямок потоку через дану поверхню: витікання.

Проведено три дослідження рідинних потоків в різних відсіках трубопроводу. Граничні умови в розрахунках відрізняються тільки напрямком і областю протікання рідини. Наступні граничні умови формують потік від внутрішніх блоків до зовнішнього (рис. 5).

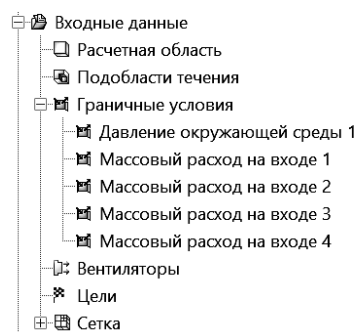


Рис. 5 – Граничні умови першого розрахунку

Розрахунок потоку від зовнішнього блоку до внутрішніх розбито на два етапи: до розгалужувача та після нього. Завдання параметрів розрахунку представлені на рисунках 6 та 7.

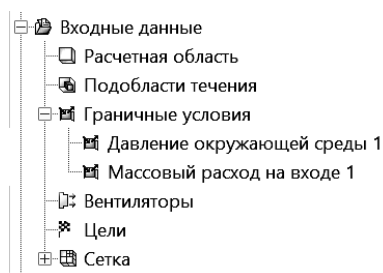


Рис. 6 – Граничні умови другого розрахунку до розгалужувача

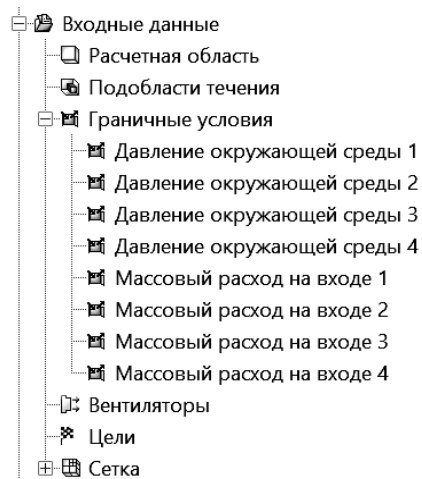


Рис. 7 – Граничні умови другого розрахунку після розгалужувача

Третій розрахунок формують потік від компресора до теплообмінника. Завдання параметрів розрахунку представлені на рисунку 8.

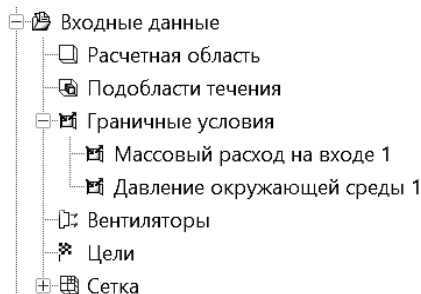


Рис. 8 – Граничні умови третього розрахунку

Розділ 3. Інтерпретація результату розрахунку

Однією з переваг засобів аналізу, інтегрованих в САПР, є візуалізація результатів розрахунку безпосередньо в графічному вікні системи моделювання. Для візуалізації Flow Simulation має повний інструментарій, який став вже стандартом для додатків такого роду. У нього входять зрізові і поверхневі епюри, розподіл результатів по потокам текучого середовища і інше [3].

Лінії току, джерелом яких є внутрішні "заглушки", показані на рисунку 9. Лінії току зафарбовані в фіксований синій колір при анімації потоку від зовнішнього блоку до внутрішніх, тим самим представляючи рух холодного потоку.



Рис. 9 – Лінії току від зовнішнього блоку до внутрішніх

Лінії току зафарбовані в фіксований червоний колір при анімації потоку від внутрішніх блоків до зовнішнього, тим самим представляючи рух теплого потоку (рис 10).

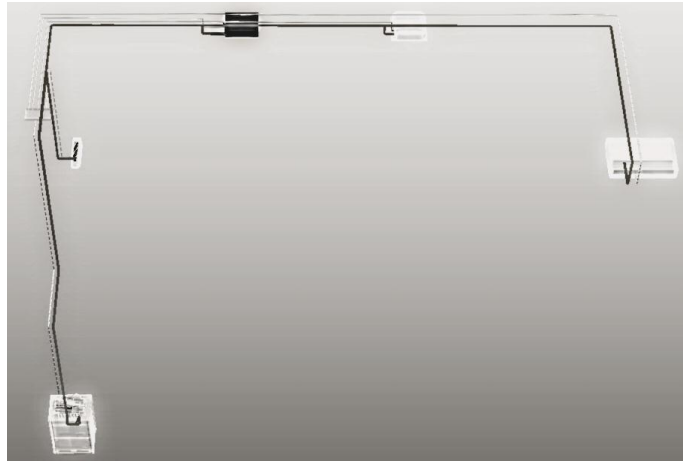


Рис. 10 – Лінії току від внутрішніх блоків до зовнішнього

Лінії току зафарбовані в фіксований зелений колір при анімації потоку від компресора до теплообмінника (рис 11).

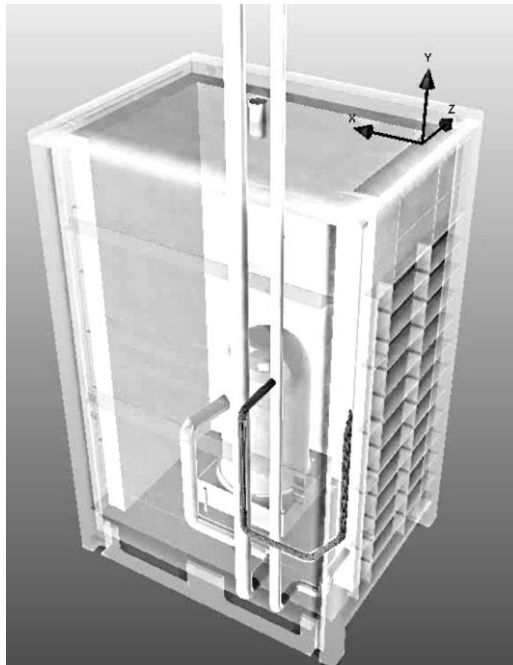


Рис. 11 – Лінії току від компресора до теплообмінника

Висновок

CFD-моделювання пропонує великі можливості аналізу потоку рідин і газу, що дозволяє проектувати на високому професійному рівні нові системи, обладнання або оптимізувати роботу діючих систем.

В роботі розглянуто твердотільне моделювання і збірка елементів, що складають мультізональну систему кондиціонування повітря. Отримано графічне зображення. На основі збірки проведені дослідження рух дослідження потоку рідини у замкнутому контурі. Отримані результати представлені в графічному і анімаційному форматах [4].

Лінії струму несуть змістовну інформацію. З використанням побудованої моделі можна отримати інформацію для оцінювання наявної ситуації і пропонування поліпшень. Певним обмеженням є велика обчислювальна трудомісткість завдання.

Список використаних джерел

- [1] А.А. Алямовский. SolidWorks 2007/2008. Компьютерное моделирование в инженерной практике/А.А. Алямовский, А.А. Собачкин, Е.В. Одинцов, А. И. Харитонович. – СПб.: БХВ-Петербург. 2008. – 1040 с.: ил.
- [2] А. А. Алямовский. SolidWorks Simulation. Как решать практические задачи. – СПб.: БХВ- Петербург.2012. – 448.
- [3] Flow Simulation 2009 Tutorial. [Електронный ресурс]. – Режим доступа https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/29485/mod_resource/content/1/solidworks_flow_simulation_2009_tutorial.pdf.



- [4] S. Zhukovetska/ Air flowing spatial modeling and simulation with SOLIDWORKS CAD. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektoni-ki i Informatyki. Nr 13. POLITECH-NIKA KOSZALIŃ-SKA. – KOSZALIN, 2018. – С. 79-88.

References

- [1] A.A. Alamyovskiy. SolidWorks 2007/2008. Computer modeling in engineering practice / A.A. Alyamovsky, A.A. Sobachkin, E.V. Odintsov, A.I. Kharitonovich. - SPb .: BHV-Petersburg, 2008 .-- 1040 p.: Ill.
- [2] A. A. Alyamovsky. SolidWorks Simulation. How to solve practical problems. - SPb .: BHV- Petersburg, 2012. - 448.
- [3] Flow Simulation 2009 Tutorial. [Electronic resource]. - Access mode https://learn.ztu.edu.ua/pluginfile.php/29485/mod_resource/content/1/solidworks_flow_simulation_2009_tutorial.pdf.
- [4] S. Zhukovetska / Air flowing spatial modeling and simulation with SOLIDWORKS CAD. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektoni-ki i Informatyki. Nr 13. POLITECH-NIKA KOSZALIŃ-SKA. - KOSZALIN, 2018.-- S. 79-88.

УДК 661.666

ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕМПЕРАТУРНИХ ПОЛІВ В ПРОЦЕСІ ФОРМУВАННЯ ВУГЛЕЦЕВИХ ВИРОБІВ В РЕЖИМІ ПРЕСУВАННЯ

Жученко О. А.¹, Хібєба М. Г.²

^{1,2} Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

ORCID: ¹0000-0001-5611-6529, ²0000-0003-0703-4820

E-mail: ¹azhuch@ukr.net, ²hibeba19@gmail.com

Copyright © 2018 by author and the journal “Automation of technological and business - processes.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI:

Анотація.

Було проведено аналіз існуючих досліджень процесу формування вуглецевих виробів. Визначено, що поза увагою авторів залишається дослідження впливу таких технологічних параметрів, як потужність нагрівачів, температура завантаженої маси та швидкості пресування на температурні поля робочого простору мундштука гідравлічного пресу. В даній праці було досліджено зміну температурного поля в залежності від таких технологічних параметрів: потужності індукторів формувальної та калібрувальної зони мундштука, свічок для додаткового нагріву мундштука, температури поверхні масного циліндру та швидкості пресування. Оскільки для отримання бездефектної продукції необхідно, щоб кожен з нагрівачів забезпечував заданий (такий, що забезпечить умови проковзування) розподіл температур в своїй зоні мундштука, то також було досліджено динаміку температур в точках, що характеризують розподіл температур в кінці кожної зони мундштука (переріз наприкінці калібрувальної зони - I переріз, переріз на межі формувальна – калібрувальна зона – II переріз, переріз на межі масний циліндр – формувальна зона – III переріз). В результаті досліджень, проведених за допомогою розробленої моделі виявлено, що найбільший вплив на температури в зонах I-II має індуктор калібрувальної зони. Також індуктор формувальної зони має значний вплив на температурне поле в III та II зонах, а свічки на температури в I та II зоні. При цьому вплив нагрівачів на більш віддалені зони проявляється тільки за 20-30 хв. після зміни потужності нагрівача, що свідчить про появу запізнювання в перехідному процесі. Температура завантаженої маси має досить значний вплив на розподіл температур в усьому об'ємі робочого простору мундштука. Також виявлено, що збільшення швидкості пресування негативно впливає на середню температуру електродної маси, а також збільшує градієнт температур від центральної частини робочого простору мундштука до його меж.

Abstract.

An analysis of existing forming carbon products studies has been carried out. It has been determined that the effect of such technological parameters as heaters power, loaded mass temperature and pressing speed on the hydraulic press mouthpiece working space temperature fields remains out of the authors' attention. In this paper, the variation of the temperature field was



investigated depending on the following technological parameters: mouthpiece molding and calibration zone inductors power, candles for mouthpiece additional heating power, mass cylinder surface temperature and pressing speed. Since, to obtain non-defective products, it is necessary for each heaters to provide a predetermined (such as to provide slip conditions) temperatures distribution in its mouthpiece area, temperatures dynamics at the points characterizing the temperature distribution at the end of each mouthpiece zone (cross section at the end of the calibration zone – I cross section, cross section on the border forming - calibration zone - II cross section, cross section on the border of the mass cylinder - forming zone - III cross section) was also investigated. As results of the researches carried out with the help of the developed model, the calibration zone inducer has the greatest influence on the temperatures in zones I-II. Also, the molding zone inductor has a significant effect on the temperature field in the III and II zones, as well as candles on the temperatures in the I and II zones. In this case, heaters influence on more remote areas is manifested only in 20-30 minutes after changing the heater power, indicating the appearance of a delay in the transition process. The loaded mass temperature has a considerable influence on the temperature distribution throughout the mouthpiece working space volume. It has also been found that increasing the pressing speed negatively affects the average temperature of the electrode mass and also increases the temperature gradient from the mouthpiece working space center to its limits.

Ключові слова: виробництво вуглецевих виробів, формування вуглецевих виробів, гідравлічний прес, електродна маса, екструзія.

Keywords: carbon products production, carbon products formation, hydraulic press, electrode mass, extrusion.

Вступ

Одним з основних технологічних процесів виробництва вуглецевих виробів є формування останніх шляхом продавлювання електродної маси через мундштук відповідної форми у гідравлічному пресі, бо саме на етапі пресування електродних заготовок закладаються в основному всі спадкові властивості, що визначають якість готових виробів [1, 2]. Зокрема, пресування в значній мірі визначає форму заготовки, її довжину, пористість та механічну міцність. Тому задача підвищення ефективності даного процесу є дуже актуальною і в сучасних умовах може бути розв'язана шляхом як розробки комплексу технічних і технологічних заходів з модернізації технології так і створення ефективної системи оптимального керування даним процесом. Важливою науковою задачею, яка постає в даному випадку є дослідження технології на основі розвитку наукових уявлень про даний процес.

Аналіз літературних даних та постановка проблеми

На даний момент існує велика кількість праць, присвячених як процесу екструзії [3-7] так і дослідженню властивостей вуглецевих виробів [8-11], але питання моделювання процесу формування вуглецевих виробів розглядається доволі рідко. Тому доцільним буде аналізувати й моделі процесів, що мають схожі фізико-хімічні основи та конструкційні особливості апаратів.

У працях [3-6] детально розглянуто теоретичні засади екструзії полімерів. Не дивлячись на те, що для опису даних процесів використовуються рівняння руху, нерозривності та енергії, за допомогою яких можна описати й формування вуглецевих заготовок представлені в даних роботах моделі не доцільно використовувати як основу в створенні математичної моделі формування вуглецевих заготовок, адже в них розглядається екструзія саме полімерів (тобто не враховуються особливості вуглецевих матеріалів). До того ж здебільшого розглядається екструзія полімерних матеріалів за допомогою черв'ячних пресів, тоді як формування вуглецевих заготовок відбувається видавлюванням електродної маси через мундштук за допомогою плунжера.

Процес формування через мундштук розглянуто в роботі [7]. В ній на базі класичних рівнянь ізотермічної напірної течії двох реологічно різних в'язкопластичних середовищ, що не змішуються в циліндричному каналі та підкорюються закону Оствальда-де-Віля, синтезована модель течії двох таких середовищ в формувальному каналі екструдера при коекструзії. Не дивлячись на те, що розглядається процес формування через мундштук використання даної моделі в якості основи для моделювання процесу формування вуглецевих виробів має ряд недоліків. По-перше, дана модель розглядає екструзію жировітамінної начинки та екструдата, отриманого на основі зернових, тобто проблема з врахування особливостей вуглецевих матеріалів не зникає. По-друге, на відміну від процесу формування вуглецевих виробів в даному процесі має місце коекструзія різних середовищ.

В роботі [8] розглядається модель руху не ньютонівських в'язкопластичних рідин, до яких відноситься електродна маса (матеріал, з якого формують вуглецеві заготовки). В даній роботі було розглянуто турбулентний потік ступеневої рідини та рідин Бінгама та Гершеля-Балклі, запропоновано використання моделі осередненої ефективної молекулярної в'язкості для ступеневої рідини в області розвиненої турбулентності. Недоліком такої моделі в плані використання її для моделювання формування вуглецевих виробів є припущення про турбулентність потоку, адже пресування проходить досить повільно (швидкість плунжера 0,3-0,5 м/хв.).

Порівнянню реологічних моделей не ньютонівських речовин присвячена робота [9], в якій порівнюється моделі тертя Воелмі та в'язкопластичних речовин Бінгама. Дані окремо взяті моделі можуть використовуватись в моделюванні процесу формування для опису реологічних властивостей електродної маси, але самі по собі вони не описують рух потоку та розподіл енергії, тому мають бути доповнені.



В роботі [10] обґрунтовано необхідність врахування ефекту пристінного ковзання для випадку екструзії високов'язких матеріалів. Даний ефект має бути врахований при моделюванні процесу формування, оскільки електродна маса є в'язкопластичною рідиною з доволі високою в'язкістю.

Автори [11] розробили дослідну установку, що дає змогу проводити вимірювання ефективної динамічної в'язкості композитних матеріалів на основі пеку та термообробленої вуглецевої сировини та визначили температурні залежності динамічної в'язкості різних за складом вуглецевих композицій, що можуть бути використано при моделюванні процесу формування.

В одній з небагатьох праць, присвячених питанню моделюванню процесу формування саме вуглецевих виробів представлено модель екструзії в'язко-пластичної вуглецевої маси [12], адекватність якої була доведена в цій же роботі, а похибка не перевищувала 4-6%. Оскільки серед всіх розглянутих моделей дана модель єдина доволі точно описує саме процес формування вуглецевих виробів доцільним є її використання в подальших дослідженнях.

Поза увагою авторів наведених вище робіт залишається дослідження впливу таких технологічних параметрів, як потужність нагрівачів, температура завантаженої маси та швидкості пресування на температурні поля робочого простору мундштука гідравлічного пресу, хоча для синтезу системи керування даним процесом таке дослідження є досить актуальним.

Мета і завдання дослідження

Метою цього дослідження є дослідження впливу таких технологічних параметрів, як потужність нагрівачів, температура завантаженої маси та швидкості пресування на температурні поля за допомогою числової моделі процесу, створеної на основі математичної моделі [12].

Методи та матеріали досліджень

В даній праці було досліджено зміну температурного поля в залежності від таких технологічних параметрів: потужності індукторів формувальної та калібрувальної зони мундштука, свічок для додаткового нагріву мундштука, температури поверхні масного циліндра та швидкості пресування. Послідовність технологічних режимів та тривалість моделювання при даних режимах наведено в таблиці 1. При моделюванні зроблено наступне допущення: для дослідження динаміки об'єкту при власне пресуванні вважається можливим безперервне формування виробів, хоча насправді тривалість пресування завжди скінченна і визначається завантаженням пресу. Таке припущення зроблено тому, що перехідні процеси в мундштуці та електродній масі мають досить значну інерційність і для того, щоб дослідити їх необхідно проводити моделювання доволі значного проміжку часу, що перевищує час справжнього пресування.

Таблиця 1 – Технологічні режими, що використовувались в дослідженні

№ п/п	Швидкість пресування, м/с	Потужність індуктора формувальної зони, Вт	Потужність індуктора калібрувальної зони, Вт	Потужність свічок для додаткового нагріву кутів калібрувальної зони, Вт	Температура поверхні масного циліндра, °С	Тривалість моделювання, хв
1	(режим пресування) 0.00033	0	0	0	100	100
2	0.00033	15000	15000	2000	100	100
3	0.00033	15000	15000	4000	100	100
4	0.00033	15000	30000	4000	100	100
5	0.00033	30000	30000	4000	100	100
6	0.00033	0	0	0	110	100
7	0.00033	15000	15000	2000	110	100
8	0.00033	15000	15000	4000	110	100
9	0.00033	15000	30000	4000	110	100
10	0.00033	30000	30000	4000	110	100
11	0.00053	0	0	0	100	100
12	0.00053	15000	15000	2000	100	100
13	0.00053	15000	15000	4000	100	100
14	0.00053	15000	30000	4000	100	100
15	0.00053	30000	30000	4000	100	100



Оскільки для отримання бездефектної продукції необхідно, щоб кожен з нагрівачів забезпечував заданий (такий, що забезпечить умови проковзування) розподіл температур в своїй зоні мундштука, то доцільним буде дослідити також динаміку температур в точках, що характеризують розподіл температур в кінці кожної зони (переріз наприкінці калібрувальної зони - I переріз, переріз на межі формувальна – калібрувальна зона – II переріз, переріз на межі масний циліндр – формувальна зона – III переріз). Положення даних точок зображено на рис.1,2.

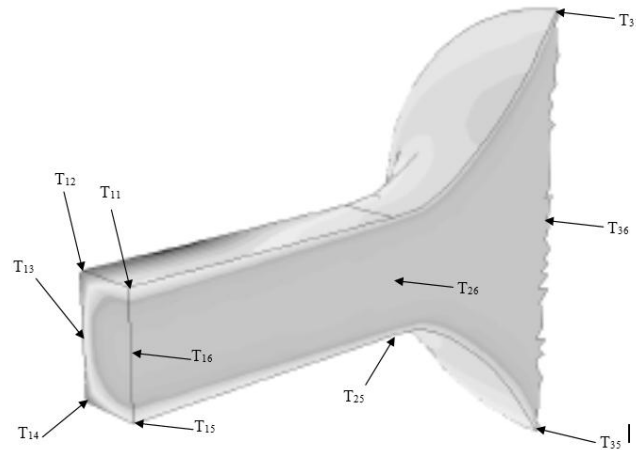


Рис. 1 – Точки, що характеризують розподіл температур в кінці калібрувальної, формувальної зон мундштука та масного циліндра

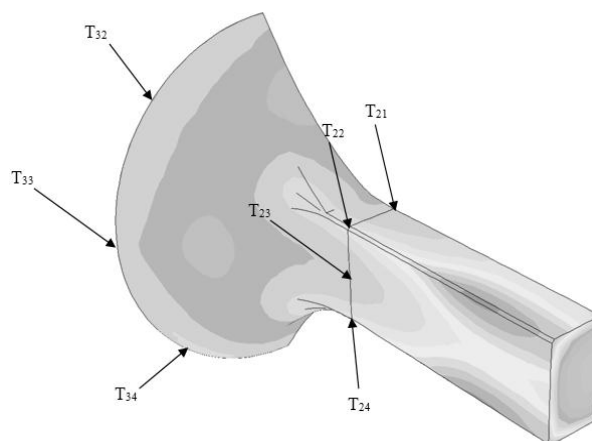


Рис. 2 – Точки, що характеризують розподіл температур в кінці калібрувальної, формувальної зон мундштука та масного циліндра

Результати досліджень та їх обговорення

Температурне поле в режимі пресування зі швидкістю 0,00033 м/с за температури масного циліндру 100 °С

В даному пункті було досліджено температурні поля при моделюванні режимів 1-5 (табл.1.).

З початком роботи режиму пресування в умовах відсутності нагріву мундштука (режим №1) відбувається інтенсивне охолодження мундштука й електродної маси. Область мундштука біля індуктора формувальної зони охолоджується нижче температури електродної маси, що пояснюється теплообміном з навколишнім середовищем. Наприкінці режиму №1 температура в усьому об'ємі електродної маси в значній мірі усереднюється та становить 95 – 115 °С. Температура в I перерізі перші 15 хв. різко зростає, що спричинено переміщенням більш гарячої електродної маси, що знаходиться між I та II перерізом до I перерізу. Надалі температура в I перерізі починає зменшуватись зі швидкістю в середньому 0,12 °С/хв.. Температура ж в II перерізі поступово спадає на 17-18 °С за 100 хв., а в III перерізі на 11-12 °С за 100 хв.

В результаті вмикання всіх нагрівачів значно зростає температура в зоні біля калібрувального нагрівача. Температура в перерізі I починає зростати. Приріст температури склав 3 - 7°С. Швидкість зростання температури в точках T₁₂, T₁₄ поступово зменшується (рис.4. (а)), що свідчить про малу інерційність. Після перших 25-30 хв. нагріву



температура в перерізі II починає зростати зі швидкістю $0,02 - 0,04$ °C/хв. В перерізі III температура також починає зростати ($4,5 - 6,5$ °C за 100 хв.), при цьому швидкість зростання поступово зменшується, що свідчить про малу інерційність (рис.4. (в)).

При подальшому моделюванні зі збільшеною потужністю свічок для додаткового нагріву кутів калібрувальної зони (режим №3) було виявлено значне зростання температури лише в області, що знаходиться безпосередньо близько до свічок. Найбільше зросла температура в I перерізі ($6 - 13$ °C за 100 хв.) (рис.4. (а)). Швидкість нагріву в II перерізі зменшується до $0,017 - 0,03$ °C/хв. (рис.4. (б)). При детальному аналізі результатів було виявлено, що зменшення швидкості спричинено виходом перехідної характеристики на усталений рівень, тому можна стверджувати, що збільшення потужності свічок не впливає на температуру в II перерізі. Температура ж в III перерізі зростає на $1 - 1,5$ °C за 100 хв. Така зміна спричинена поступовим виходом перехідної характеристики на новий рівень і свідчить про незалежність температури в III перерізі від потужності свічок (рис.4 (в)).

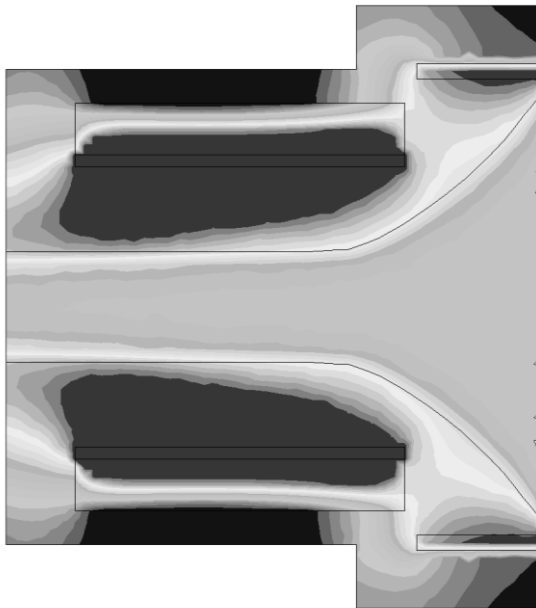
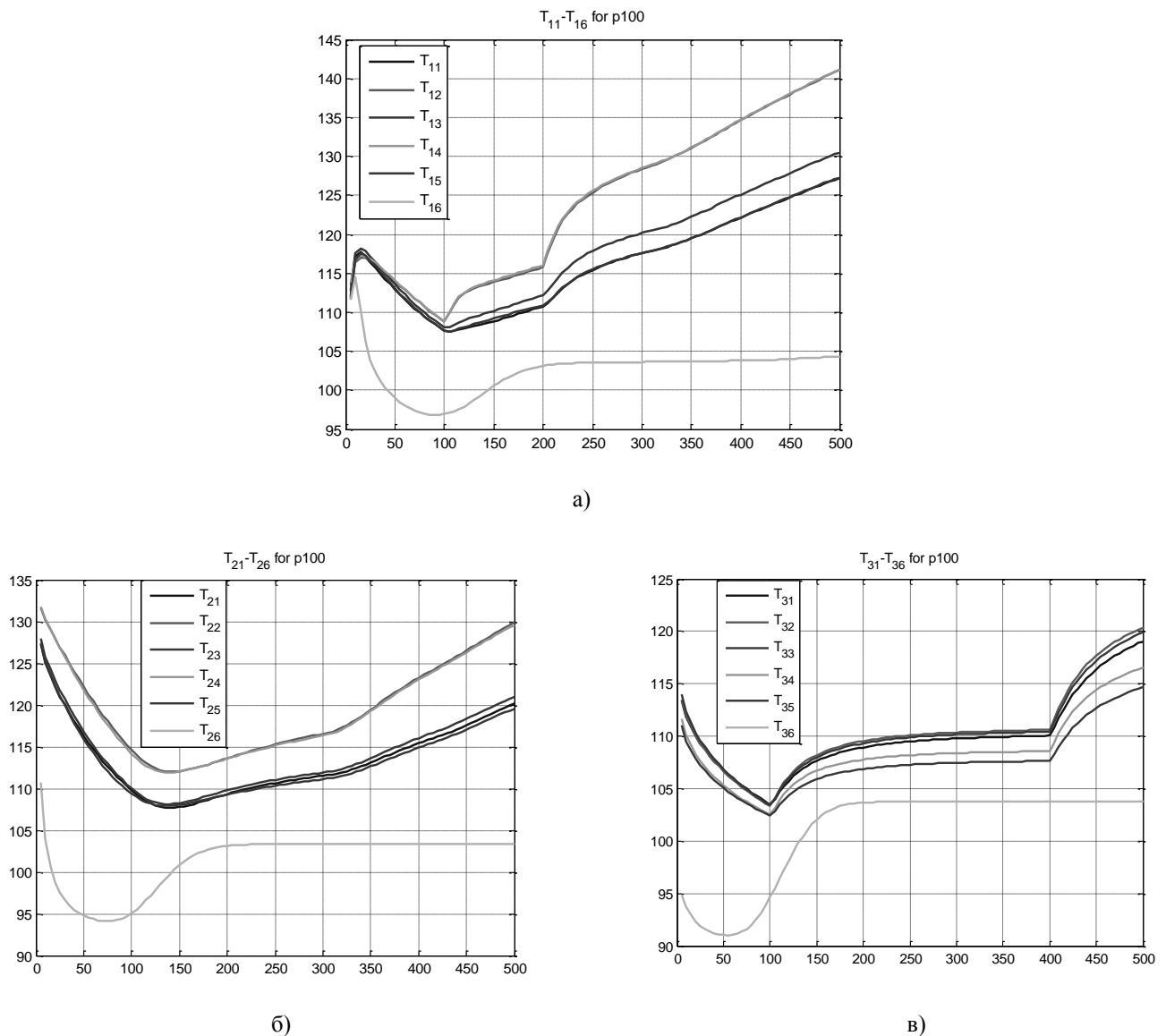


Рис. 3 – Температурне поле наприкінці технологічного режиму №5

Збільшення потужності індуктора калібрувальної зони (режим №4) призвело до значного збільшення температури мундштука біля індуктора калібрувальної зони. В перерізі I швидкість зростання температури збільшується після перших 25 хв. моделювання і складає $0,07 - 0,075$ °C/хв. Така зміна свідчить про наявність зв'язку між потужністю індуктора калібрувальної зони і температурою в перерізі I (рис.4. (а)) та про наявність транспортного запізнювання. Швидкість зміни температури в II перерізі перші 25-30 хв. не змінюється в порівнянні з попереднім режимом, але потім зростає до $0,05 - 0,08$ °C/хв. (рис.4. (б)). В III перерізі температура зростає на $0,5$ °C, аналіз отриманих результатів показав незалежність температури в III перерізі від потужності індуктора калібрувальної зони.

Моделювання зі збільшеною потужністю індуктора формувальної зони виявило (режим №5) значне зростання температури зони мундштука між індукторами формувальної та калібрувальної зони та електродної маси, що знаходиться близько до поверхні формувальної зони мундштука (рис. 3). Приріст температури в I перерізі зменшується до $5 - 7$ °C за 100 хв. (рис. 4 (а)), характер зміни температури в даному перерізі дає змогу зробити висновок про незалежність температури в I перерізі від потужності індуктора формувальної зони. Після перших 20 хв. моделювання швидкість зміни температури в II перерізі незначно збільшується з $0,03 - 0,05$ °C/хв. до $0,05 - 0,06$ °C/хв., що може свідчити про появу впливу потужності індуктора формувальної зони на температуру в цьому перерізі. Це означає, що зміна швидкості пресування впливає також на зв'язок між температурою в II перерізі та потужністю індуктора формувальної зони. Найбільше зросла температура в III перерізі ($7,5 - 10$ °C за 100 хв.) (рис.4. (в)). При цьому динаміка температури свідчить про досить швидку реакцію температури в цьому перерізі на зміну саме потужності індуктора формувальної зони.



(а) – I переріз, (б) – II переріз, (в) – III переріз

Рис. 4 – Динаміка температури в контрольних точках

Температурне поле в режимі пресування зі швидкістю 0,00033 м/с за температури масного циліндру 110 °С
Дане дослідження включає в себе аналіз результатів моделювання режимів №6 – 10 (табл.1.).

Зі збільшенням температури масного циліндру в умовах відсутності нагріву мундштука (режим №6) відбувається інтенсивне охолодження мундштука й електродної маси. Область мундштука біля індуктора формувальної зони так само як і в п.3.4 охолоджується нижче температури електродної маси.

На відміну від режиму підготовки в режимі пресування зміна температури масного циліндру впливає на динаміку температури не лише в формувальній зоні мундштука, а й в усьому його об'ємі.

Наприкінці режиму №6 температура в усьому об'ємі електродної маси в значній мірі усереднюється та становить 95 – 115 °С. Температура в I перерізі знову росте перших 15 хв., після чого починає різко спадати зі швидкістю 0,12 °С / хв., що відповідає швидкості в режимі №1.

Температура ж в II перерізі поступово спадає на 17-18 °С за 100 хв., а в III перерізі на 6-7 °С за 100 хв., що на 5 °С менше ніж в режимі №1. Таким чином для режиму №6 справедливим є твердження лише про наявність значного впливу зміни температури масного циліндру на температури в III перерізі та формувальній зоні мундштука. Відсутність значного впливу на весь інший об'єм пояснюється великою інерційністю реакції на зміну температури масного циліндру, що є наслідком геометричних особливостей мундштука. Так чи інакше при моделюванні наступних режимів наявність впливу зміни температури масного циліндру на температурні поля в усьому об'ємі мундштука стає очевидною.



Температура в точках T_{16} , T_{26} , T_{36} зростає до 104 – 105 °С (рис.6), тоді, як в попередньому дослідженні температура в даних точках встановлюється на рівні 103,5 – 104,5 °С, що, очевидно є наслідком теплообміну з більш нагрітими шарами електродної маси.

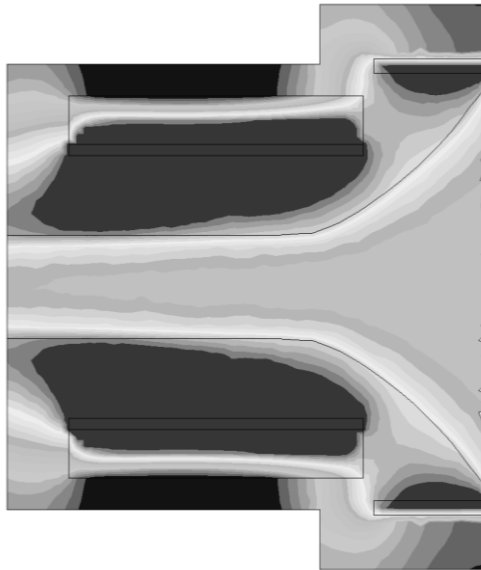


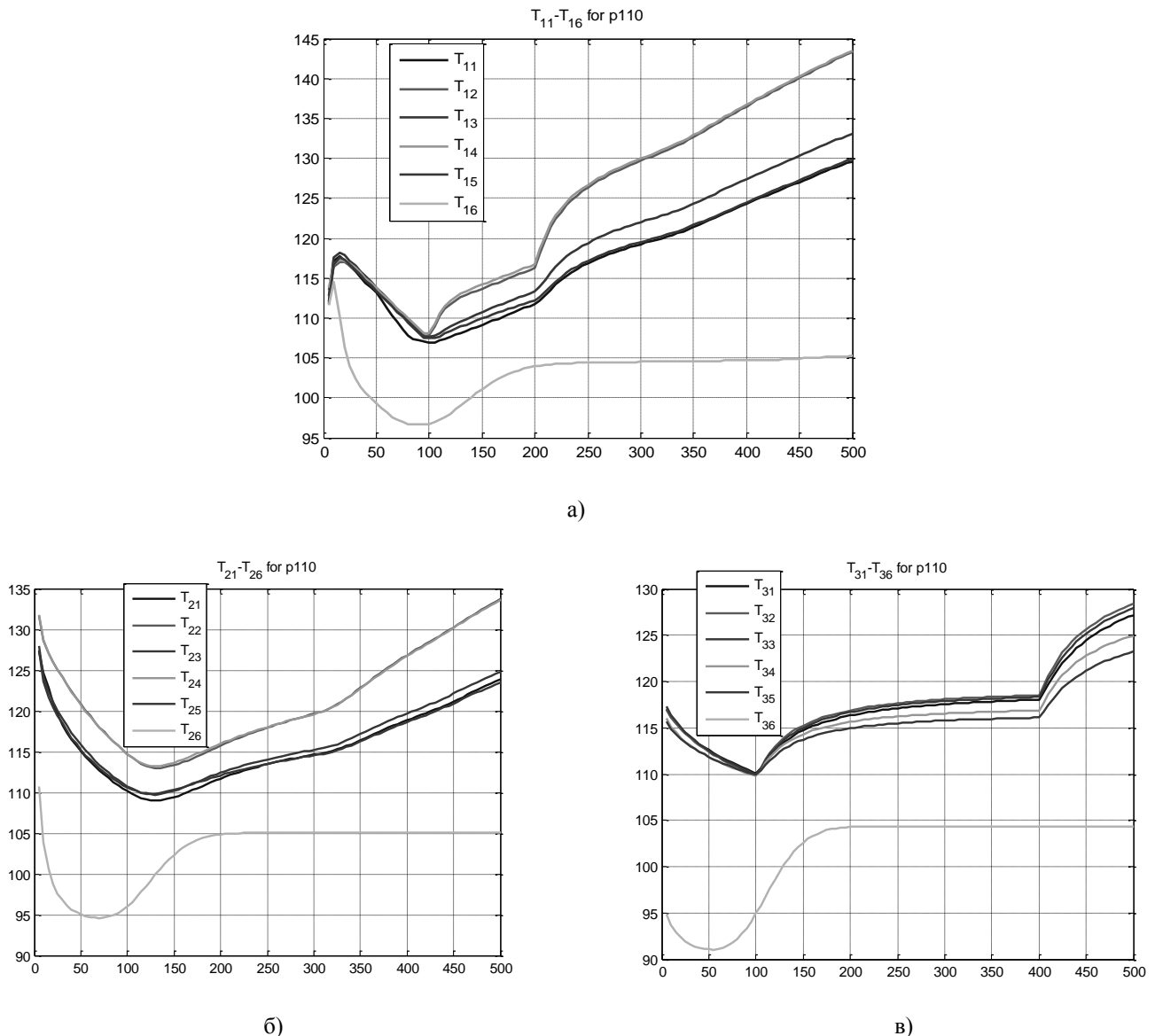
Рис. 5 – Температурне поле наприкінці технологічного режиму №10

В результаті вмикання всіх нагрівачів (режим №7) значно зростає температура в зоні біля калібрувального нагрівача, мундштука та електродної маси біля індуктора формувальної зони. Температура в перерізі I починає зростати. Приріст температури склав 4,5 – 8,5 °С за 100 хв., що вище на 1,5 °С в порівнянні з режимом №2. Швидкість зростання температури в точках T_{12} , T_{14} поступово зменшується, що свідчить про малу інерційність. Після перших 25-30 хв. нагріву температура в перерізі II починає зростати з швидкістю 0,03 – 0,05 °С/хв. що вище на 0,01 °С/хв. в порівнянні з режимом №2. В перерізі III температура також починає зростати (5 – 7°С за 100 хв., що також вище на 0,5 °С в порівнянні з режимом №2), при цьому швидкість зростання поступово зменшується, що свідчить про малу інерційність (рис.6. (в)).

При подальшому моделюванні зі збільшеною потужністю свічок для додаткового нагріву кутів калібрувальної зони (режим №8) найбільше зростання температури виявлено в області, що знаходиться безпосередньо близько до свічок. Температура в I перерізі зросла на 8 – 13 °С за 100 хв. (рис.6. (а)). В точках T_{11} , T_{13} , T_{15} приріст температури збільшився в порівнянні з режимом №3 на 1,5 °С. Швидкість нагріву в II перерізі зменшується до 0,027 – 0,04°С/хв. (рис.6. (б)), що знову таки більше ніж в режимі №13 на 0,01 °С/хв. Температура ж в III перерізі зростає на 1 – 1,5°С за 100 хв.

Збільшення потужності індуктора калібрувальної зони (режим №9) призвело до значного збільшення температури мундштука біля індуктора калібрувальної зони. В перерізі I швидкість приросту збільшується після перших 25 хв. моделювання і складає 0,06 – 0,08 °С/хв. (рис.6. (а)), що більше за швидкість в режимі №4 на 0,005 °С/хв. Швидкість зміни температури в II перерізі перші 25-30 хв. не змінюється в порівнянні з попереднім режимом, але потім зростає до 0,06 – 0,09°С/хв. (рис.6. (б)), що на 0,01 °С/хв. більше ніж швидкість в режимі №14. В III перерізі температура зростає на 0,5°С, що підтверджує незалежність температури в III перерізі від потужності індуктора калібрувальної зони.

Аналіз результатів моделювання зі збільшеною потужністю індуктора формувальної зони (режим №10) виявив значне зростання температури зони мундштука між індукторами формувальної та калібрувальної зони та електродної маси, що знаходиться близько до поверхні формувальної зони мундштука (рис.5.). Приріст температури в I перерізі зменшується до 5– 7°С за 100 хв. (рис.6. (а)). Швидкість зміни температури в II перерізі зменшується до 0,05 – 0,08 °С/хв., що на 0,01 – 0,02 °С/хв. більше ніж в режимі №5. Найбільше зросла температура в III перерізі (8 – 10°С за 100 хв.) (рис.6. (в)).



(a) – I переріз, (б) – II переріз, (в) – III переріз

Рис. 6 – Динаміка температури в контрольних точках

Загалом, наприкінці даного дослідження різниця з результатами попереднього дослідження склала 0,6 – 9,3 °С, що свідчить про значний вплив температури масного циліндра на температурні поля мундштука в режимі пресування.

Температурне поле в режимі пресування зі швидкістю 0,00053 м/с за температури масного циліндру 100 °С
Дане дослідження включає в себе аналіз результатів моделювання режимів №11 – 15 (табл.1.).

Зі збільшенням швидкості пресування в умовах відсутності нагріву мундштука (режим №11) відбувається інтенсивне охолодження мундштука й електродної маси. В порівнянні з дослідженням режиму пресування зі швидкістю 0,00033 м/с в даному дослідженні температури в об'ємі електродної маси більші, в той час, як температури в об'ємі самого мундштука менші (рис.7, 8). Це пояснюється тим, що збільшення швидкості пресування спричинює ріст інтенсивності теплообміну між більш нагрітою поверхнею мундштука та менш нагрітим об'ємом електродної маси. Наприкінці режиму №11 температура в усьому об'ємі електродної маси в значній мірі усереднюється та становить 95 – 116 °С. Температура в I перерізі знову росте перших 15 хв., після чого починає різко спадати зі швидкістю 0,08 °С/хв., що на 0,04 менше ніж в режимі №1. Це знову таки пояснюється інтенсивнішим теплообміном з поверхнею мундштука. Температура ж в II перерізі поступово спадає на 16-17,5 °С за 100 хв., а в III перерізі на 6-7 °С за 100 хв., що на 1 °С та 5 °С відповідно менше ніж в режимі №11. Таким чином для режиму №11 справедливим є твердження про наявність значного впливу зміни швидкості пресування на температури в усьому об'ємі мундштука та



електродної маси, що також дає змогу зробити висновки про доволі швидку реакцію на зміну швидкості пресування. Температура в точках T_{16} , T_{26} , T_{36} зростає до $104 - 107$ °С, тоді, як в дослідженні температура в даних точках встановлюється на рівні $103,5 - 104,5$ °С.

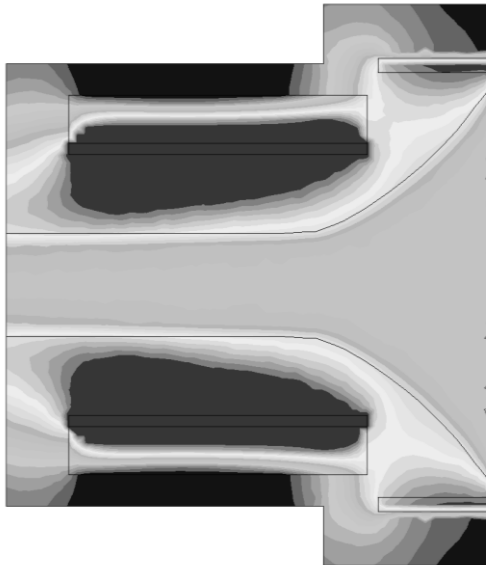


Рис. 7 – Температурне поле наприкінці технологічного режиму №15

В результаті вмикання всіх нагрівачів (режим №12) значно зростає температура в зоні біля калібрувального нагрівача, мундштука та електродної маси біля індуктора формувальної зони. Температура в перерізі I починає зростати. Приріст температури склав $4 - 8$ °С за 100 хв., що вище на 1 °С в порівнянні з режимом №2. Швидкість зростання температури в точках T_{12} , T_{14} поступово зменшується (рис.8. (а)), що свідчить про малу інерційність. Після перших 25-30 хв. нагріву температура в перерізі II починає зростати з швидкістю $0,05 - 0,06$ °С/хв. що вище на $0,01 - 0,02$ °С/хв. в порівнянні з режимом №2. В перерізі III температура також починає зростати ($5,5 - 7,5$ °С за 100 хв., що також вище на 1 °С в порівнянні з режимом №12) (рис.8. (в)).

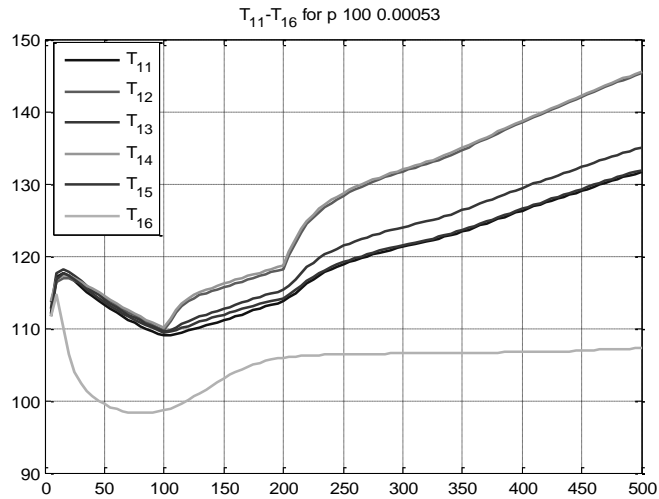
При подальшому моделюванні зі збільшеною потужністю свічок для додаткового нагріву кутів калібрувальної зони (режим №13) найбільше зростання температури виявлено в області, що знаходиться безпосередньо близько до свічок. Температура в I перерізі зросла на $9 - 14$ °С за 100 хв. (рис.8. (а)), що більше в порівнянні з режимом №3 на 2 °С. Швидкість нагріву в II перерізі зменшується до $0,033 - 0,043$ °С/хв. (рис.8. (б)), що знову таки більше ніж в режимі №3 на $0,016$ °С/хв. Температура ж в III перерізі зростає на $1 - 1,5$ °С за 100 хв.

Збільшення потужності індуктора калібрувальної зони (режим №14) призвело до значного збільшення температури мундштука біля індуктора калібрувальної зони. В перерізі I швидкість приросту збільшується після перших 25 хв. моделювання і складає $0,07 - 0,09$ °С/хв. (рис.8. (а)), що більше за швидкість в режимі №4 на $0,0015$ °С/хв. Швидкість зміни температури в II перерізі перші 25-30 хв. не змінюється в порівнянні з попереднім режимом, але потім зростає до $0,06 - 0,09$ °С/хв. (рис.8. (б)), що на $0,01$ °С/хв. більше ніж швидкість в режимі №14. В III перерізі температура зростає на $0,5$ °С, що підтверджує незалежність температури в III перерізі від потужності індуктора калібрувальної зони.

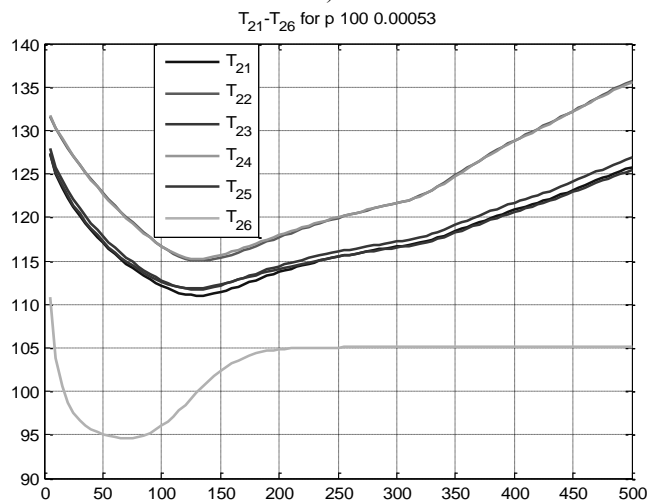
Моделювання зі збільшеною потужністю індуктора формувальної зони (режим №15) виявило значне зростання температури зони мундштука між індукторами формувальної та калібрувальної зони та електродної маси, що знаходиться близько до поверхні формувальної зони мундштука (рис.7.). Приріст температури в I перерізі зменшується до $5 - 7$ °С за 100 хв. (рис.8. (а)). Швидкість зміни температури в II перерізі зменшується до $0,05 - 0,08$ °С/хв., що на $0,01 - 0,02$ °С/хв. більше ніж в режимі №5. Найбільше зросла температура в III перерізі ($8 - 10$ °С за 100 хв.) (рис.8. (в)).

Загалом, наприкінці даного дослідження різниця з результатами дослідження склала $1,9 - 8,1$ °С, що свідчить про значний вплив швидкості пресування на температурні поля мундштука в режимі пресування.

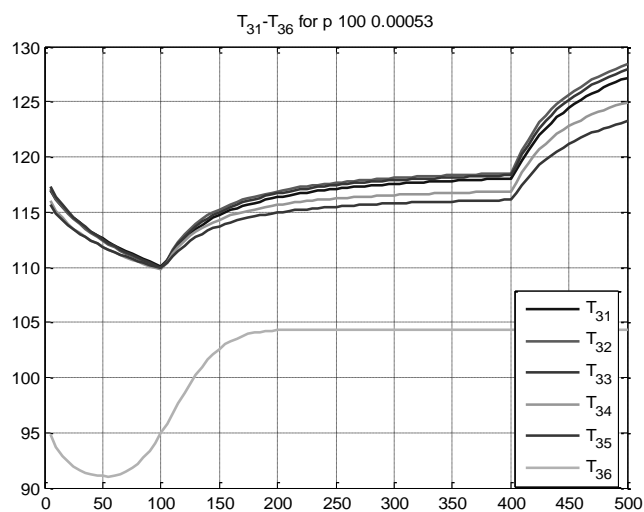
Варто також зазначити, що збільшення швидкості пресування призвело до збільшення градієнту температур в електродній масі, що має бути враховано при розробці систем керування.



а)



б)



в)

(а) – I переріз, (б) – II переріз, (в) – III переріз

Рис. 6 – Динаміка температури в контрольних точках



Висновки

Підвищення ефективності процесу формування вуглецевих виробів тісно пов'язане з розвитком наукових уявлень про процеси, що протікають в мундштуці та дослідженнями даного процесу за допомогою математичних моделей.

Аналіз існуючих досліджень процесу показав відсутність дослідження впливу технологічних параметрів на температурні поля мундштука гідравлічного пресу. Тому, для проведення даного дослідження, на основі математичної моделі [12] було розроблено числову модель процесу.

В результаті досліджень, проведених за допомогою розробленої моделі виявлено, що найбільший вплив на температури в зонах I-II має індуктор калібрувальної зони. Також індуктор формувальної зони має значний вплив на температурне поле в III та II зонах, а свічки на температури в I та II зоні. При цьому вплив нагрівачів на більш віддалені зони проявляється тільки за 20-30 хв. після зміни потужності нагрівача, що свідчить про появу запізнювання в перехідному процесі.

Температура завантаженої маси має досить значний вплив на розподіл температур в усьому об'ємі робочого простору мундштука. Також виявлено, що збільшення швидкості пресування негативно впливає на середню температуру електродної маси, а також збільшує градієнт температур від центральної частини робочого простору мундштука до його меж.

Отримані результати можуть бути використані для розробки більш ефективних регламентів виробництва та можуть бути враховані при розробці нових систем керування даним процесом.

Список використаних джерел

- [1] Чалых А.Ф., Соседов В.П. Графитация углеродистых материалов. М.: Metallurgiya, 1987. 176 с.
- [2] Санников А. К., Сомов А. Б., Ключников В. В. Производство электродной продукции. М.: Metallurgiya, 1985. 129 с.
- [3] Раувендаль К. Экструзия полимеров. СПб.: Профессия, 2006. 768 с.
- [4] Торнер Р. В. Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1977. 464 с.
- [5] Tadmor Z. Principles of Polymer Processing. N.-Y.: Wiley-Interscience, 2006. 961 p.
- [6] Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 180 с.
- [7] Василенко В.Н., Остриков А.Н., Ряжских В.И. Математическая модель течения двух вязкопластичных сред в формирующем канале экструдера при коэкструзии. Вестник ВГУИТ. 2012. № 2. С. 64 – 67.
- [8] Гаврилов, А.А. Математическая модель и численная методика моделирования развитого турбулентного течения неньютоновских вязкопластических жидкостей / Гаврилов А.А., Минаков А.В., Дектерев А.А., Рудяк В.Я. // Тезисы докладов международной конференции «Современные проблемы прикладной математики и механики: теория, эксперимент и практика», посвященная 90-летию со дня рождения академика Н.Н. Яненко. — 2011. — С. 85– 86
- [9] Chalk, C, Borman, D, Sleight, PA et al. (3 more authors) (Accepted: 2017) A numerical comparison of a frictional and viscoplastic debris flow model. In: to be confirmed. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 17-22 Sep 2017, Seoul, South Korea.
- [10] Сівецький В.І., Сокольський О.Л., Бурла Ю.В. Дослідження процесу екструзійного формування полімерів з урахуванням ефекту пристінного ковзання. Вісник НТУУ «КПІ». Хімічна інженерія, екологія та ресурсозбереження. 2009. №1. С. 17-21.
- [11] Карвацький А. Я. Реологічні властивості вуглецевих композицій в діапазоні температури 120-170 °С / А. Я. Карвацький, Т. В. Лазарев, Д. Г. Швачко, О. С. Тищенко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія : Нові рішення в сучасних технологіях. - 2016. - № 18. - С. 74-79.
- [12] Лазарев Т. В. Математическая модель процесса экструзии вязко-пластичной углеродной массы / Т. В. Лазарев, А. Я. Карвацкий, С. В. Лелека, А. Ю. Педченко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Серія : Нові рішення в сучасних технологіях. - 2016. - № 12. - С. 31-37.

References

- [1] Chalyh A.F., Sosodov V.P. *Grafitacija uglerodistyh materialov*. Moscow, Metallurgija Publ., 1987. 176 p.
- [2] Sannikov A. K., Somov A.B, Kliuchnikov V.V. *Proizvodstvo elektrodnoi produktsii*. Moscow, Metallurgija Publ., 1985. 129 p.
- [3] Rauvendal K. *Ekstruziya polimerov*. SPb.: Professiya Publ., 2006. 768 p.
- [4] Torner R. V. *Teoreticheskie osnovyi pererabotki polimerov*. M.: Himiya Publ., 1977. 464 p.
- [5] Tadmor Z. *Principles of Polymer Processing*. N.-Y.: Wiley-Interscience, 2006. 961 p.
- [6] Galyigin V.E., Baronin G.S., Tarov V.P., Zavrazhin D.O. *Sovremennyye tehnologii polucheniya i pererabotki polimernykh i kompozitsionnykh materialov: uchebnoe posobie*. Tambov: FGBOU VPO «TGTU» Publ., 2012. 180 p.
- [7] Vasilenko V.N., Ostrikov A.N., Ryazhskih V.I. *Matematicheskaya model techeniya dvuh vyazkoplastichnykh sred v formuyuschem kanale ekstrudera pri koekstruzii*. Vestnik VGUIT. 2012. # 2. P. 64 – 67.
- [8] Gavrilov, A.A. *Matematicheskaya model i chislennaya metodika modelirovaniya razvitogo turbulentsnogo techeniya nenyutonovskikh vyazkoplasticheskikh zhidkostey* / Gavrilov A.A., Minakov A.V., Dekterev A.A., Rudyak V.Ya. // Tezisy



dokladov mezhdunarodnoy konferentsii «Sovremennyye problemyi prikladnoy matematiki i mehaniki: teoriya, eksperiment i praktika», posvyaschennaya 90-letiyu so dnya rozhdeniya akademika N.N. Yanenko. — 2011. — P. 85–86

- [9] Chalk, C, Borman, D, Sleigh, PA et al. (3 more authors) (Accepted: 2017) *A numerical comparison of a frictional and viscoplastic debris flow model*. In: to be confirmed. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, 17-22 Sep 2017, Seoul, South Korea
- [10] Sivetskiy V.I., Sokolskiy O.L., Burla Yu.V. *Doslidzhennya protsesu ekstruzijnogo formuvannya polimeriv z urahuvannyam efektu pristinnogo kovzannya*. Visnik NTUU “KPI”. Himichna Inzheneriya, ekologiya ta resursozberezhennya. 2009. #1. P. 17-21.
- [11] Karvatskiy A. Ya. *Reologichni vlastivosti vugletsevih kompozitsiy v diapazoni temperaturi 120-170 °C* / A. Ya. Karvatskiy, T. V. Lazarev, D. G. Shvachko, O. S. Tischenko // Visnik Natsionalnogo tehničnogo unіversitetu "Harkivskiy politehničnii Institut". Seriya : Novi rishennya v suchasni tehnologiyah. - 2016. - # 18. - p. 74-79.
- [12] Lazarev T. V. *Matematicheskaia model' protsesa ekstruzii viazko-plastichnoi uglevodnoi massy* / T. V. Lazarev, A. Ia. Karvatskii, S. V. Leleka, A. Iu. Pedchenko // Visnik Natsional'nogo tehničnogo universitetu "Kharkivskii politehničnii institut". Seriya : Novi rishennia v suchasni tehnologiyakh. - 2016. - № 12. - P. 31-37.

УДК 681.516.77

МОДЕЛИРОВАНИЕ БАЛАНСИРОВКИ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ ПРИ УСЛОВИИ СОДЕРЖАНИЯ В НЕЙ ЗНАЧИТЕЛЬНОЙ ДОЛИ НЕДИСПЕТЧЕРИЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ ЭНЕРГИИ

Максимов М. М.¹, Давидов В. О.²

^{1,2} Одесский национальный политехнический университет, Одесса

ORCID: ¹0000-0002-5626-5265, ²0000-0003-3099-7596

Email: ¹maximov.agro@gmail.com, ²davydov@opu.ua

Copyright © 2018 by author and the journal “Automation of technological and business - processes.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI:

Аннотация.

Повышение доли недиспетчеризуемых возобновляемых источников энергии в единых энергосистемах влечет за собой проблему балансировки энергосистемы. Как правило, затраты на поддержание баланса между произведенной и потребленной энергией сторонники «зеленой» энергии перекладывают на плечи энергосистемы и не учитывают при подсчете экономического эффекта от возобновляемых источников.

Цель данной работы, провести имитационное моделирование процесса балансировки энергосистемы с большой долей недиспетчеризуемых возобновляемых источников.

В работе проведен анализ пусковых режимов различных типов энергоустановок. Смоделирована энергосистема с различным соотношением диспетчеризуемых энергоустановок. Проведена оценка различных сценариев развития событий при появлении дефицита генерируемой энергии в размере 25%, 50% и 75% от установленной мощности недиспетчеризуемых источников энергии. Показано, что традиционный метод компенсации возмущений за счет вращающегося резерва при увеличении доли возобновляемых источников не может полностью компенсировать эти возмущения, что на практике приведет к отключению от энергосети части потребителей.

Повышение доли недиспетчеризуемых возобновляемых источников в единой энергетической системе ведет к уменьшению доли обычных энергоустановок, которые потенциально могут поддерживать баланс.

Нормализовать работу энергосистемы можно путем дублирования мощности недиспетчеризуемых источников эквивалентной мощностью источников с малым временем пуска, например, дизель-генераторами. Такой подход



позволяет полностью компенсировать все возмущения в системе, но его стоимость должна учитываться при анализе экономической эффективности возобновляемых источников.

Abstract.

An increase in the share of non-dispensable renewable energy sources in unified energy systems entails the problem of balancing the energy system. As a rule, the supporters of "green" energy shift the costs of maintaining the balance between the energy produced and consumed to the shoulders of the energy system and do not take into account when calculating the economic effect of renewable sources.

The purpose of this work is to conduct a simulation of the process of balancing the power system with a large share of non-dispensable renewable sources.

The paper analyzes the starting conditions of various types of power plants. A power system with a different ratio of dispensable power plants is simulated. Various scenarios for the development of events with the occurrence of a deficit of generated energy in the amount of 25%, 50% and 75% of the installed capacity of non-dispensable energy sources were evaluated. It is shown that the traditional method of compensating for disturbances due to a rotating reserve with an increase in the share of renewable sources cannot fully compensate for these disturbances, which in practice will lead to disconnection of some consumers from the power grid.

An increase in the share of non-dispensable renewable sources in a single energy system leads to a decrease in the share of conventional power plants that can potentially maintain balance.

The operation of the power system can be normalized by duplicating the power of non-dispensable sources with the equivalent power of sources with a short start-up time, for example, by diesel generators. This approach allows you to fully compensate for all disturbances in the system, but its cost should be taken into account when analyzing the economic efficiency of renewable sources.

Ключевые слова: недиспетчеризуемые возобновляемые источники энергии, баланс энергосистемы, моделирование.

Keywords: non-dispensable renewable energy sources, energy system balance, modeling.

Введение. Сегодня бытует мнение, что возобновляемые источники энергии (ВИЭ), в частности солнечные и ветровые электростанции, производят дешевую энергию и могут решить энергетические проблемы промышленно развитых стран. В качестве примеров часто приводят Данию в которой доля ВИЭ составляет 35%. При этом умалчивают, что Дания не имеет развитой промышленности и производит энергии в 3,5 раза меньше Украины [1, 2]. Также удачное географическое расположение Дании позволяет получать высокий КИУМ (42%) на офшорных ветровых электростанциях [3].

Различные источники часто приводят в качестве примера Германию как европейского лидера по внедрению ВИЭ. При этом умалчивают, что в целом энергетика Германии находится в катастрофическом состоянии [4]. Ежедневно по всей стране происходит около 500 отключений энергии. Экономика несет огромные убытки. Стоимость электроэнергии возросла. Количество выбросов углекислого газа не уменьшилось, а возросло, хотя переход на «зеленую» энергию проходил под лозунгами о борьбе за окружающую среду и снижение вредных выбросов. Оставшиеся от предыдущей энергосистемы генерирующие мощности не справляются с балансировкой пилы нагрузки. В результате ежедневно наблюдаются как кризисы перепроизводства электроэнергии, так и недопроизводства.

Основная причина такого пагубного влияния ВИЭ на энергосистемы заключается в том, что большинство ВИЭ относятся к классу недиспетчеризуемых. Самыми популярными сегодня являются солнечные и ветровые электростанции. Количеством вырабатываемой на таких станциях электроэнергией невозможно управлять. Более того, это количество существенно зависит от случайных факторов, таких как: уровень и характеристики облачности, сила ветра, количество пыли на солнечных панелях.

Анализ последних исследований и публикаций. Создание единых энергосистем (ЕЭС) дает как значительные технические и экономические плюсы, так и определенные минусы. Детально проблемы ЕЭС описаны в работе [5]. Кратко поясним основные моменты.

Один из главных минусов ЕЭС касается аварийных ситуаций, когда толчки нагрузки или токи короткого замыкания в одной точке системы воздействуют на оборудование всей ЕЭС.

Для локализации подобных аварий прибегают к крайней мере — отключению ряда потребителей. Подобную противоаварийную автоматику называют аварийной частотной разгрузкой (АЧР). Она широко используется в энергетических системах и за долгие годы эксплуатации достаточно хорошо отработана.

Причина такого радикального подхода заключается в том, что отключение потребителей можно осуществить практически мгновенно, в то время как включение резервных мощностей требует времени.

Создание ЕЭС привнесло определенную специфику в процесс развития аварии при дефиците генерации. Аварийный дефицит генерации возникает в отдельной энергосистеме, что приводит к резкому изменению обменных мощностей и потере устойчивости параллельной работы. Межсистемные связи отключаются и еще больше нарушают баланс активной мощности в аварийной энергосистеме.



Основной принцип современной разгрузки — существенное увеличение числа очередей. Чем больше число очередей и, следовательно, чем меньше нагрузка, отключаемая каждой очередью, тем более гибкой становится вся система разгрузки.

«Самонастройка» разгрузки, кроме выполнения ее большим числом очередей, достигается также разбиением всех устройств на несколько категорий:

- АЧР-1 — быстродействующая (до 5 с) разгрузка, имеющая различные уставки по частоте;
- АЧР-2 — медленнодействующая (10–20 с) разгрузка с близкими уставками по частоте и различными уставками по времени;
- дополнительная — действующая при больших дефицитах мощности и предназначенная для ускорения отключения потребителей и увеличения объема отключаемой нагрузки.

Верхние уставки АЧР-1 и АЧР-2 принимаются близкими к 49 – 49,3 Гц, чтобы отключение потребителей происходило после того, как будет реализован вращающийся резерв мощности, и чтобы подъем частоты обеспечил возможность длительной надежной работы турбоагрегатов и электростанций.

В нормальном режиме агрегаты электростанций работают не всегда с полной нагрузкой. В таком случае они способны при необходимости увеличить свою мощность. Это так называемый вращающийся резерв. Величина его зависит от графика нагрузки и времени суток и может составлять $10 \div 15$ % и более от номинальной мощности агрегатов [5].

Резервные агрегаты могут находиться в остановленном состоянии. Под таковыми следует понимать те агрегаты, которые сравнительно быстро смогут быть пущены в ход, синхронизированы с системой и принять на себя нагрузку. Имеются в виду гидрогенераторы, пуск которых занимает 40÷80 с, включая самосинхронизацию с энергосистемой, а также гидрогенераторы, работающие в режиме синхронного компенсатора. В аварийной ситуации, сопровождающейся дефицитом генерации, эти гидрогенераторы переводятся в режим с выдачей активной мощности.

Очевидно, что чем крупнее ЕЭС, тем больше возможностей по компенсации дефицита энергии при разбалансе системы. Практика показывает, что ЕЭС Украины вполне справляется с колебаниями нагрузки в пределах 5%. Но что произойдет если доля ВИЭ будет расти? Ведь увеличение доли ВИЭ ведет к уменьшению доли обычных электростанций, главное достоинство которых – это диспетчеризуемость т.е. возможность управлять количеством производимой электроэнергии. Управлять производимой солнечными и ветровыми станциями энергией невозможно. Очевидно, что рост доли ВИЭ потенциально снижает возможности системы поддерживать энергетический баланс.

Сейчас энергопотребление Украины составляет примерно 18 ГВт [6]. Суммарная установленная мощность ВИЭ на октябрь 2019 года составляет 5 ГВт [7]. Реально, на пике, ВИЭ вырабатывают ~1,8 ГВт. Что в 3 раза меньше установленной мощности. И это еще одна проблема. Разница в сезонной выработке электроэнергии зимой и летом на СЭС отличается почти в 5 раз. На примере Германии видно, что в солнечные ветреные летние дни, выработка электроэнергии превышает ее потребление и Германия вынуждена платить другим странам, чтобы они утилизируют ее излишки энергии. Получается экономический парадокс. Страна тратит ресурсы на производство «зеленой» энергии, а затем платит другим странам, чтобы у нее эту энергию забрали и все это под лозунгом дешевой «зеленой» энергии.

Целью статьи является разработка и исследование упрощенной модели управления структурой энергетических установок энергосистемы при нанесении возмущения, которое характеризуется случайным отключением недеспечерируемых установок, при условии содержания в энергосистеме значительной доли ВИЭ.

Исходные данные. Согласно различным прогнозам к 2030 году суммарная мощность ВИЭ в Украине достигнет 12 ГВт.

Рассмотрим гипотетическую энергосистему, состоящую из следующих энергетических установок:

- 10 дизель-генераторных установок (ДГУ) мощностью 5 МВт каждая;
- 5 ГЭС мощностью 800 МВт каждая;
- 6 газотурбинных установок (ГТУ) работающих на газе мощностью 1000 МВт каждая;
- 10 паротурбинных установок (ПТУ) работающих на угле мощностью 2000 МВт каждая;
- 3 АЭС мощностью 1000 МВт каждая;
- ВИЭ суммарной мощностью 9000 МВт.

Для разработки модели поведения ЕЭС были проанализированы ряд положений.

Алгоритм работы АЧР-1 и АЧР-2 позволил определить время срабатывания соответствующих защит. Для АЧР-1 время срабатывания было принято 5 с. Для АЧР-2 — 20 с.

Анализ пусковых режимов различных типов энергоустановок позволил определить среднее время запуска из холодного и горячего состояния и время перехода с одной мощности на другую (табл. 1).

Также был проведен анализ средней стоимости эксплуатации различных типов энергоустановок: ДГУ — 240 \$/МВт·ч; ГЭС — 62 \$/МВт·ч; ГТУ — 170 \$/МВт·ч; ПТУ — 100 \$/МВт·ч; АЭС — 150 \$/МВт·ч.

**Таблица 1 — Временные характеристики пусковых режимов различных типов энергоустановок**

Тип энергоустановки	Время запуска из холодного состояния, с	Время запуска из горячего состояния, с	Время перехода на новую мощность, с
ДГУ	1	1	1
ГЭС	90	15	3
ГТУ	900	420	3
ПТУ	12600	9000	3

Алгоритм моделирования.

Алгоритм моделирования должен был определить такие величины как:

- суммарное количество недополученной потребителями энергии E_{lost} , МВт·ч;
- текущие затраты $C(t)$ на функционирование всех энергоустановок, \$;
- текущие удельные затраты $C_{func}(t)$ на функционирование всех энергоустановок, \$/МВт·ч;
- суммарные затраты C_{func} на функционирование всех энергоустановок, \$.

Величина E_{lost} определяется как:

$$E_{lost} = \sum_{t=0}^T N_{disc}(t) / 3.6 \text{ [МВт·ч]}$$

где: $N_{disc}(t)$ — отключенная в момент времени t мощность потребителей, МВт.

T — интервал моделирования, с.

Величина $C_{func}(t)$ определяется как:

$$C_{func}(t) = \frac{\sum C_i(t)}{\sum N_i(t)}$$

где: $C_i(t)$ — текущие затраты на функционирование i -й установки, \$;

$N_i(t)$ — текущая мощность i -й установки, МВт;

В ходе моделирования включение и переход с одной мощности на другую для различных энергоустановок должен осуществляться в соответствии с данными табл. 1.

Работа над алгоритмом, позволяющим смоделировать поведение энергосистемы, показала, что при кажущейся своей простоте он представляет сложную многоуровневую систему проверок и условий.

В основе алгоритма лежит бесконечный цикл. Изменение состояний системы рассматривается с шагом в 1 с. В обобщенном виде алгоритм можно представить следующим образом.

Шаг 1. Если обнаружена авария, т.е. производство энергии меньше потребления более чем на 5%, то перейти в состояние аварии и запустить таймеры срабатывания АЧР-1 и АЧР-2.

Шаг 2. Если наступило время срабатывания АЧР-1 отключить часть потребителей. Отключенная мощность принимается равной половине текущего дефицита мощности (с учетом запущенных резервов).

Шаг 3. Если наступило время срабатывания АЧР-2 отключить оставшуюся часть потребителей. Отключенная мощность принимается равной всему текущему дефициту мощности.

Шаг 4. Если система находится в состоянии аварии, то подсчитать суммарную запускаемую мощность установок. Иначе перейти к шагу 15.

Шаг 5. В цикле перебрать все энергетические установки. Если установка имеет вращающийся резерв, то перевести установку в состояние разгона. Увеличить суммарную запускаемую мощность на величину вращающегося резерва текущей установки.

Шаг 6. Если суммарная запускаемая мощность больше дефицита энергии, либо достигнут конец цикла, то перейти шагу 7. Иначе перейти к шагу 5.

Шаг 7. В цикле перебрать все энергетические установки. Если время запуска установки меньше планируемого времени аварии и если установка отключена либо находится в состоянии горячего резерва, то перевести установку в состояние включения. Увеличить суммарную запускаемую мощность на величину потенциальной мощности текущей установки.



Шаг 8. Если суммарная запускаемая мощность больше дефицита энергии, либо достигнут конец цикла, то перейти шагу 9. Иначе перейти к шагу 7.

Шаг 9. В цикле перебрать все энергетические установки. Если установка в состоянии разгона перейти к шагу 10. Если установка в состоянии включения перейти к шагу 13.

Шаг 10. Если завершилось время ожидания разгона установки, рассчитать величину ΔN равную разности между номинальной и текущей мощностью установки.

Шаг 11. Если текущий дефицит энергии больше либо равен величине ΔN , то уменьшить суммарную запускаемую мощность на величину ΔN . Увеличить текущую генерируемую мощность на величину ΔN . Уменьшить величину отключенной мощности потребителей на величину ΔN . Установить текущую мощность установки равной номинальной.

Шаг 12. Если текущий дефицит энергии меньше величины ΔN , то уменьшить суммарную запускаемую мощность на величину текущего дефицита энергии. Увеличить текущую генерируемую мощность на величину текущего дефицита энергии. Уменьшить величину отключенной мощности потребителей на величину текущего дефицита энергии. Увеличить текущую мощность установки на величину текущего дефицита энергии.

Шаг 13. Если завершилось время ожидания пуска установки повторить шаги 9-12 для запускаемых установок.

Шаг 14. Если дефицит энергии компенсирован, то перейти в состояние замещения источников. Иначе перейти к шагу 2.

Шаг 15. Если система находится в состоянии замещения, то перейти к шагу 16. Иначе перейти к шагу 2.

Шаг 16. Определяем суммарную мощность $N_{ДГУ}$ запущенных ДГУ.

Шаг 17. Если $N_{ДГУ} > 0$, и если планируемое время аварии больше 900 с (время пуска ГТУ), то перейти к шагу 18. Иначе перейти к шагу 23.

Шаг 18. В цикле перебрать все энергетические установки. Если установка является ГТУ и если установка отключена либо находится в состоянии горячего резерва, то перевести установку в состояние включения. Увеличить суммарную запускаемую мощность на величину потенциальной мощности текущей установки.

Шаг 19. Если суммарная запускаемая мощность больше $N_{ДГУ}$, либо достигнут конец цикла, то перейти шагу 20. Иначе перейти к шагу 18.

Шаг 20. Если завершилось время ожидания пуска установки, рассчитать величину ΔN равную разности между номинальной и текущей мощностью установки.

Шаг 21. Если величина $N_{ДГУ}$ больше либо равна величине ΔN , то уменьшить суммарную запускаемую мощность на величину ΔN . Установить текущую мощность установки равной номинальной. Отключить ДГУ и при необходимости уменьшить текущую мощность ДГУ так чтобы уменьшаемая мощность ДГУ была равна ΔN .

Шаг 22. Если величина $N_{ДГУ}$ меньше величины ΔN , то уменьшить мощность текущей установки на величину $N_{ДГУ}$. Отключить все ДГУ.

Шаг 23. Если планируемое время аварии больше 14000 с (время пуска ПТУ), то выполнить шаги 18-22 применительно к ГЭС замещаемых ПТУ.

Шаг 24. В цикле перебрать все энергетические установки. Определить текущую суммарную стоимость работы системы, суммарную генерируемую энергию и удельную стоимость эксплуатации системы.

Шаг 25. Вывести данные в протокол и перейти к шагу 2.

Чтобы исключить самопроизвольный переход на самый дешевый источник энергии (ПТУ – 100\$/ МВт·ч) некоторые установки помечаются определенным признаком, что позволяет исключить их из очереди на замещение.

Результаты моделирования. Определим исходное состояние системы. Все ДГУ отключены. Все ГЭС находятся в состоянии горячего резерва. АЭС создают базовую нагрузку 3 ГВт. 2 ГТУ и одна ПТУ работают на 90% мощности (10% вращающийся резерв). Одна ПТУ работает на мощности 400 МВт. Суммарная мощность ВИЭ составляет 9 ГВт. Суммарная генерируемая мощность ЕЭС составляет 16 ГВт.

Будем считать, что изначально продолжительность возмущения определена как 120 с. На 100 секунде оператор получает информацию, что длительность аварии будет 1200 с, а на 1100 секунде оператор получает дополнительную информацию об увеличении длительности возмущения до 16000 с. Таким образом, общий временной интервал моделирования T составлял 16000 с.

Для начала была оценена работа системы в безаварийном режиме. Общие затраты на функционирование системы за время T составили 4337510 \$. Удельная стоимость составила 141 \$/ МВт·ч.

Далее был рассмотрен ряд сценариев, при которых наносится возмущение, и доля генерируемой ВИЭ энергии уменьшается на 25%, 50% и 75%, а баланс в системе поддерживался только за счет отключения потребителей. Очевидно, что, так как, новые установки не запускаются, стоимость эксплуатации в этих случаях составляет те же 4337510 \$ но количество энергии, которую недополучил конечный потребитель соответственно равно 10, 20 и 30 ГВт·ч. Особого интереса эти сценарии не представляют и были проанализированы только для полноты картины.

Далее был рассмотрен ряд сценариев, при которых генерируемая ВИЭ энергия уменьшается на 25%, 50% и 75%, а энергосистема пытается компенсировать дефицит энергии всеми возможными способами.

В первом сценарии дефицит энергии на момент аварии составил 2250 МВт.

Ниже приведены выдержки из протокола работы системы.

1 секунда. Активированы АЧР-1 и АЧР2. Подготовка к переводу блоков ГТУ1, ГТУ2, ПТУ1, ПТУ2 на новую мощность. Подготовка к запуску блоков ДГУ1 – ДГУ10 и ГЭС1. Суммарная запускаемая мощность 2850 МВт.



3 секунда. Запущены из холодного состояния блоки ДГУ1 – ДГУ10. Дефицит энергии 2200 МВт.
 5 секунда. Блоки ГТУ1, ГТУ2, ПТУ1 и ПТУ2 переведены на максимальную мощность. Дефицит энергии: 200 МВт.
 7 секунда. Срабатывание АЧР-1. Отключено 100 МВт.
 17 секунда. Запущен из горячего резерва блок ГЭС1. Мощность (макс/тек) 800/200. Дефицит энергии 0. Подключены все отключенные ранее потребители.
 Подготовка к переводу блока ГЭС1 на новую мощность для замещения.
 21 секунда. Блок ГЭС1 переведен на мощность 250 МВт. Отключены блоки ДГУ1 – ДГУ10.
 22 секунда. Срабатывание АЧР-2. Отключено 0 МВт.
 100 секунда. (Ожидаемое время аварии увеличилось до 1200 с). Подготовка к пуску блока ГТУ3 для замещения.
 1001 секунда. Запущен блок ГТУ3 на мощность 250 МВт. Отключен блок ГЭС1.
 1100 секунда. (Ожидаемое время аварии увеличилось до 16000 с). Подготовка к пуску блока ПТУ3 для замещения.
 13701 секунда. Запущен блок ПТУ3 на мощность 250 МВт. Отключен блок ГТУ3.
 Потребитель недополучил: 277.778 кВт·ч.
 Затрачено: 5463940 \$.

Аналогичным образом были проанализированы сценарии для 50% и 75% уменьшения выработки энергии ВИЭ. Дополнительно были смоделированы сценарии, при которых в системе отсутствуют ДГУ и ГЭС, а также отсутствует вращающийся резерв. Отдельно был смоделирован сценарий, при котором установочная мощность ВИЭ дублируется эквивалентной мощностью дизель-генераторных установок. Результаты сведены в табл. 2.

На основании результатов моделирования была исследована динамика изменения текущей и удельной стоимости функционирования системы (рис. 1, 2).

Таблица 2 — Сводные результаты моделирования различных сценариев

Сценарий	Количество недополученной потребителем энергии, кВт·ч	Стоимость эксплуатации системы, \$
Нормальный режим работы	0	4337510
Выработка ВИЭ уменьшается на 25%, компенсация за счет отключения потребителей	10000000	4337510
Выработка ВИЭ уменьшается на 50%, компенсация за счет отключения потребителей	20000000	4337510
Выработка ВИЭ уменьшается на 75%, компенсация за счет отключения потребителей	30000000	4337510
Выработка ВИЭ уменьшается на 25%, компенсация за счет резервов	278	5463940
Выработка ВИЭ уменьшается на 50%, компенсация за счет резервов	3402	6995180
Выработка ВИЭ уменьшается на 75%, компенсация за счет резервов	414445	8558110
Выработка ВИЭ уменьшается на 25%, компенсация за счет резервов. Отсутствуют ДГУ	347	5463840
Выработка ВИЭ уменьшается на 75%, компенсация за счет резервов. Отсутствуют ДГУ	428111	8521680
Выработка ВИЭ уменьшается на 25%, компенсация за счет резервов. Отсутствуют ГЭС	671368	7351070
Выработка ВИЭ уменьшается на 75%, компенсация за счет резервов. Отсутствуют ГЭС	1037930	8548790
Выработка ВИЭ уменьшается на 25%, компенсация за счет резервов. Отсутствует вращающийся резерв	3055	5935740
Выработка ВИЭ уменьшается на 75%, компенсация за счет резервов. Отсутствует вращающийся резерв	961320	8255290
Выработка ВИЭ уменьшается на 25%. 100% первоначального дефицита компенсируется ДГУ	0	5942560
Выработка ВИЭ уменьшается на 50%. 100% первоначального дефицита компенсируется ДГУ	0	7352280
Выработка ВИЭ уменьшается на 75%. 100% первоначального дефицита компенсируется ДГУ	0	8171600

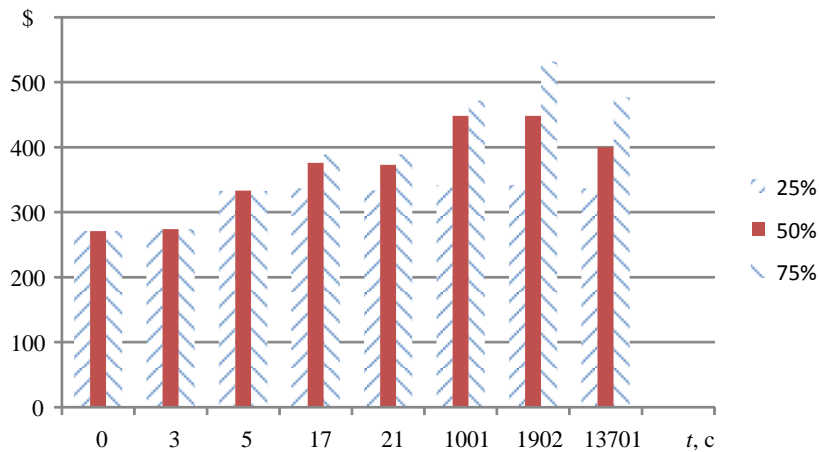


Рис. 1 – Динамика изменения текущей стоимости функционирования системы при различных сценариях

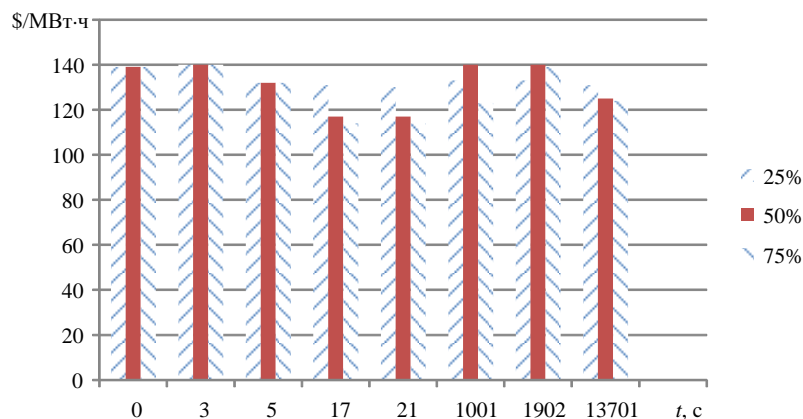


Рис. 2 – Динамика изменения удельной стоимости функционирования системы при различных сценариях

Выводы. Прежде всего следует отметить эффект от использования ДГУ. В сценарии с 25% дефицитом электроэнергии ДГУ позволили компенсировать почти 20% недостающей электроэнергии при увеличении стоимости всего на 0,0018%. Время работы установок составило 100 с. В сценарии с 75% дефицитом электроэнергии ДГУ позволили компенсировать 3% недостающей электроэнергии при увеличении стоимости на 0,4%. Время работы установок составило 1000 с. Также результаты свидетельствуют о том, что ДГУ не способны в значительной мере повлиять на изменение баланса всей энергосистемы. Мощность таких установок слишком мала, а их длительное использование делает их экономически нецелесообразными.

Следующий вывод – отсутствие в ЕЭС гидроэлектростанций существенно ухудшает возможности по балансировке системы. Если в сценарии с 25% дефицитом энергии и наличием ГЭС суммарно мощностью 4 ГВт потребитель недополучил примерно 300 кВт·ч, то в сценарии с отсутствующими ГЭС при тех же условиях потребитель недополучил уже 670000 кВт·ч. Это свидетельствует об очень важной роли мощных энергогенерирующих установок с малым временем пуска, таких как гидроагрегаты ГЭС и ГАЭС.

Вращающийся резерв также можно рассматривать как некую виртуальную энергоустановку с малым временем пуска. В рамках проведенного эксперимента вращающийся резерв позволил компенсировать от 50% до 90% дефицита электроэнергии. В тоже время следует учитывать, что работа установок не на номинальной мощности связана с перерасходом топлива. На разных установках величина перерасхода различна, но может достигать 30% при текущей мощности установки составляющей 30÷40 % от номинала. Поэтому организация вращающегося резерва всегда обходится дороже, чем работа установок на номинальной мощности.

Дублирование ВИЭ дизель-генераторными установками эквивалентной мощности позволяет полностью компенсировать возмущающие воздействия на ЕЭС со стороны ВИЭ. При этом стоимость эксплуатации не сильно отличается от варианта без дублирования. Так для сценария с 25% дефицитом эта величина увеличилась на 8%, а для сценария 75% дефицита уменьшилась на 4%. С другой стороны рыночная стоимость одной ДГУ мощностью 5 МВт сегодня составляет от 1,2 млн. евро. Для компенсации возмущения в сценарии 75% дефицита потребовалось 1250 таких установок, что соответствует 1,5 млрд евро. Для сравнения ориентировочная стоимость 9 ГВт СЭС составит 7 млрд евро.



Следующим важным результатом показывает, что даже 25% дефицит электроэнергии который компенсируется буквально за 15÷20 с приводит к 25% повышению стоимости эксплуатации системы. В сценарии с 75% дефицитом стоимость эксплуатации увеличилась в двое. При этом хотелось бы отметить, что легкая облачность снижает производство электроэнергии СЭС до 50%. Рваная облачность может, как снижать в два раза производство энергии, так и повышать его в двое за счет отражения солнечных лучей от облаков. Густые облака, при которых отсутствует тень от объектов, снижают выработку энергии СЭС до минимума.

Также полученные результаты свидетельствуют о несостоятельности идеи продавать «зеленую» энергию в страны ЕС. Из-за существенных колебаний частоты такая энергия просто не будет соответствовать требованиям к качеству.

Обоснование экономической эффективности ВИЭ по «зеленому» тарифу, не учитывает затраты на балансировку ЕЭС, а как показано в данной работе эти затраты могут составлять 100% от стоимости эксплуатации в нормальном режиме.

Единственным разумным подходом к использованию недиспетчеризуемых ВИЭ на данный момент видится жесткое ограничение на стабильность подключаемой к ЕЭС мощности. С каждой недиспетчеризуемой установкой параллельно с ней должна вводиться диспетчеризуемая установка такой же мощности. Организация либо частные предприниматели которые хотят продавать государству «зеленую» энергию должны предоставить годовой график производства электроэнергии. Любые отклонения от этого графика на величину более 5% должны облагаться штрафами. Фактически это означает, что недиспетчеризуемый источник альтернативной энергии должен работать в комплексе с дизель-генераторными установками практически такой же мощности. Как показано в табл. 2 стоимость эксплуатации самой системы при этом не сильно изменится, но существенно возрастут капитальные затраты, что существенно снизит экономический эффект от использования ВИЭ. Адепты «зеленой» энергетики сегодня перекалывают роль этих дизель-генераторов на ЕЭС и тем самым убирают из уравнения экономической эффективности важную статью расходов.

Список использованных источников

- [1] The International Energy Agency. Denmark. Balance 2017 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://www.iea.org/Sankey/#?c=Denmark&s=Balance>
- [2] Eurostat. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: https://ec.europa.eu/eurostat/tgm/table.do?tab=table&plugin=1&language=en&pcode=t2020_31.
- [3] Energy numbers. Capacity factors at Danish offshore wind farms. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <http://energynumbers.info/capacity-factors-at-danish-offshore-wind-farms>
- [4] [Субботнее] Немецкое телевидение: Привыкайте к отключениям электричества [Электронный ресурс] / Тояма Токанава // AfterShock. 2018. – Режим доступа: URL: <https://aftershock.news/?q=node/610440>
- [5] Павлов Г.М. Автоматическая частотная разгрузка энергосистем. Второе издание. – РАО «ЕЭС России» Центр подготовки кадров энергетики. СЗФ АО «ГВИЦ Энергетики», 2002 г. 82 с.
- [6] Добовий графік виробництва/споживання електроенергії // УКРЕНЕРГО. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: URL: <https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/dobovyj-grafik-vyrobnystva-spozhyvannya-e-e/>
- [7] Украина за год почти утроила мощности "зеленой" энергетики. [Электронный ресурс] // УНИАН. Інформаційне агентство. 2019 – Режим доступа: URL: <https://www.unian.net/economics/energetics/10710915-ukraine-za-god-pochti-utroila-moshchnosti-zelenoy-energetiki.html>

References

- [1] The International Energy Agency. Denmark. Balance 2017. – Available at: <https://www.iea.org/Sankey/#?c=Denmark&s=Balance>
- [2] Eurostat – Available at: <https://www.iea.org/Sankey/#?c=Denmark&s=Balance>
- [3] Energy numbers. Capacity factors at Danish offshore wind farms – Available at: <http://energynumbers.info/capacity-factors-at-danish-offshore-wind-farms>
- [4] Tokanawa, T. (2018). [Subbotnee] Nemetskoe televidenie: Privykaite k otklucheniiam elektrichestva [[Saturday] German TV: Get Used To Power Outages]. *AfterShock*. – Available at: <https://aftershock.news/?q=node/610440>
- [5] Pavlov, G. (2002). Avtomaticheskaja chastotnaia razgruzka [Automatic frequency unloading of power systems] [Text]. *Second edition*. - RAO "UES of Russia" Center for the training of energy personnel. NWF JSC "MCC Energy", 82 p.
- [6] Dobovyj grafik vyrobnytsva/spojyvannia elektroenergii [UKRENERGO. Daily schedule of electricity production/consumption]. *UKRENERGO*. – Available at: <https://ua.energy/diyalnist/dyspetcherska-informatsiya/dobovyj-grafik-vyrobnystva-spozhyvannya-e-e/>
- [7] Ukraina za god pochti utroila moshchnosti «zelionoi» energetiki [Ukraine nearly tripled its green energy capacity over the year]. *UNIAN. News Agency*. 2019 – Available at: <https://www.unian.net/economics/energetics/10710915-ukraine-za-god-pochti-utroila-moshchnosti-zelenoy-energetiki.html>



УДК 004.6+519.2

МЕТОД НЕЧІТКОЇ КЛАСИФІКАЦІЇ НА ОСНОВІ ПОСЛІДОВНОГО АНАЛІЗУ ВАЛЬДА

Мулеса О. Ю.¹, Снитюк В. Є.², Герзанич С. О.³^{1,3}Державний вищий навчальний заклад «Ужгородський національний університет»²Київський національний університет імені Тараса ШевченкаORCID: ¹0000-0002-6117-5846, ²0000-0002-9954-8767, ³0000-0001-7065-0795E-mail: ¹Oksana.Mulesa@uzhnu.edu.ua, ²Snytyuk@gmail.com, ³Gerzanich@ua.fm

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation of technological and business - processes.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

DOI:

Анотація. Розглядаються задачі прогнозування можливості зміни стану об'єкта на основі його оцінки за множиною критеріїв. До таких задач відносять задачі медичного прогнозування, тобто прогнозування можливості виникнення в майбутньому у особи загрозового для неї стану. Цю задачу можна сформулювати як задачу класифікації, де один з класів відповідатиме великому ступеню ризику виникнення загрозового стану, а інший – низькому ступеню ризику. В такій інтерпретації задача класифікації може бути розв'язана за допомогою методу послідовного аналізу Вальда, який базується на теоремі Байєса та враховує інформативність ознак, за якими проводиться класифікація. Такий підхід має ряд особливостей, пов'язаних з визначенням порогів та опрацюванням тих значень ознак, які близькі до порогових. В статті показано, що при застосуванні методу Вальда для об'єктів із значеннями ознак, близькими до порогових, можливі випадки отримання протилежних рішень. З метою підвищення ефективності класифікації запропоновано метод нечіткої класифікації. Особливістю розробленого методу є те, що особа, яка приймає рішення, може вказати характер функції належності для визначення близькості заданих значень до порогових і таким чином задати інтервал допустимої зміни порогових значень. Алгоритм обчислює ступені належності заданого об'єкта до кожного з класів.

Виконано експериментальну верифікацію розробленого методу для задачі прогнозування невиношування вагітності. На етапі формалізації медичних знань відібрані показники, які можуть бути використані для прогнозування, створена база даних клінічного матеріалу. На модельних прикладах продемонстровано перевагу розробленого методу в порівнянні з методом послідовного аналізу Вальда.

Отримані в дослідженні результати можуть використовуватися при побудові прогностичних алгоритмів в медицині.

Annotation. The tasks of predicting the possibility of changing the state of an object based on its evaluation by multiple criteria are considered. Medical forecasting tasks, for example, predicting the future occurrence of a person with a threatening condition, can be assigned to this class of tasks. This task can be formulated as a classification problem, where one class will be at high risk of the threat and the other will be at low risk. In this interpretation, the classification problem can be solved by using the Wald sequential analysis method. This method is based on Bayes' theorem and takes into account the informative nature of the features used for classification. This approach has a number of features related to defining thresholds and processing those attribute values that are close to thresholds. The article shows that if you use the Wald method for objects with feature values close to the thresholds, then you can get the opposite solution. In order to improve the classification efficiency, a fuzzy classification method is proposed. The peculiarity of the developed method is that the decision maker can specify the nature of the membership function to determine the proximity of the setpoints to the thresholds and thus set the interval of the allowed change of the thresholds. The algorithm calculates the degree of belonging of a given object to each of the classes.

Experimental verification of the developed method for the problem of prediction of miscarriage is made. At the stage of formalization of medical knowledge such indicators were selected that can be used for prediction, a database of clinical material was created. Model examples demonstrate the advantages of the developed method over the Wald sequential analysis method.

The results obtained in the study can be used in the construction of prognostic algorithms in medicine.



Ключові слова: нечітка класифікація, послідовний аналіз Вальда, діагностична функція, прогностичний алгоритм.

Keywords: fuzzy classification, sequential Wald analysis, diagnostic function, prognostic algorithm.

Вступ. Процеси прийняття різного роду рішень супроводжуються необхідністю одночасного аналізу та співставлення багатьох важливих показників. У своїх рішеннях особа, яка приймає рішення, керується як наявними інструкціями, правилами, статистичними і прогностичними даними, так і власним досвідом. Якщо правила та інструкції є максимально формалізованими і зрозумілими до використання, то формалізація власного досвіду є нетривіальною задачею. В таких випадках актуальною є розробка зрозумілих алгоритмів, застосування яких дозволило б уніфікувати процес прийняття рішень. Серед задач, які часто виникають в процесі прийняття рішень, важливе місце займає прогнозування можливості зміни стану об'єкта, яку можна віднести до задачі класифікації об'єктів. Прикладами таких задач можуть бути задачі прогнозування можливості виникнення в майбутньому у особи загрозливого для неї стану [1]. Із розвитком сучасних технологій ускладнюється інтерпретація великої кількості даних клінічного, лабораторного та інструментального обстеження. З однієї сторони це пов'язано із показниками специфічності та чутливості маркерів і, відповідно їх прогностичної цінності, а з іншого, враховуючи багатофакторну обумовленість більшості нозологій, - вимагає урахування ролі як окремих вагомих етіологічних чинників, так і їх синергізму у реалізації патологічного процесу. У зв'язку з цим актуальною є розробка і впровадження у клінічну практику прогностичних алгоритмів, які дають можливість інтегрального оцінювання клініко-лабораторних параметрів як у процесі діагностики, так і при оцінці ефективності лікувально-профілактичних заходів.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Задача віднесення особи до певної групи ризику може бути сформульована як задача класифікації об'єктів [2, 3]. Задача класифікації полягає у віднесенні об'єкта до одного із заданих класів [4]. На практиці використовують різні види методів класифікації: нейромережеві методи [5], методи зіставлення зі зразком [6], методи, що базуються на теоремі Байєса [7], нечіткі методи класифікації [8], еволюційні методи [9].

Серед методів, які зазвичай використовуються при побудові прогностичних діагностичних алгоритмів, сформульованих у виді задачі класифікації, важливе місце займає метод послідовного аналізу Вальда [2]. Цей метод в основному базується на теоремі Байєса та працює з пороговими значеннями ознак, які розглядаються. Такий підхід має ряд особливостей, пов'язаних з визначенням порогів та опрацюванням тих значень ознак, які близькі до порогових. У чіткому варіанті можливі випадки, коли для значень, що знаходяться в межах статистичної похибки або похибки вимірювань, можуть бути прийняті протилежні рішення. Ці недоліки можна усунути за допомогою використання апарату нечітких множин, який дозволив би зменшити відмінності між значеннями, близькими до порогових.

Мета і завдання дослідження. За результатами попереднього аналізу було поставлено таку мету: розробити інструментарій для підвищення ефективності процесів прийняття рішень, пов'язаних з віднесенням особи до групи ризику виникнення потреб в медичних послугах на основі медико-соціального портрету. Для досягнення поставленої мети були розв'язані такі задачі:

- побудувати математичну модель для прогнозування можливої зміни стану об'єкта у вигляді задачі віднесення об'єкта до класу;
- розробити нечіткий метод віднесення об'єкта до класу на основі послідовного аналізу Вальда;
- здійснити експериментальну верифікацію отриманих результатів та виконати порівняльний аналіз.

Побудова математичної моделі для прогнозування можливої зміни стану об'єкта. Розглядається задача виконання медичного прогнозу, яка полягає у віднесенні особи до групи ризику виникнення певного загрозливого стану. Таке рішення необхідно прийняти на основі відомих медичних показників та з урахуванням наявного досвіду лікаря, який відображається у навчальній вибірці. Тоді, формально цю задачу можна представити як віднесення об'єкта до одного з двох класів, де перший з них відповідає входженню до групи ризику, а інший – невходженню до неї.

Побудуємо математичну модель зазначеної задачі класифікації таким чином.

Нехай маємо множину об'єктів $O = \{O_1, O_2, \dots, O_n\}$, для кожного з яких відомі значення за кожним критерієм з множини $K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$. Тобто, задана множина векторів $W = \{w_i = (w_{i1}, w_{i2}, \dots, w_{im}), i = \overline{1, n}\}$, де w_{ij} – значення j -ого критерію для i -го об'єкта. Кожен об'єкт належить до одного з двох заданих класів A та B . Необхідно задати правило, за яким для деякого об'єкта O' , який характеризується вектором $w' = (w'_{11}, w'_{12}, \dots, w'_{1m})$ відповідних критеріїв з множини K , на основі даних про об'єкти з множини O , можна буде прийняти рішення про його віднесення до одного з класів A або B .

Позначимо J_1 - множину індексів тих критеріїв, які набувають одного з двох значень: {"Так", "Ні"} та J_2 - множину тих критеріїв, які приймають числові значення, причому $J_1 \cup J_2 = \{1, 2, \dots, m\}$, $J_1 \cap J_2 = \emptyset$. Нехай для кожного критерію K_j ($j \in J_2$) відомий інтервал допустимих значень $X_j = (a_j, b_j)$. Задамо розбиття цих інтервалів таким чином: $a_j = x_0^{(j)} < x_1^{(j)} < \dots < x_{p_j}^{(j)} = b_j$, де p_j - кількість інтервалів розбиття множини допустимих значень критерію K_j ($j \in J_2$). Позначимо через $X_q^{(j)} = (x_{q-1}^{(j)}, x_q^{(j)})$ - відповідні інтервали ($q = \overline{1, p_j}$).



Для критеріїв K_j ($j \in J_1$) приймемо, що $p_j = 2$, $X_1^{(j)} = \{ "Так" \}$, $X_2^{(j)} = \{ "Ні" \}$.

Позначимо n_A - кількість елементів множини O , які належать до класу A , n_B - кількість елементів множини O , які належать до класу B ($n_A + n_B = n$),

$$\chi_{Aq}^{(j)}(O_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } O_j \in A \text{ та } w_{ij} \in X_q^{(j)}; \\ 0, & \text{в протилежному випадку.} \end{cases} \quad \chi_{Bq}^{(j)}(O_i) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } O_j \in B \text{ та } w_{ij} \in X_q^{(j)}; \\ 0, & \text{в протилежному випадку.} \end{cases}$$

$$m_{Aq}^{(j)} = \sum_{i=1}^n \chi_{Aq}^{(j)}(O_i), \quad m_{Bq}^{(j)} = \sum_{i=1}^n \chi_{Bq}^{(j)}(O_i), \quad j = \overline{1, m}, \quad q = \overline{1, p_j}.$$

Обчислимо $P(X_q^{(j)} / A) = \frac{m_{Aq}^{(j)}}{n_A}$, $P(X_q^{(j)} / B) = \frac{m_{Bq}^{(j)}}{n_B}$. Позначимо $DC_q^{(j)} = \left[10 \lg \frac{P(X_q^{(j)} / A)}{P(X_q^{(j)} / B)} \right]$ - діагностичний

коефіцієнт множини $X_q^{(j)}$ критерію K_j .

Наступним етапом підготовки до роботи діагностичної процедури є визначення інформативності критеріїв - ступеня відмінностей розподілу їх значень у класах A та B . Чим сильніше відрізняються ці розподіли, тим більше інформації існує для розрізнення класів A та B . Застосуємо міру Кульбака [2], яка дозволяє оцінити ступінь таких відмінностей. Величина інформативності значень з множини $X_q^{(j)}$ рівна

$$I_q^{(j)} = DC_q^{(j)} \cdot \frac{P(X_q^{(j)} / A) - P(X_q^{(j)} / B)}{2}.$$

Тоді, інформативність всього критерію K_j визначається так:

$$I_j = \sum_{q=1}^{p_j} I_q^{(j)}.$$

Для застосування процедури віднесення об'єкта до класу необхідно впорядкувати множини критеріїв $K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$ у порядку спадання їх інформативності.

Задача:

Розглянемо задачу віднесення об'єкту O' , який характеризується вектором $w' = (w'_1, w'_2, \dots, w'_m)$, до одного з двох заданих класів A та B . Кожен об'єкт оцінюється за множиною критеріїв $K = \{K_1, K_2, \dots, K_m\}$, для яких відомими є їх інформативність I_j ($j = \overline{1, m}$), причому $I_{j1} < I_{j2}$, якщо $j1 > j2$. Нехай відомі значення діагностичних коефіцієнтів.

Нехай потрібно прийняти рішення із заданим рівнем надійності за заданими помилками першого і другого роду (α та β). Тоді обчислимо величини порогів для прийняття рішень

$$ThA = 10 \lg \frac{1-\alpha}{\beta}, \quad ThB = 10 \lg \frac{\alpha}{1-\beta}.$$

Відомо, що під помилкою першого роду α розуміють помилкове віднесення об'єкта до класу B , відповідно помилка другого роду β описує помилкове віднесення об'єкта до класу A .

Метод послідовного аналізу Вальда для віднесення об'єкта до класу.

Задамо діагностичну функцію:

$$Df_j(w'_j) = \begin{cases} DC_1^{(j)}, & \text{якщо } w'_j \in X_1^{(j)}; \\ \dots & \\ DC_{p_j}^{(j)}, & \text{якщо } w'_j \in X_{p_j}^{(j)}. \end{cases}$$

Тоді, процедура віднесення об'єкта до класу полягатиме в дослідженні такої нерівності:

$$ThB < Df_1(w'_1) + Df_2(w'_2) + \dots + Df_{p_j}(w'_{p_j}) < ThA \quad (1)$$

Дослідження починається з першого критерію, далі послідовно обчислюється сума значень діагностичних функцій. Як тільки нерівність (1) перестав виконуватися, можливим є прийняття рішення про віднесення об'єкта до одного з класів.

Алгоритм даного методу є таким:

Крок 1. $Sum := 0$, $j := 1$



Крок 2. $Sum := Sum + Df_j(w'_j)$.

Крок 3. Якщо $Sum > ThA$, то об'єкт відносимо до класу A . Кінець процедури.

Крок 4. Якщо $Sum < ThB$, то об'єкт відносимо до класу B . Кінець процедури.

Крок 5. Якщо $j = m$, то отримуємо рішення про недостатність інформації для віднесення об'єкту до класу із заданими рівнями помилок. Кінець процедури.

Крок 6. $j := j + 1$. Перехід до Кроку 2.

Метод нечіткої класифікації.

Для кожного інтервалу кожного критерію $X_q^{(j)} = (x_{q-1}^{(j)}, x_q^{(j)})$ ($j \in J_2$) побудуємо, наприклад, трапецієподібну функцію належності таким чином:

$$\mu_q^{(j)}(w) = \begin{cases} \frac{w - \underline{x}_q^{(j)}}{x_{q-1}^{(j)} - \underline{x}_q^{(j)}}, & w \in (\underline{x}_q^{(j)}, x_{q-1}^{(j)}]; \\ 1, & w \in X_q^{(j)}; \\ -\frac{w - \bar{x}_q^{(j)}}{x_{q-1}^{(j)} - \bar{x}_q^{(j)}}, & w \in (x_q^{(j)}, \bar{x}_{q-1}^{(j)}]; \\ 0, & w \notin (\underline{x}_q^{(j)}, \bar{x}_{q-1}^{(j)}]. \end{cases}$$

Для тих $X_q^{(j)}$, що $j \in J_1$, функцію належності будуємо таким чином:

$$\mu_q^{(j)}(w) = \begin{cases} 1, & \text{якщо } w \in X_q^{(j)}; \\ 0, & \text{якщо } w \notin X_q^{(j)}. \end{cases}$$

Зафіксуємо $\Delta \in (0; 1]$ - порогове значення функції належності. Тоді, метод нечіткої класифікації на основі послідовного аналізу Вальда полягатиме в обчисленні сум, які характеризують близькість об'єкта до класів з урахуванням значень відповідних функцій належності.

Алгоритм нечіткого методу класифікації є таким:

Крок 1. $Sum_1^{(0)} := 0, \mu_1^{(0)} := 1; j := 1; r_0 := 1; \mu_A := 0; \mu_B := 0$;

Крок 2. $q := 1; r_j := 0$;

Крок 3. Якщо $\mu_q^{(j)}(w'_q) \geq \Delta$, то $dc := DC_q^{(j)}$ і переходимо до Кроку 4, інакше переходимо до Кроку 9.

Крок 4. $t := 1$

Крок 5. Якщо $Sum_t^{(j-1)} + dc > ThA$, то $\mu_A = \max\{\mu_A, \min\{\mu_q^{(j)}(w'_q), \mu_t^{(j)}\}\}$ і переходимо до Кроку 8.

Крок 6. Якщо $Sum_t^{(j-1)} + dc < ThB$, то $\mu_B = \max\{\mu_B, \min\{\mu_q^{(j)}(w'_q), \mu_t^{(j)}\}\}$ і переходимо до Кроку 8.

Крок 7. $r_j := r_j + 1, Sum_r^{(j)} := Sum_t^{(j-1)} + dc, \mu_r^{(j)} := \min\{\mu_t^{(j-1)}, \mu_q^{(j)}(w'_q)\}$.

Крок 8. Якщо $t < r_{j-1}$, то $t := t + 1$ і переходимо до Кроку 5.

Крок 9. Якщо $q < p_j$, то $q := q + 1$ і переходимо до Кроку 3.

У результаті роботи алгоритму можливими є такі рішення:

- якщо $\mu_A \geq \Delta$, то об'єкт відноситься до класу A з мірою належності μ_A .

- аналогічно, якщо $\mu_B \geq \Delta$, то об'єкт відноситься до класу B з мірою належності μ_B .

- якщо $\mu_A < \Delta$ і $\mu_B < \Delta$, то для прийняття рішення з ймовірністю Δ недостатньо інформації.

Експериментальна верифікація розробленого методу. Експериментальна верифікація методу нечіткої класифікації на основі послідовного аналізу Вальда здійснювалась для задачі прогнозування невиношування вагітності [3]. Дані роботи нечіткого алгоритму порівнювались з даними, отриманими для класичного алгоритму Вальда [3].

На етапі формалізації медичних знань відібрані показники, які можуть бути використані для прогнозування, створена база даних клінічного матеріалу у вигляді, придатному для подальшої обробки. У базу даних занесена інформація про 80 жінок. Відповідно до двох прогнозованих станів, на основі бази даних було сформовано дві навчальні вибірки наступного обсягу: про 50 жінок, у яких було діагностовано самовільний аборт у другому триместрі вагітності (основна група), і про 30 жінок (контроль), у яких дана вагітність закінчилась строковими пологами.



Задача полягала в тому, щоб для конкретної жінки на основі аналізу факторів ризику із певною заздалегідь встановленою ймовірністю вибрати одне з двох прогностичних рішень: перше – у жінки високий ризик НВ (стан А), друге – низький ризик НВ (стан В). При цьому значення порогів склали для А = 6.4, для В = –6.4, відповідно [2].

У результаті застосування методу послідовного аналізу Вальда була сформована диференціально-прогностична таблиця (табл. 1):

Таблиця 1 – Диференціально-прогностична таблиця із використанням інформативності прогностичних коефіцієнтів окремих показників

Показник	Значення показника	DC	I
1. Прогестерон (МОМ)	<1	4.09	2.05
	>1	-1.18	
2. Рецидиви загрози с/а даної вагітності	Так	5.27	1.89
	Ні	-0.84	
3. ХГ (МОМ)	<0,5	1.76	1.56
	0,51-1,5	-2.06	
4. АТ-ТПО (Од/мл)	>50	3.68	1.41
	<50	-0.88	
5. Гіпотироксинемія (fT4 < 0,93 нг/дл)	Так	4.69	1.21
	Ні	-0.59	
6. Урогенітальна інфекція	Так	3.01	1.17
	Ні	-0.88	
7. Йодурія (мкг/л)	<49	3.12	1.12
	50-99	0.88	
	>100	-1.20	
8. Естріол (МОМ)	<1	4.12	0.77
	>1	-0.42	
9. Анемія (Hb < 110 г/л)	Так	1.37	0.73
	Ні	-1.23	
10. НВ при попередній вагітності	Так	1.80	0.18
	Ні	-0.22	

Розглянемо два клінічні випадки та застосуємо до них метод послідовного аналізу Вальда (табл.2):

Таблиця 2 – Результати обчислень

Ознаки	Випадок 1		Випадок 2	
	Ознаки	$Sum(Df_i)$	Ознаки	$Sum(Df_i)$
Прогестерон	0.9	4.09	1.1	-1.18
Рецидиви	Так	9.36	Так	4.09
ХГ	0.7		0.7	2.03
АТ-ТПО	48		48	1.15
Гіпотироксинемія	Так		Так	5.84
Урогенітальна	Ні		Ні	4.96
Йодурія	51		51	5.84
Естріол	1.1		1.1	5.42
Анемія	Ні		Ні	4.19
НВ	Так		Так	5.99



Клінічні випадки відрізняються тільки за першим показником на 0.2 одиниці. Проте, для випадку 1 вже на другому кроці було прийняте рішення про віднесення особи до групи високого ризику, а для випадку 2 - недостатньо даних для прийняття рішення.

Застосуємо метод нечіткої класифікації. Нехай $\Delta = 0.85$, а функція належності показника «Прогестерон» має такий вид:

$$\mu_{\text{проз}>1}(w) = \begin{cases} \frac{w-0.7}{1-0.7}, & w \in (0.7, 1]; \\ 1, & w > 1; \\ 0, & w \leq 0.7. \end{cases} \quad \mu_{\text{проз}<1}(w) = \begin{cases} -\frac{w-1.3}{1.3-1}, & w \in (1, 1.3]; \\ 1, & w \leq 1; \\ 0, & w > 0.3. \end{cases}$$

Показники інших функцій належності задані аналогічно.

Тоді метод завершує свою роботу з такими параметрами: $\mu_A = 0.97$, $\mu_B = 0$. Таким чином, можна зробити висновок, що особа відноситься до групи високого ризику НВ з мірою належності 0.97.

Обговорення результатів. Розроблений в процесі дослідження алгоритм нечіткої класифікації дозволяє розв'язувати медичні задачі, пов'язані з прогнозуванням виникнення загрозливого стану у особи в майбутньому. У випадку, коли ознаки приймають значення, близькі до порогових, і за допомогою методу послідовного аналізу Вальда не можна прийняти рішення про можливість виникнення загрозливого стану, доцільним є застосування розробленого методу. Результат його застосування є важливим інформативним фактором для прийняття рішення про госпіталізацію та визначення потрібного протоколу лікування.

Висновки. Робота присвячена розробці методу нечіткої класифікації на основі послідовного аналізу Вальда. В ході дослідження було побудовано математичну модель задачі прогнозування можливої зміни стану об'єкту у вигляді задачі віднесення об'єкта до класу. Такий підхід дозволяє розв'язувати, наприклад, задачі медичного прогнозування, які полягають у віднесенні особи до групи ризику виникнення загрозливого для неї стану за допомогою методів класифікації. Пропонується розглядати задачу класифікації з двома класами, де перший з них відповідає за наявність високого ризику, а другий – низького.

Відзначено, що, як правило, такі задачі розв'язуються за допомогою послідовного аналізу Вальда, в основі якого лежить теорема Байєса, та який полягає у послідовному обчисленні суми діагностичних коефіцієнтів. Проте, в даному методі залишається невирішеною проблема обробки показників, значення яких близькі до порогових. Також, часто виникають випадки, коли для заданого набору ознак за допомогою методу Вальда неможливо прийняти рішення про віднесення особи до групи ризику. Для вирішення цих проблем в дослідженні було розроблено метод нечіткої класифікації. Особливістю розробленого методу є те, що особа, яка приймає рішення, може задати характер функції належності для визначення близькості заданих значень до порогових і таким чином задати інтервал допустимої зміни порогових значень.

Експериментальна верифікація розробленого методу на прикладі задачі прогнозування невиношуваності вагітності довела його ефективність.

Список використаних джерел

- [1] Мулеса О. Ю., Снитюк В. Є., Герзанич С. О. Principles and objectives of information and analytical support for prenatal care. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. 3(2 (75)), С. 29-35.
- [2] Гублер Е. В., Генкин А. А. Применение непараметрических критериев статистики в медико-биологических исследованиях. Л.: медицина, 1973. 141 с.
- [3] Герзанич С.О., Мулеса О.Ю. Алгоритм прогнозування невиношування вагітності в умовах природного йодного дефіциту. *Здоров'я жінчини*. 2018. 8(134), с. 48-51.
- [4] Shelah Saharon. *Classification theory: and the number of non-isomorphic models*. Vol. 92. Elsevier, 1990.
- [5] Бренич Я. В., Тимошук П. В. Нейромеревеві методи розв'язання задачі класифікації. *Науковий вісник НЛТУ України*. 2012. 22(13).
- [6] Кучанський О. Ю., Білощицький А. О. Прогнозування часових рядів методом селективного зіставлення зі зразком. *Восточно-Европейський журнал передових технологій*. 2015. (6 (4)), С. 13-18.
- [7] Згуровський М. З., Бідюк П. І., Терентьев О. М., Просьянкіна-Жарова Т. І. Байєсівські мережі в системах підтримки прийняття рішень. 2015.
- [8] Штовба С. Д. Порівняння критеріїв навчання нечіткого класифікатора. 2017.
- [9] Snytyuk V., Suprun O. Evolutionary technique for complex objects clustering / 2017 IEEE 4th Int. Conf. "Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)", October 17-19, Kyiv, Ukraine. P. 270-273



References

- [1] O. Mulesa, V. Snytyuk, S. Gerzanich, "Principles and objectives of information and analytical support for prenatal care," *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(2 (75)), pp. 29-35, 2015. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.42823>
- [2] E.V. Gubler, A.A. Genkin, "Primenenie neparametricheskikh kriteriev statistiki v mediko-biologicheskikh issledovaniyah," L.: meditsina, 1973.
- [3] S.O. Gerzanich, O.Yu. Mulesa, "Alhorytm prohnozuvannya nevyynoshuvannya vahitnosti v umovakh pryrodnoho yodnoho defitsytu," *Zdorove zhenschiny*, 8(134), pp. 48-51, 2018.
- [4] Saharon Shelah, "Classification theory: and the number of non-isomorphic models," Vol. 92. Elsevier, 1990.
- [5] Ya. V. Brenych, P.V. Tymoshchuk, "Neiromerezhevi metody rozv'iazannya zadachi klasyfikatsii," *Naukovyi visnyk NLTU Ukrainy*, 22(13), 2012.
- [6] O. Yu. Kuchanskyi, A.O. Biloshchytskyi, "Prohnozuvannya chasovykh riadiv metodom selektyvnoho zistavlenня zi zrazkom," *Vostochno-Evropeyskiy zhurnalпередовийh tehnologiy*, (6 (4)), pp. 13-18, 2015.
- [7] M. Z. Zghurovskyi, P.I. Bidiuk, O.M. Terentiev, T. I. Prosiankina-Zharova, "Baіiesivski merezhi v systemakh pidtrymky pryiniattia rishen," 2015.
- [8] S. D. Shtovba, "Porivniannya kryteriiv navchannya nechitkoho klasyfikatora," 2017.
- [9] V. Snytyuk, O. Suprun, "Evolutionary technique for complex objects clustering." In Proc. 2017 IEEE 4th Int. Conf. "Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)", October 17-19, Kyiv, Ukraine, pp. 270-273 <https://doi.org/10.1109/APUAVD.2017.8308827>

УДК 664.653-933.6:004.032.26

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗАМІСУ ТІСТА З ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОННОЇ МЕРЕЖІ

Жигайло О. М.¹, Нечепуренко В. В.², Добровольський В. В.³

Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, Україна
ORCID: ¹0000-0001-6986-4673, ²0000-0002-8700-122X, ³0000-0001-6591-2906
E-mail: ¹dr_jam2006@ukr.net, ²necha-1997@ukr.net, ³doov@ukr.net

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation of technological and business - processes.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI:

Анотація.

На сучасних хлібопекарських підприємствах продовжує існувати проблема отримання якісного хліба. Вона виникає внаслідок постійної зміни властивостей як основної сировини (борошна) так і допоміжних рецептурних компонентів (дріжджів, концентрату молочно-кислої закваски, цукрових та соляних розчинів). Тому технологи-хлібопекарі, з метою підвищення якості результатів процесу замісу тіста, використовують різноманітні програми управління тістомісильними машинами. Вибір цих програм не обходиться без втручання "людського фактору", а це може негативно вплинути на кінцевий результат. Якщо реалізовувати більш ефективне реагування на ці зміни під час замісу, то можна добитися підвищення рівня стабільності якісних показників готового тіста на всіх подальших етапах його обробки.

Для пошуку можливостей вирішення цієї задачі пропонується проведення аналізу кластерної структури партій борошна, що відрізняються по показникам якості (число падіння, кількість клейковини та якість клейковини), а також дослідження результатів замісу тіста при різних програмах та з різними партіями борошна. Було підтверджено вплив хлібопекарських властивостей борошна на взаємозв'язок тривалості та інтенсивності замісу з якістю тіста, що виготовлюється. Це обумовило доцільність формування програм для тістомісильної машини на основі результатів кластерного аналізу, який надає можливість отримати додаткову, корисну інформацію для автоматизації процесу управління. Тому запропонована реалізація алгоритму автоматичного вибору програми замісу тіста для тістомісильної машини та її корегування під час замісу за допомогою штучних нейронних мереж.



Корегування залежить від реологічних властивостей тіста на які, в першу чергу, впливає сила борошна. Саме вона забезпечує процес його формування з необхідними структурно-механічними властивостями (пружність, пластичність, еластичність, в'язкість), які поєднуються і постійно змінюються в ході технологічного процесу. Оцінка цих властивостей тіста, має більш інтегральні ознаки, більш об'єктивна. Для цього можуть використовуватися два варіанти: 1) експериментальний заміс на фаринографі з реєстрацією фаринограми в електронному вигляді; 2) вимірювання та реєстрація активної потужності споживаної електроприводом місильного органу під час замісу тіста. Далі, по зареєстрованим даним, проводиться автоматичний розрахунок необхідних показників властивостей тіста і здійснюється корегування параметрів програми замісу.

Abstract.

At modern bakeries, the problem of obtaining high quality bread continues to exist. It occurs as a result of constant change in the properties of both the basic raw material (flour) and auxiliary recipe components (yeast, lactic acid concentrate, sugar and saline solutions). Therefore, in order to improve the quality of the results of the dough mixing process, bakeries use a variety of control systems for dough-mixing machines. The choice of these programs is not without the intervention of the "human factor", and this can negatively affect the end result. By more effectively responding to these changes during dough mixing, it is possible to improve the stability of the quality of the ready dough at all subsequent stages of processing.

In order to find ways to solve this problem, it is suggested to analyze the cluster structure of flour batches, which differ in quality indicators (number of falls, gluten amount and gluten quality), as well as study of the results of dough mixing in different programs and with different batches of flour. The effect of the baking properties of the flour on the relationship between the duration and intensity of the mixing and the quality of the dough being produced has been confirmed. This made feasibility to create programs for the dough-mixing machine based on the results of cluster analysis, which provides an opportunity to obtain additional useful information for automation of the control process. Therefore, it is proposed to implement an algorithm for automatically selecting a dough mixing program and correcting it during mixing by using artificial neural networks.

The correction depends on the rheological properties of the dough, which is primarily affected by the strength of the flour. It provides the process of its formation with the necessary structural-mechanical properties (elasticity, plasticity, viscosity), which are combined and constantly change during the technological process. The evaluation of these properties has more integral features and is more objective. For this purpose two variants can be used: 1) experimental design on a pharinograph with registration of a pharyngogram in electronic form; 2) measuring and recording the active power consumed by the electric drive of the mixing element during the dough mixing. Further, according to the registered data, an automatic calculation of the necessary indicators of the property of the dough is carried out and the parameters of the mixing program are corrected.

Ключові слова: якість борошна, заміс тіста, хлібобулочні вироби, кластеризація, нейронна мережа, автоматизація управління.

Keywords: flour quality, dough mix, bakery products, clustering, neural network, control automation.

Вступ

Хлібобулочні вироби належать до одної з важливих груп продуктів харчування людини тому що містять велику кількість корисних для здоров'я речовин. Саме тому задачі підтримання і підвищення їх якості є досить актуальними для добробуту суспільства та комерційного успіху хлібопекарних підприємств.

Найбільш потужним представником цієї галузі в Одеській області є ТМ "Одеський хлібозавод №4", яка має в управління виробничі майданчики розташовані в м. Одеса (№ 2 і № 4), м. Білгород-Дністровський (№ 3) та м. Котовськ (№1), а загальна виробнича потужність дозволяє випускати до 200-220 т продукції на добу. Проаналізувавши основні процеси хлібопекарного виробництва на цьому підприємстві, були зроблені висновки в необхідності більш детального дослідження процесів підготовки сировини для замісу тіста та його реалізацію.

Заміс тіста є одним із найважливіших технологічних процесів виробництва. Від нього в значній мірі залежить подальший хід успішного виготовлення хлібу і досягнення таких показників, які відповідають належній якості. При прийомі борошна на підприємство в лабораторних умовах проводять його випробування для визначення фізико-хімічних показників (вологість, число падіння (ЧП), кількість клейковини (КК) та якість клейковини (ЯК), білість, крупність помелу). Також, відбувається визначення реологічних властивостей тіста (вологість, тиск, індекс розтяжності, еластичність) на відповідних приладах. Результати випробувань обумовлюють якість готової продукції. Якщо показники знаходяться в межах норми та виконується регламент технологічного процесу, то на виході маємо отримати хліб з правильною формою, хорошими смаковими властивостями і ароматом, еластичним м'якушем і нормальним забарвленням кірки [1].

Нестабільність показників, що визначають майбутню споживчу і харчову цінність готових виробів, залежить від різних об'єктивних причин. Наприклад, погодні умови дуже сильно впливають не тільки на врожайність, а ще на ЯК і КК. Якщо холодна погода навесні та на початку літа, то не утворюється достатньої кількості клейковини, а внаслідок рясних дощів формується слабка клейковина (рис.1). Спекотна погода на момент дозрівання забезпечує високу якість зерна за рахунок активного росту крохмальних гранул, а часті дощі під час збору врожаю сприяють зниженню показника ЧП.

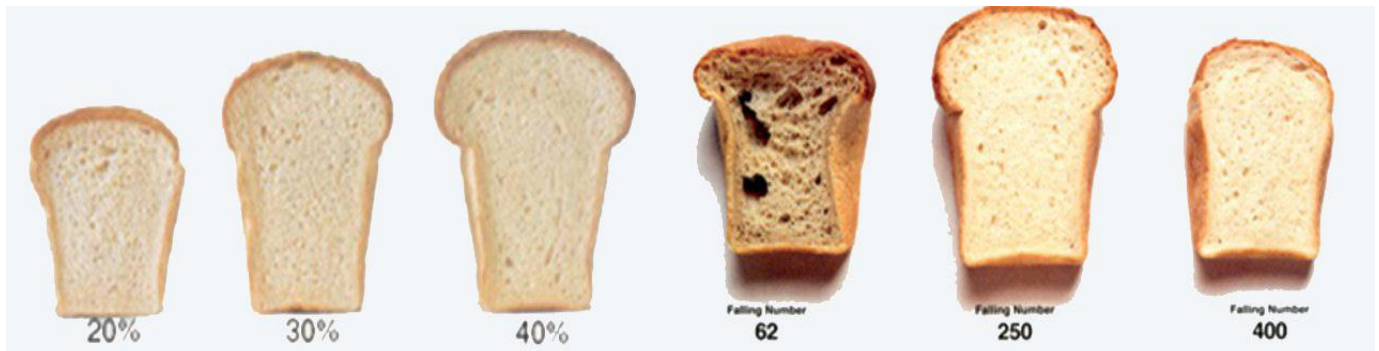


Рис. 1 – Вплив КК та ЧП на якість хлібу

Мета дослідження

Метою цієї роботи є підвищення ефективності управління замісом тіста для нівелювання коливань властивостей пшеничного борошна та комплексного формування якості хлібобулочних виробів. Для досягнення цієї мети необхідно вирішити наступні задачі:

- 1) проведення аналізу партій борошна та визначення їх кластерної структури;
- 2) встановлення залежності між кластерами партій борошна та програмами замісу тіста;
- 3) удосконалення програм замісу тіста на основі його реологічних властивостей.

Матеріали і методи

Для замісу тіста автоматично розраховується необхідна кількість інгредієнтів. Під час замісу може змінюватися швидкість (інтенсивність) і тривалість. В процесі проведення експериментів по визначенню необхідної тривалості та інтенсивності замісу тіста для борошна з різними показниками якості, були підтверджені такі залежності:

- 1) при збільшенні показника КК необхідно збільшувати швидкість і тривалість замісу тіста;
- 2) при збільшенні показника ЯК необхідно зменшувати швидкість і тривалість замісу;
- 3) при збільшенні показника ЧП тривалість і швидкість замісу необхідно збільшувати, також для ЧП зі значеннями до 350сек рекомендована низька швидкість замісу, а вище - висока швидкість.

Враховуючи ці висновки технологами були розроблені програми замісу тіста для тістомісильної машини періодичної дії фірми «Diosna» (рис.2), які відрізняються різними режимами функціонування. Дана модель оснащена двома швидкостями обертання тістомісильного органу, завдяки яким проводиться заміс тіста: 1-а швидкість – 72 об/хв, 2-а швидкість – 154 об/хв.



Рис. 2 – Тістомісильна машина Diosna SP 240

Їх відмінність у тому, що для двох етапів замісу, які відбуваються на різних швидкостях, встановлюються різні інтервали часу. За допомогою першої швидкості усі інгредієнти ретельно змішуються до однорідної маси, друга швидкість служить для придання тісту необхідної структури. Фрагмент таблиці програм замісу з різними режимами роботи тістомісильної машини наведено на рис.3.



Нестабільна якість поставленого на підприємство борошна, присутність людського фактору під час вибору необхідної програми замісу тіста впливає на якість готової продукції. Для вирішення цієї проблеми пропонується алгоритм автоматичного встановлення тривалості та інтенсивності замісу тіста в залежності від вхідних показників якості борошна (тобто визначення головних параметрів програми замісу на початку процесу) та оперативне визначення реологічних властивостей тіста з метою послідовного корегування режимів роботи тістомісильної машини.

Номер программы	5	12	14	15	16	19	20
Смешивание, сек	60		60	60	60	60	60
1-я скорость, сек	240	90	60	120	170	170	150+60
Отлежка, сек	30						30
2-я скорость, сек	420	120	90	300	190	120	120
Выгрузка, сек			120	120	120	120	120

Рис. 3 – Режимы работы тістомісильної машини

Дослідження якості партій борошна може відбуватися за допомогою кластерного аналізу. Його сутність полягає у здійсненні класифікації об'єктів дослідження за допомогою численних обчислювальних процедур. На відміну від інших методів, цей вид аналізу дає можливість класифікувати об'єкти не за однією ознакою, а за декількома одночасно. Для цього вводяться відповідні показники, що характеризують певну міру близькості за всіма класифікаційними параметрами. Мета кластерного аналізу полягає в пошуку наявних структур, що виражається в утворенні груп схожих між собою об'єктів – кластерів. Це означає, що методи кластеризації необхідні для виявлення в даних такої структури, яку нелегко знайти при візуальному обстеженні або за допомогою експертів [2].

Алгоритм автоматичного вибору програми замісу тіста для тістомісильної машини та її корегування під час замісу може бути реалізовано за допомогою штучних нейронних мереж (ШНМ), які є математичними моделями, що спроектовані за прикладом дії біологічних нейронних мереж. Основою ШНМ є модель людського мозку, який складається із мільярдів нейронів, що з'єднанні синапсами. Аналогічно, ШНМ складаються з обчислювальних елементів які називають штучними нейронами. Зв'язки між нейронами визначають характеристики як мозку так і штучних нейронних мереж. Нейронні мережі володіють наступними перевагами: паралелізм, можливість навчання та здатність до узагальнення. Людський мозок володіє високим ступенем паралелізму оскільки кожен нейрон зв'язаний із сотнями інших нейронів одночасно. Тому ШНМ найкраще підходять для розпізнання об'єктів, що використовують паралелізм. Іншою важливою перевагою нейронних мереж над звичайними алгоритмами є їх здатність до навчання [3].

Результати дослідження та їх обговорення

Першим кроком є проведення кластерного аналізу партій борошна за фізико-хімічними показниками. Його метою стає розбиття вибірки партій (об'єктів) на кластери (групи) зі схожими показниками. Для цього було обрано програмний модуль «Zhu&Vog» [4]. Він реалізує процедуру вдосконаленої кластеризації даних на основі методу k-means, а його відмінною рисою стали алгоритми автоматичного розрахунку кількості кластерів та визначення положень початкових центрів кластерів (центроїдів) (рис. 4,5). В результаті проведення кластерного аналізу були отримані 27 кластерів.

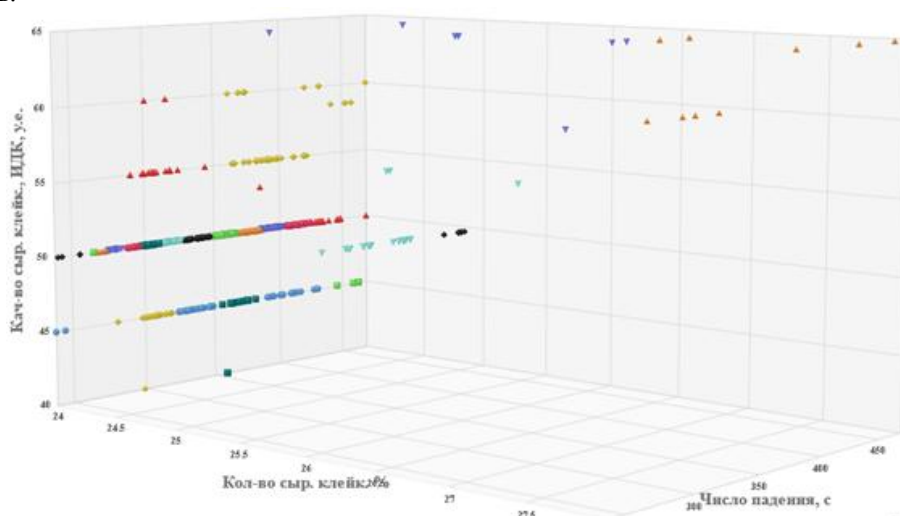


Рис. 4 – 3D модель результату кластеризації



Кл. 6				Кл. 5				Кл. 7				Кл. 4			
Инф	Кол-во сыр. клейк. %	Кач-во сыр. клейк., ИДК, у.е.	Число падения, с	Инф	Кол-во сыр. клейк. %	Кач-во сыр. клейк., ИДК, у.е.	Число падения, с	Инф	Кол-во сыр. клейк. %	Кач-во сыр. клейк., ИДК, у.е.	Число падения, с	Инф	Кол-во сыр. клейк. %	Кач-во сыр. клейк., ИДК, у.е.	Число падения, с
1	24	45	402	6	24	50	390	31	27	65	354	33	24	60	373
2	24	45	409	18	25	50	378	32	27	65	391	34	24	60	369
3	24	45	402	19	25	50	363	37	27	60	421	35	24	60	373
4	24	50	413	20	25	50	363	40	27	60	441	36	24	60	369
5	24	45	410	21	25	50	373	45	27	65	415	38	24	60	374
7	25	50	449	22	25	50	373	49	28	65	457	39	24	60	374
8	25	50	449	23	24	50	364	50	28	65	426	41	24	55	373

Рис. 5 – Фрагмент результатів кластеризації у табличному вигляді

Дослідження результатів замісу при різних програмах, що використовуються на підприємстві, підтвердили вплив показників якості борошна на тривалість замісу та обумовили доцільність вибору програми на основі результатів кластерного аналізу (варіант, де було отримано 11 кластерів). Тобто певні параметри замісу тіста були зв'язані з партіями борошна, що належали до якогось конкретного кластеру. На базі цих залежностей в IBM SPSS Modeler була створена модель нейронної мережі, що зображена рис.6.

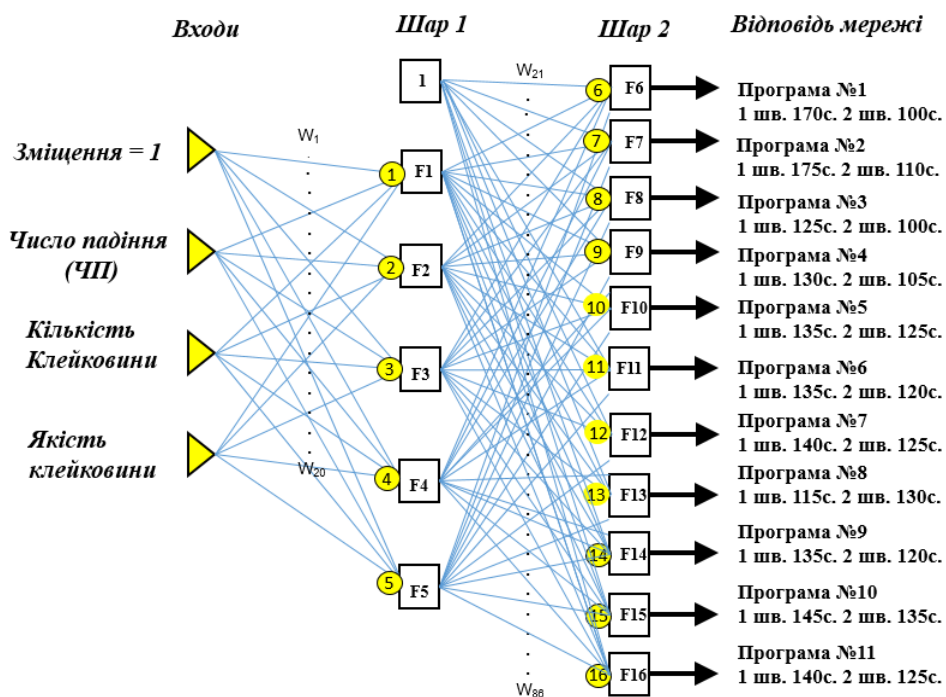


Рис. 6 – Модель нейронної мережі



Також були розраховані коефіцієнти зв'язків, функція активації та зважені суми входів (рис.7).

$$W_1 = -2,379, W_2 = 3,331, W_3 = 1,649, W_4 = -0,124,$$

$$W_5 = 1,907, W_6 = -1,786, W_7 = -2,706, W_8 = 2,507,$$

$$W_9 = -0,716, W_{10} = -2,074$$

$$W_{58} = 0,372, W_{59} = 3,373, W_{60} = 2,399,$$

$$W_{61} = -6,765, W_{62} = 2,572, W_{63} = -0,001,$$

$$W_{64} = 3,682, W_{65} = 1,473, W_{66} = -5,983,$$

$$W_{67} = 1,562, W_{68} = 2,577, \dots$$

Функція активації: ① $S_1 = 1 \cdot W_1 + x_2 \cdot W_6 + x_3 \cdot W_{11} + x_4 \cdot W_{16}$

$$F_a = \frac{1}{1 + e^{-x}}$$

$$F_1 = F_a(S_1)$$

⑬ $S_{16} = 1 \cdot W_{31} + F_1 \cdot W_{42} + F_2 \cdot W_{53} + F_3 \cdot W_{64} + F_4 \cdot W_{75} + F_5 \cdot W_{86}$

$$F_{16} = F_a(S_{16})$$

Рис.7 – Розрахункова частина нейронної мережі

До вхідних параметрів нейронної мережі належать показники якості борошна (ЧП, ІДК, КК). На виході отримуємо номер необхідної програми. Модель обумовлює вибір тієї чи іншої програми в залежності від показників якості борошна. В подальшому її реалізовано у програмному модулі, що відповідає класу систем підтримки прийняття рішень.

Але окрім числа падіння, кількості та якості клейковини у борошна є ще велика кількість показників, яка впливає на якість готової продукції. Отже виникає необхідність отримання інформації про стан тіста, безпосередньо, під час замісу та корегування програм замісу у поточний момент часу. Для цього були досліджені структурно-механічні властивості тіста. В більшості випадків вони вимірюються за допомогою такого приладу, як фаринограф Брабендера (Brabender). Крива, яку викреслює самопис приладу, називається фаринограмою (рис.8). Вона відображає такі властивості тіста: *a* – консистенція тіста, *b* – тривалість утворення тіста (це час, протягом якого консистенція тіста досягає свого максимуму), *c* – еластичність і розтяжність тіста, *d* – стабільність (стійкість) тіста, *e* – розрідження тіста [5].

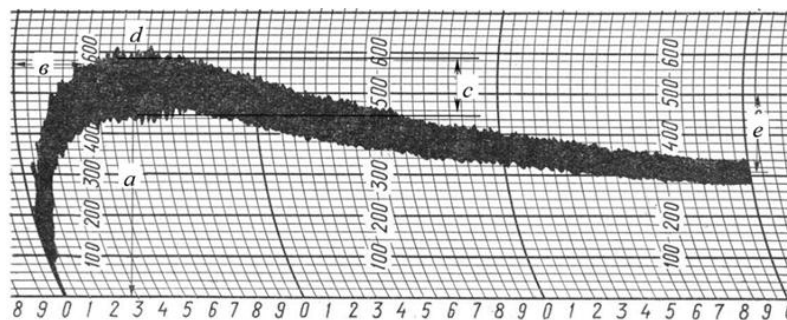


Рис. 8 – Фаринограма

На процес формування тіста з необхідними структурно-механічними властивостями впливають хлібопекарські властивості борошна, а саме його сила. Сила борошна – це здатність його утворювати тісто, яке має після замісу і в процесі бродіння, розробки, вистоювання певні реологічні властивості. Чим сильніше борошно, тим вища його водопоглинальна здатність і тим більший вихід готових виробів. По фаринографі визначається кількість води, витраченої для одержання тіста оптимальної консистенції (500 од. приладу). Тож доцільно виявляти максимальну кількість води для борошна з певної партії та момент часу, коли необхідно припинити заміс. Процес запису результатів експерименту реалізований за допомогою прикріплення потенціометру до стрілки самописця фаринографа. Його положення змінюється за рухом стрілки. Зміну напруги в діапазоні 0-5 В фіксує АЦП (аналогово-цифровий перетворювач), далі відбувається реєстрація та запис значень приладу у цифрову вигляді (рис.9).

Другим варіантом початку рішення задачі отримання тіста оптимальної консистенції запропоновано встановлення вимірювального перетворювача активної потужності трифазного струму за допомогою якого реєструється активна потужність споживана електроприводом місильного органу тістомісильної машини. Він призначений для лінійного перетворення активної потужності трьох ланцюгів змінного струму в уніфікований вихідний сигнал постійного струму з діапазоном вимірювання: 0-1 (0-0,5) або 0-5 (0-2,5). Отриманий сигнал подається на двоканальний вимірювач-регулятор ОВЕН ТРМ202 з RS-485, що застосовується для його реєстрації та запису у цифровому вигляді (рис.10).

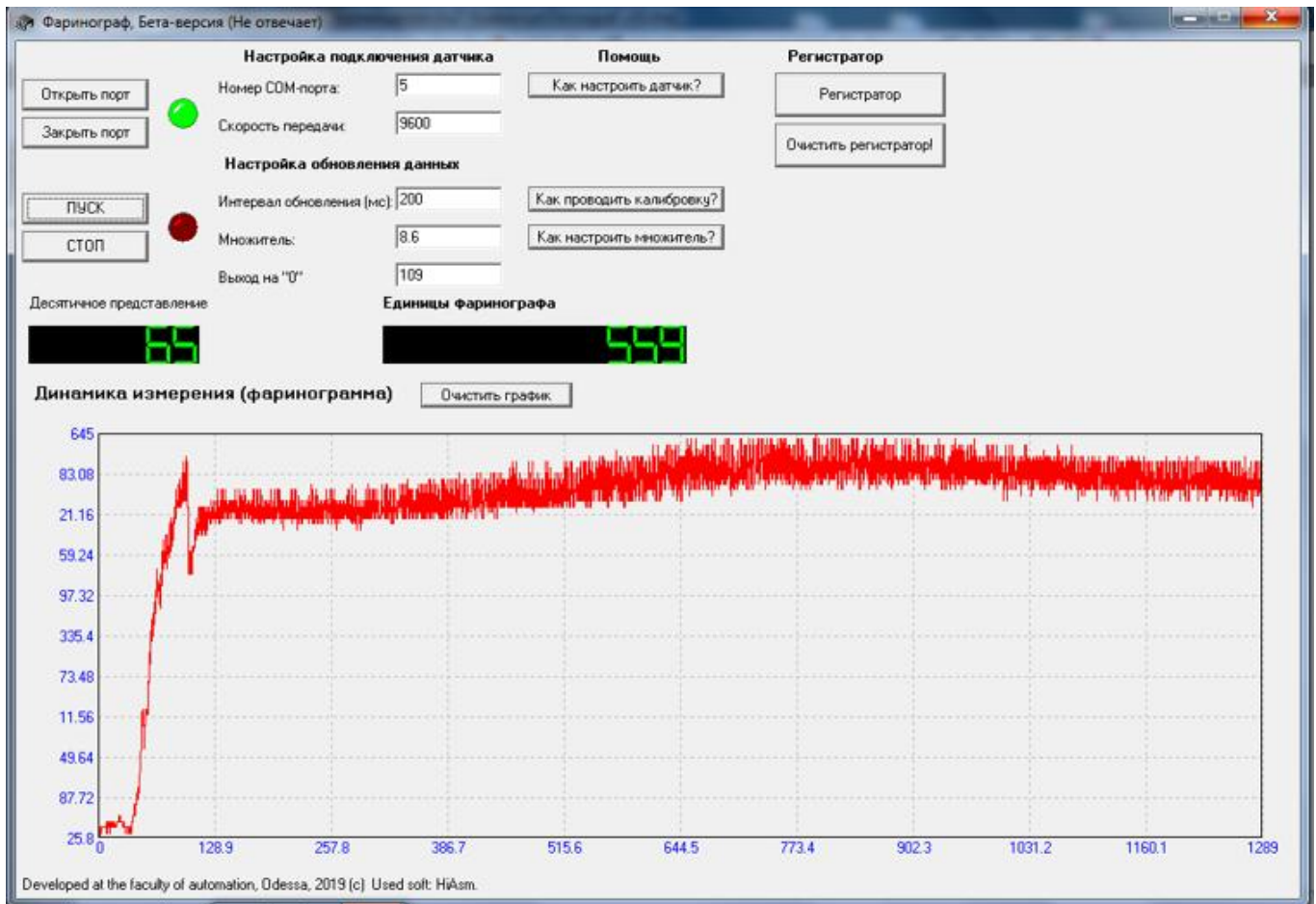


Рис. 9 – Результаты регистрации значений фаринограммы

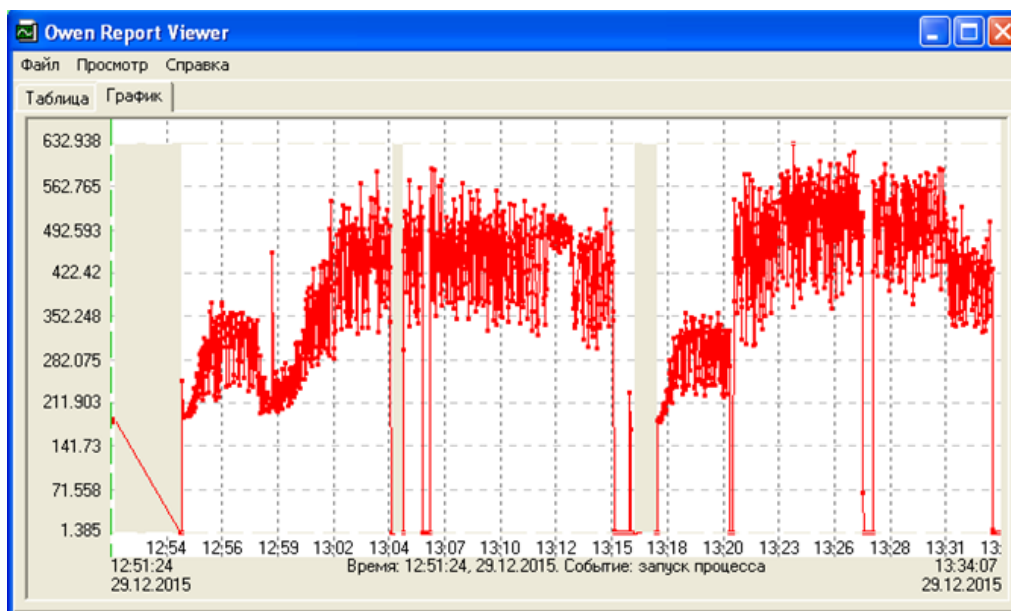


Рис. 10 – Результаты регистрации активной мощности потребляемой электроприводом мисильного органа



По отриманим даним в автоматичному режимі розраховуються найбільш важливі показники структурно-механічних властивостей тіста. Це дозволяє провести автоматичну корекцію параметрів програми замісу тіста. В основі алгоритму, що реалізує цю корекцію може виступати модель штучної нейронної мережі. Він буде визначати коли консистенція тіста досягає свого оптимуму та з'являється необхідність припинити заміс. Така можливість непрямого визначення точок переходу в структурах тіста при замісі дозволить нам розраховувати на виготовлення тіста, яке набуває максимальної якості. Це в свою чергу, дозволить домогтися оптимального регулювання механічного впливу на борошно в цілому, що в кінцевому підсумку приведе до можливості контролю і зміни його водопоглинальної здатності, а отже до підвищення якості та збільшення виходу готової продукції і прибутку підприємства.

Висновки.

1. На підприємстві існує проблема отримання якісного хліба, яка виникає внаслідок постійної зміни властивостей основної сировини - борошна. Проаналізувавши цю проблему, було виділено ряд показників, які впливають на якість хлібу. Цей вплив було виявлено ще на стадії виготовлення тіста.

2. Для пошуку можливостей вирішення проблеми запропоновано проведення аналізу кластерної структури партій борошна за показниками його якості. Завдяки цьому отримана додаткова корисна інформація для автоматизації процесу замісу тіста.

3. Дослідивши результати замісу при різних програмах, підтвердився вплив показників якості борошна на тривалість та інтенсивність замісу та було вирішено створення програм для тістомісильної машини на основі результатів кластерного аналізу.

4. Алгоритм автоматичного вибору та корекції програми замісу тіста для тістомісильної машини було реалізовано за допомогою штучних нейронних мереж.

Список використаних джерел

- [1] Основні технологічні процеси виробництва хліба. URL: <https://studfiles.net/preview/5740103/page:3/> (дата звернення: 10.04.2019).
- [2] Кластерний аналіз. URL: https://pidruchniki.com/11800912/ekonomika/klasterniy_analiz (дата звернення: 13.06.2019).
- [3] Штучні нейронні мережі. URL: <http://archive.ws-conference.com/wp-content/uploads/pw0060.pdf> (дата звернення: 13.06.2019).
- [4] О.М. Жигайло, В.В. Борис. Кластерний аналіз даних в автоматизованих системах простежуваності//Автоматизація технологічних та бізнес-процесів. –О.,2018. – Том 10, №1 – С. 39-46.
- [5] Т.Є. Лебеденко, Г.Ф. Пшенишнюк. Технологія хлібопекарського виробництва - ОНАХТ, О.,2009. – С. 50-55.

References

- [1] Osnovni tehnologichni procesy virobnictva hliba. [Online] Available: <https://studfiles.net/preview/5740103/page:3/> [Accessed April 10, 2019].
- [2] Klasterniy analiz. [Online] Available: https://pidruchniki.com/11800912/ekonomika/klasterniy_analiz [Accessed June 13, 2019].
- [3] Shtuchni neyronni mereji. [Online] Available: <http://archive.ws-conference.com/wp-content/uploads/pw0060.pdf> [Accessed June 13, 2019].
- [4] O.M. Zhigaylo, V.V. Boris, "Klasterniy analiz danih v avtomatizovanih sistemah prostezhuvanosti," Avtomatizatsiya tehnologichnih ta biznes-protsesiv", vol.10, no.1, pp.39-46, 2018.
- [5] T.E. Lebedenko, G.F. Pshenishnuk, Tejnologiya hlibopekars'kogo virobnitstva - ONAFT, O.,2009. – pp. 50-55. <https://doi.org/10.1632/prof.2009.2009.1.50>



УДК 004.056.55

ЗАХИСТ ДАНИХ ЗАСОБОМ ЦИФРОВОГО ПІДПИСУ

Плотніков В. М., Борцова Ю. В.

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation of technological and business - processes.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>

DOI:

Анотація.

У цей час багато підприємств використовують ті або інші методи безпаперової обробки й обміну документами. Використання подібних систем дозволяє значно скоротити час, затрачуваний на оформлення угоди й обмін документацією, удосконалити й зменшити кошти на процедуру підготовки, доставки, обліку й зберігання документів, побудувати корпоративну систему обміну документами. Однак при переході на електронний документообіг встає питання авторства документа, вірогідності й захисту від перекручувань.

Найбільш зручним засобом захисту електронних документів від перекручувань, що дозволяють при цьому однозначно ідентифікувати відправника, повідомлення, є електронний цифровий підпис (ЕЦП). Отже, що ж таке електронний цифровий підпис? Закон дає наступне визначення даного терміна: «електронний цифровий підпис - реквізит електронного документа, призначений для захисту даного електронного документа від підробки, отриманий у результаті криптографічного перетворення інформації з використанням закритого ключа електронного цифрового підпису й що дозволяє ідентифікувати власника сертифіката ключа підпису, а також установити відсутність перекручування інформації в електронному документі». Из цього визначення видно, що ЕЦП формується за допомогою спеціальних математичних алгоритмів на основі властиво документа й когось «закритого ключа», що дозволяє однозначно ідентифікувати відправника повідомлення.

Abstract.

At this time many enterprises use these or those methods of paperless processing and an exchange of documents. Use of similar systems allows to reduce considerably time spent for registration of the agreement and an exchange by the documentation, to improve and reduce the price of procedure of preparation, delivery, the account and storage of documents, to construct corporate system of an exchange of documents. However at transition to electronic document circulation there is a question of authorship of the document, reliability and protection from fakes.

The most convenient means of protection of electronic documents from fakes which allow to identify unequivocally thus of the sender, the message, is the electronic digital signature (EDS). So, what such the electronic digital signature? The law defines the following of the given term: « The electronic digital signature - the requisite of the electronic document intended for protection of the given electronic document from a fake, received as a result of cryptographic transformation of the information with use of the closed key of the electronic digital signature also that allows to identify the owner of the certificate of a key of the signature and also to establish absence fakes information in the electronic document ». From this definition it is visible, that EDS it is formed by means of special mathematical algorithms on the basis of it is peculiar the document and someone « the closed key » that allows to identify unequivocally the sender of the message. We shall consider more in detail the mechanism of functioning of systems EDS.

Ключові слова: електронний документ, безпаперовий документообіг, захист інформації, електронний цифровий підпис, асиметричні криптографічні алгоритми, сертифікат, таємний ключ, відкритий ключ.

Keywords: electronic document, paperless document management, information security, electronic digital signature, asymmetric cryptographic algorithms, certificate, secret key, public key.

Вступ

Електронний цифровий підпис функціонує на основі криптоалгоритмів з асиметричними (відкритими) ключами й інфраструктури відкритих ключів. Проблема традиційних алгоритмів шифрування із симетричними ключами полягає в тім, що шифрування й дешифрування відбувається за допомогою того самого ключа. У зв'язку із цим виникає питання про обмін ключами. Для того, щоб зробити захищений обмін інформацією, користувачам необхідно обмінятися ключами, при чому використовувати для цього обміну альтернативні засоби передачі інформації, оскільки при обміні нешифрованою інформацією з електронної пошти висока ймовірність дискредитації ключа. Ідеальним, з погляду безпеки, варіантом представляється особистий обмін ключовими носіями, однак він є найбільш ресурсомістким. У криптосистемах на основі асиметричних ключів для шифрування й дешифрування використовується пара ключів - секретний і публічний ключі, унікальні для кожного користувача, і цифровий



сертифікат. Цифровий сертифікат являє собою розширення відкритого ключа, що включає не тільки сам ключ, але й додаткову інформацію, що описує приналежність ключа, час використання, доступні криптосистеми, назва центра, що засвідчує, і т.д. Для реалізації подібної взаємодії використовуються спеціальні структури, що засвідчують центри. Їхня основна функція - поширення публічних і секретних ключів користувачів, а також верифікація сертифікатів. центри, Що Засвідчують, можуть поєднуватися в ланцюжки. Вищестоящий (кореневий) центр, що засвідчує, може видати сертифікат і права на видачу ключів нижчестоящому центру. Той, у свою чергу, може видати права ще іншому нижчестоящому центру й так далі, при чому, сертифікат, виданий одним із центрів, може бути верифіцирован кожним із серверів у ланцюжку¹. У такий спосіб існує можливість установити центр поширення секретних ключів у безпосередній близькості від користувача, що вирішує проблему дискредитації ключа при передачі по мережах зв'язку. У випадку з ЄЦП процес обміну повідомленням виглядає в такий спосіб:

1. відправник одержує в центра, що засвідчує, секретний ключ;
2. використовуючи цей ключ, формує електронний цифровий підпис і відправляє лист;
3. одержувач за допомогою публічного (загальнодоступного) ключа й цифрового сертифіката, отриманого в центра, що засвідчує, установлює авторство документа й відсутність перекручувань.

Цифровий підпис забезпечує:

1. Посвідчення джерела документа. Залежно від деталей визначення документа можуть бути підписані такі поля, як «автор», «внесені зміни», «мітка часу» і т.д.
2. Захист від змін документа. При будь-якій випадковій або навмисній зміні документа (або підпису) зміниться геш, отже, підпис стане недійсною.
3. Неможливість відмови від авторства. Тому що створити коректний підпис можна лише, знаючи закритий ключ, а він відомий тільки власникові, то власник не може відмовитися від свого підпису під документом.

При використанні надійної геш-функції, вичислительно складно створити підроблений документ із таким же гешем, як у справжнього. Однак, ці погрози можуть реалізуватися через слабості конкретних алгоритмів геширования, підпису, або помилок у їхніх реалізаціях.

Проте, можливі ще такі погрози системам цифрового підпису:

1. Зловмисник, викравши закритий ключ, може підписати будь-який документ від імені власника ключа.
2. Зловмисник може обманом змусити власника підписати який-небудь документ, наприклад використовуючи протокол сліпого підпису.
3. Зловмисник може підмінити відкритий ключ власника (див. керування ключами) на свій власний, видаючи себе за нього.

Електронний цифровий підпис є найбільш перспективним і широко використовуваним у світі способом захисту електронних документів від підробки й забезпечує високу вірогідність повідомлення. Закони дають можливість використання систем ЄЦП для обміну фінансовими й іншого критичними для діловодства документами.

Алгоритми шифрування можна розділити на два класи - симетричні й асиметричні.

Симетричні алгоритми шифрування

У симетричних алгоритмах для зашифрування й расшифрованія інформації використовується той самий криптографічний ключ. Щоб забезпечити взаємодія з будь-яким абонентом Мережі, у кожного учасника повинне бути сховище масиву секретних криптографічних ключів. Крім того, необхідно вирішити проблему централізованої генерації ключової інформації й забезпечити її безпечною доставку до всіх учасників.

Асиметричні алгоритми шифрування

В асиметричних криптографічних алгоритмах використовується пара математично взаємозалежних ключів, один із яких не є секретним і може бути розміщений у довіднику відкритих ключів. Якщо абоненту А необхідно направити конфіденційне повідомлення абоненту Б, він вибирає в довіднику відкритий ключ абонента Б и використовує його для шифрування документа. Для його расшифрованія абонент Б використовує свій секретний ключ. Таким чином, будь-який абонент Мережі може зашифрувати повідомлення, що направляється іншому абоненту, а розшифрувати його зможе тільки власник відповідного секретного ключа. Основний недолік - низька швидкодія: за деякими оцінками, асиметричні алгоритми в 100 - 1000 разів повільніше симетричних. На практиці найчастіше використовують комбіновані схеми. Абонент А сам генерує деякий випадковий ключ для симетричного алгоритму й з використанням асиметричного алгоритму на відкритому ключі абонента Б зашифровує його й передає адресатові. Одержавши зашифрований ключ, абонент Б розшифровує його з використанням свого секретного ключа. У результаті абоненти А и Б одержують унікальний ключ симетричного алгоритму, що і застосовується для шифрування властиво переданих даних. При наступній взаємодії процес повторюється, забезпечуючи кожний сеанс зв'язку різними ключами. Тому що асиметричний алгоритм застосовується для обробки невеликого обсягу інформації - тільки ключа, час на шифрування в цілому істотно не збільшується. Асиметричні алгоритми шифрування

Розвиток основних типів криптографічних протоколів (ключовий обмін, електронно-цифровий підпис (ЄЦП), аутентифікація й ін) було б неможливо без створення відкритих ключів і побудованих на їхній основі асиметричних протоколів шифрування.

Основна ідея асиметричних криптоалгоритмів полягає в тому, що для шифрування повідомлення використовується один ключ, а при дешифруванні - іншої. Крім того, процедура шифрування обрана так, що вона необоротна навіть по відомому ключі шифрування - це друга необхідна умова асиметричної криптографії. Тобто, знаючи ключ шифрування й зашифрований текст, неможливо відновити вихідне повідомлення - прочитати його



можна тільки за допомогою другого ключа - ключа дешифрування. У цілому система переписки при використанні асиметричного шифрування виглядає в такий спосіб. Для кожного з N абонентів, ведучих переписку, обрана своя пара ключів: "відкритий" E_j і "закритий" D_j , де j – номер абонента. Всі відкриті ключі відомі всім користувачам мережі, кожний закритий ключ, навпаки, зберігається тільки в того абонента, якому він належить. Якщо абонент, скажемо під номером 7, збирається передати інформацію абонентові під номером 9, він шифрує дані ключем шифрування E_9 і відправляє її абонентові 9. Незважаючи на те, що всі користувачі мережі знають ключ E_9 , можливо, мають доступ до каналу, по якому йде зашифроване послання, вони не можуть прочитати вихідний текст, тому що процедура шифрування необоротна по відкритому ключі. І тільки абонент №9, одержавши послання, робить над ним перетворення за допомогою відомого тільки йому ключа D_9 і відновлює текст послання. Помітьте, що якщо повідомлення потрібно відправити в протилежному напрямку (від абонента 9 до абонента 7), те потрібно буде використовувати вже іншу пару ключів (для шифрування ключ E_7 , а для дешифрування – ключ D_7). Як ми бачимо, по-перше, в асиметричних системах кількість існуючих ключів пов'язане з кількістю абонентів лінійно (у системі з N користувачів використовуються $2*N$ ключів), а не квадратично, як у симетричних системах. По-друге, при порушенні конфіденційності k -ої робочої станції зломисник довідається тільки ключ D_k : це дозволяє йому читати всі повідомлення, що приходять абонентові k , але не дозволяє видаватися себе за нього при відправленні листів.

Приєм захисту на базі асиметричного шифрування

Розглянемо принципову схему вироблення й перевірки ЕЦП із застосуванням алгоритмів асиметричного шифрування.

Для вироблення ЕЦП підписується документ, що, піддається гешированию (тобто стиску деяким стандартним алгоритмом), а отриманий геш (іноді його називають дайджестом) зашифровується закритим ключем. Геширование застосовується для скорочення обсягу шифруемой інформації й підвищення тим самим продуктивності. Геш-Функція, не будучи взаємно однозначним відображенням, підбирається таким чином, щоб було практично неможливо змінити документ, зберігши результат геширования. По гешу неможливо відновити вихідний документ, але це й не потрібно, оскільки перевірка ЕЦП полягає в порівнянні розшифрованої відкритим ключем ЕЦП із гешем документа. Збіг з високим ступенем вірогідності гарантує, по-перше, незмінність документа (захист від підробки), і, по-друге, що його підписав власник закритого ключа.

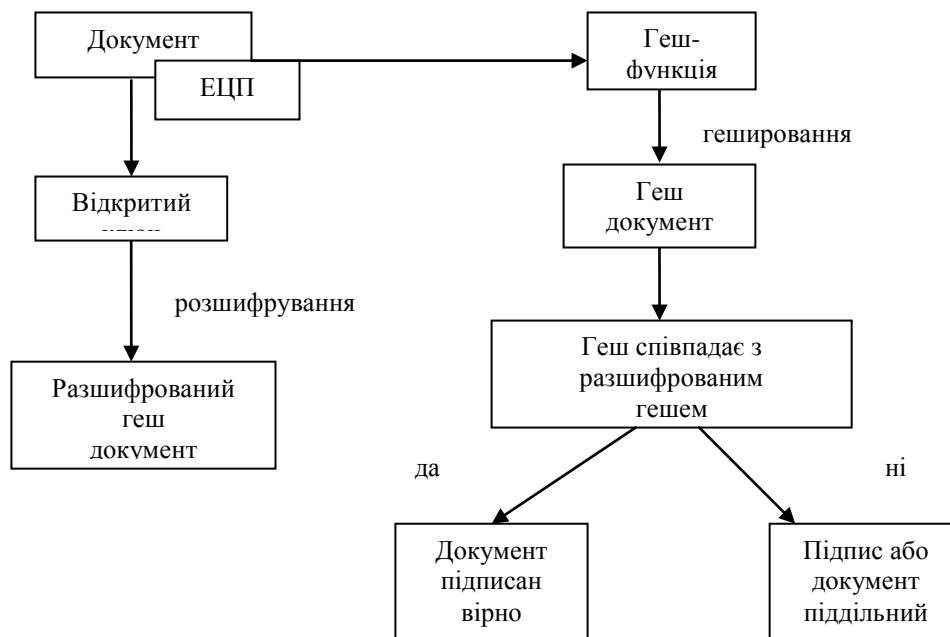


Рис. 1 – Схема перевірки ЕЦП при асиметричному шифруванні

У спеціалізованих криптосистемах, що підтримують тільки технологію ЕЦП, функції властиво шифрування відсутні. Для формування ЕЦП застосовується криптоалгоритм, що одержує на вході геш документа, закритий ключ і що виробляє ЕЦП. Для перевірки ЕЦП застосовується інший криптоалгоритм, що має на вході геш документа що перевіряється ЕЦП і відкритий ключ. Алгоритм перевірки видає позитивний або негативний результат залежно від правильності ЕЦП.

Аутентифікація суб'єкта зводиться до доказу того, що він володіє закритим ключем, що відповідає опублікованому відкритому. У криптосистемах, що підтримують технологію ЕЦП, доказ володіння полягає в тім, що суб'єкт підписує своїм закритим ключем присланий йому запит і посилає його назад. Якщо при перевірці виявилось, що запит підписаний правильно, то суб'єкт дійсно має відповідний закритий ключ. Необхідно вжити заходів, щоб



зловмисник, що перехопив підписаний запит, не міг згодом використовувати його, видаючи себе за правомірного власника закритого ключа. Для боротьби із цим досить, щоб запит був неповторюваним.

Асиметричні алгоритми шифрування дозволяють забезпечити конфіденційність при передачі повідомлення від одного суб'єкта іншому. Для цього відправникові досить зашифрувати повідомлення відкритим ключем одержувача. Оскільки розшифрувати повідомлення можна, тільки знаючи відповідний закритий ключ, це гарантує, що прочитати його не зможе ніхто, крім одержувача.

На практиці все повідомлення ніколи не шифрують відкритим ключем. Справа в тому, що продуктивність асиметричного шифрування істотно нижче симетричного, тому звичайно на початку інтерактивного сеансу зв'язку одна зі сторін генерує симетричний секретний ключ (ключ сеансу), шифрує його відкритим ключем іншої сторони й передає тільки цей зашифрований ключ. Інша сторона приймає й розшифровує його (очевидно, при цьому зберігається конфіденційність), а всі подальші повідомлення вже можуть бути зашифровані погодженим ключем сеансу. По закінченні сеансу цей ключ знищується.

Проблема аутентифікації даних й електронний цифровий підпис

При обміні електронними документами по мережі зв'язку істотно знижуються витрати на обробку й зберігання документів, убирається їхній пошук. Але при цьому виникає проблема аутентифікації автора документа й самого документа, тобто встановлення дійсності автора й відсутності змін в отриманому документі. У звичайній (паперовій) інформатиці ці проблеми вирішуються за рахунок того, що інформація в документі й рукописному підписі автора жорстко пов'язані з фізичним носієм (папером). В електронних документах на машинних носіях такого зв'язку немає.

При формуванні ЕЦП відправник насамперед обчислює геш-функцію $h(M)$ тексту, що підписується, M . Обчислене значення геш-функції $h(M)$ являє собою один короткий блок інформації m , що характеризує весь текст M у цілому. Потім число m шифрується секретним ключем відправника. Одержувана при цьому пара чисел являє собою ЕЦП для даного тексту M .

При перевірці ЕЦП одержувач повідомлення знову обчислює геш-функцію $m = h(M)$ прийнятого по каналі тексту M , після чого за допомогою відкритого ключа відправника перевіряє, чи відповідає отриманий підпис обчисленому значенню m геш-функції.

Принциповим моментом у системі ЕЦП є неможливість підробки ЕЦП користувача без знання його секретного ключа підписування.

Як підписуваного документ може бути використаний будь-який файл. Підписаний файл створюється з непідписаного шляхом додавання в нього однієї або більше електронних підписів.

Кожний підпис містить наступну інформацію:

1. дату підпису;
2. строк закінчення дії ключа даного підпису;
3. інформацію про особу, що підписала файл (Ф.И.О., посада, коротке найменування фірми);
4. ідентифікатор що підписав (ім'я відкритого ключа);
5. властиво цифровий підпис.

Для контролю цілісності електронного документа, доказу його авторства й ідентифікації учасників електронної угоди використовується механізм електронно-цифрового підпису (ЕЦП). Будується вона на ідеології асиметричного шифрування, але використовується як би "навпаки"

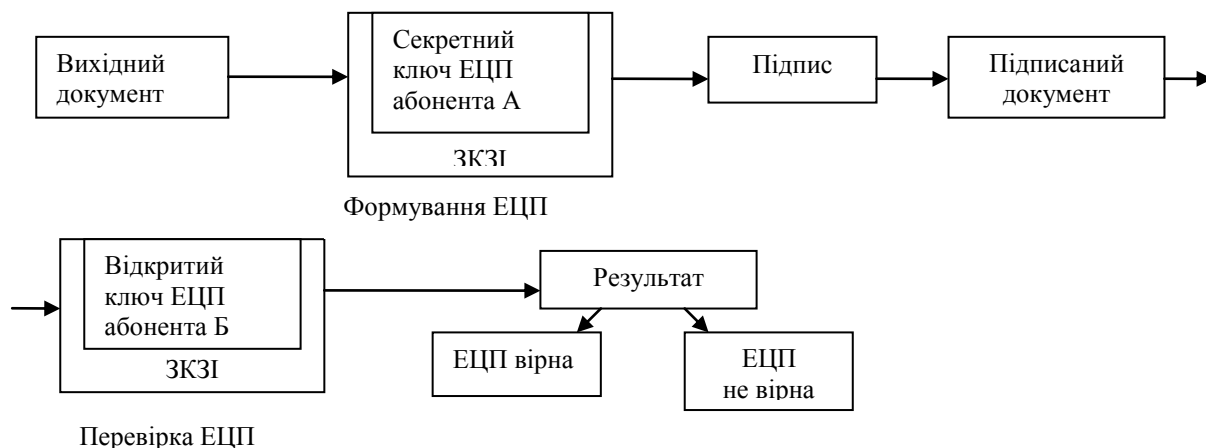


Рис. 2 – Схема формування й перевірки ЕЦП

При виконанні операції обчислення ЕЦП текст документа, що повинен бути підписаний, завантажується в засіб криптографічного захисту інформації (ЗКЗІ). Потім, через те, що шифрування за асиметричною схемою процес повільний, здійснюється обчислення значення так званої геш-функції - послідовності, що відображає, довільної довжини в послідовності фіксованої довжини. Результат обчислення називається геш-кодом, причому по геш-коду



документа відновити його текст не представляється можливим. У стандарті ДЕРЖСТАНДАРТ Р 34.11-94 довжина геш-кода дорівнює 256 біткам. Це означає, що вихідний текст довільної довжини в результаті обробки перетворюється в послідовність із 256 нулів і одиниць. При цьому різні документи не можуть мати однакового геш-кода.

Отриманий геш-код зашифровується з використанням асиметричного алгоритму на секретному ключі абонента А. Тому що довжина геш-кода невелика, операція не займає багато часу. Зашифрований геш-код документа й називається його електронно-цифровим підписом. Обчислена в такий спосіб ЕЦП абонента А передається разом з вихідним документом абонентові Б.

Одержавши текст документа, абонент Б виконує три операції. По-перше, обчислює геш-код повідомлення. По-друге, за допомогою асиметричного алгоритму й відкритого ключа абонента А розшифровує отриману разом з документом його ЕЦП. По-третє, порівнює результат розшифрування з обчисленим геш-кодом. У випадку збігу робиться висновок про те, що підпис вірний: автором документа дійсно є абонент А і після того як документ був підписаний, ніяких змін у його текст не вносилося.

Дійсно, якщо в процесі передачі в текст документа була внесена зміна (навмисне або випадкове), те обчислений абонентом Б геш-код буде відрізнятися від того, котрий він одержить після розшифрування ЕЦП. Результат порівняння буде негативним і в тому випадку, якщо для формування ЕЦП був використаний ключ, відмінний від секретного ключа абонента А.

При веденні ділової переписки, при висновку контрактів підпис відповідальної особи є неодмінним атрибутом документа, що переслідує кілька мет:

1. Гарантування істинності листа шляхом звірення підпису з наявним зразком;
2. Гарантування авторства документа (з юридичної точки зору)
3. Виконання даних вимог ґрунтується на наступних властивостях підпису:
4. підпис автентичний, тобто з її допомогою одержувачеві документа можна довести, що вона належить що підписує;
5. підпис неподделиваема; тобто є доказом, що тільки та людина, чий автограф стоїть на документі, міг підписати даний документ, і ніхто інший.
6. Підпис нестерпний, тобто є частиною документа й тому перенести її на інший документ неможливо.
7. Документ із підписом є незмінним.
8. Підпис незаперечний.
9. Будь-яка особа, що володіє зразком підпису може впевнитися, що документ підписаний власником підпису.

Висновок

Розвиток сучасних засобів безпаперового документообігу, засобів електронних платежів немислимо без розвитку засобів доказу дійсності й цілісності документа. Таким засобом є електронно-цифровий підпис (ЕЦП), що зберегла основні властивості звичайного підпису.

Існує кілька методів побудови ЕЦП, а саме:

шифрування електронного документа (ЕД) на основі симетричних алгоритмів. Дана схема передбачає наявність у системі третьої особи - арбітра, що користується довірою обох сторін. Авторизацією документа в даній схемі є сам факт зашифрування ЕД секретним ключем і передача його арбітрові.

Використання асиметричних алгоритмів шифрування. Фактом підписання документа є зашифрування його на секретному ключі відправника.

Розвитком попередньої ідеї стала найпоширеніша схема ЕЦП - зашифрування остаточного результату обробки ЕД геш-функцією за допомогою асиметричного алгоритму.

Крім перерахованих, існують і інші методи побудови схем ЕЦП

- груповий підпис, що не заперечується підпис, довірена підпис і ін. Поява цих різновидів обумовлено розмаїттю завдань, розв'язуваних за допомогою електронних технологій передачі й обробки електронних документів.

Список використаних джерел

- [1] Смарт Н. Криптография.-М: Техносфера, 2005. -528с.
- [2] Молдовян Н.А., Молдован А.А. Введение в криптосистемы с открытым ключом. - СПб.: БХВ - Петербург, 2005. - 288 с. : ил.
- [3] Молдовян Н.А. Практикум по криптосистемам с открытым ключом. - СПб.: БХВ -Петербург, 2007. - 304 с: ил. Математические и компьютерные основы криптологии: Учеб пособие / Ю.С. Харин В.И. Берник, Г.В. Матвеев, С.В. Агиевич. -Мн.: Новое знание, 2003. - 382 с.
- [4] Фергюсон Н., Шнайер Б. Практическая криптография: Пер. с англ. - М.: Изд. Дом «Вильямс», 2005. - 424е.
- [5] Осипян В.О., Осипян К.В. Криптография в задачах и упражнениях.-М.: Гелиос АРВ, 2004.-144с.
- [6] Криптографические методы защиты информации. Совершенные шифры: Учеб. пособие/ А.Ю. Зубов. -М.: Гелиос АРВ, 2005. - 192с.
- [7] Мао, Венбо. Современная криптография: теория и практика: Пер. с англ. - М: Изд. Дом «Вильямс», 2005. -768с.
- [8] Введение в криптографию / Под ред. В.В. Яценко. -М.: 1998.
- [9] Защита информации в персональных ЭВМ / А.В.Спесивцев, В.А. Вегнер, А.Ю.Крутяков, В.В.Стрегин, ВЛСидоров. -М., 1993.



- [10] Коблиц Н. Курс теории чисел и криптографии.-М., 2001.
- [11] Нечаев В.И. Элементы криптографии. Основы теории защиты информации. - М., 1999.
- [12] Лекции по дискретной математике / Ю.В.Капитонова, С.Л. Кривой, А.А.Летичевский, Г.М. Луцкий / СПб.: БХВ ~ Петербург, 2004. - 624с.
- [13] Романец Ю.В., Тимофеев П.А., Шаньгин В.Ф. Защита информации в компьютерных системах и сетях. - М.: Радио и связь. - 1999, 328 с.
- [14] Шаньгин В.Ф. Информационная безопасность компьютерных систем и сетей. - Изд - во: Форум, 2007.-416с.
- [15] Саломаа А. Криптография с открытым ключом: Пер с англ.-М.: Мир, 1996. - 304 с.
- [16] Шеннон К.З. Теория связи в секретных системах. В кн. К.Э. Шеннона. "Работы по теории информации и кибернетике". - М.: ИЛД963.- С. 243-332.
- [17] Жельников В. Криптография от папируса до компьютера. -М.:АВГ,1997.-336 с.
- [18] Виноградов И.М. Основы теории чисел -М.: Наука, 1981.
- [19] Питерсон У., Уэлдон Э. Коды, исправляющие ошибки. Пер. с англ.-М.: Мир,1976. - 594с.
- [20] Диффи У., Хеллман М.Э. Защищенность и имитостойкость. Введение в криптографию //ТИИЗР.-1979. - Т.67, №3. - С. 71-109.
- [21] Месси Дж. Л. Введение в современную криптологию // ТИИЗР.-1988.-Т.76, №5. - С.24 -47.
- [22] Сמיד М.Э., Бранстед Д.К. Стандарт шифрования данных. Прошлое и будущее // ТИИЗР. -1988.-Т.76.- №5. -С.43-53.
- [23] В.Столлингс.Криптография и защита сетей. Принципы и практика. Изд-во Диалектика -2001. ~ 672с.
- [24] Правильный выбор криптографических средств: Обзор современной криптографической техники (по материалам зарубежной печати) // Защита информации. - 1994.-№1.-С.42-47.
- [25] ЧмораАЛ.Криптосистема с депонированием ключа//Соп пес 1997. - №3 - С.34-39.
- [26] ГОСТ Р 34.10 - 94. Информационная технология. Криптографическая защита информации Процедуры выработки и проверки электронной цифровой подписи на базе асимметричного криптографического алгоритма.

References

- [1] Smart N. Kryptohrafiya.-М: Tekhnosfera, 2005. -528p.
- [2] Moldovyan N.A., Moldovan A.A. Vvedeniye v kryptosystemy s otkryтым klyuchom. - SPb.: BKhV - Peterburh, 2005. - 288 p. : yl.
- [3] Moldovyan N.A. Praktikum po kryptosystemam s otkryтым klyuchom. - SPb.: BKhV -Peterburh, 2007. - 304 s: yl.Matematicheskiye y komp'yuternye osnovy kryptolohyy: Ucheb posobyе / Yu.S. Kharyn V.Y. Bernyk, H.V. Matveev, S.V. Ahyevych. -Mn.: Novoe znanye, 2003. - 382 p.
- [4] Ferhyuson N., Shnayer B. Prakticheskaya kryptohrafiya: Per. s anhl. - М.: Yzd. Dom «Vylyams», 2005. – 424p.
- [5] Osypyan V.O., Osypyan K.V. Kryptohrafiya v zadachakh y upravleniyakh.-М.: Helyos ARV, 2004.-144s.
- [6] Kryptohraficheskiye metody zashchyty ynformatsyy. Sovershennyye shyfry: Ucheb. posobyе/ A.Yu. Zubov. -М.: Helyos ARV, 2005. – 192 p.
- [7] Mao, Venbo. Sovremennaya kryptohrafiya: teoriya y praktika: Per. s anhl. - М: Yzd. Dom «Vylyams», 2005. -768p.
- [8] Vvedeniye v kryptohrafiyu / Pod red. V.V. Yashchenko. -М.: 1998.
- [9] Zashyta ynformatsyy v personalnykh ZVM / A.V.Spesyvtsev, V.A. Vehner, A.Yu.Krutyakov, V.V.Shrehyn, VLSydorov. -М., 1993.
- [10] Koblyts N. Kurs teoryy chysel y kryptohrafiy.-М., 2001.
- [11] Nechaev V.Y. Elementy kryptohrafiy. Osnovy teoryy zashchyty ynformatsyy. - М., 1999.
- [12] Lektsyy po dyskretnoy matematyke / Yu.V.Kapytonova, S.L. Kryvoy, A.A.Letychevskyy, H.M. Lutskyy / SPb.: BKhV ~ Peterburh, 2004. – 624p.
- [13] Romanets Yu.V., Tymofeyev P.A., Shanhyn V.F. Zashyta ynformatsyy v kompyuternykh systemakh y setyakh. - М.: Radyo y svyaz. - 1999, 328 p.
- [14] Shanhyn V.F. Ynformatsyonnaya bezopasnost kompyuternykh system y setey. - Yzd - vo: Forum, 2007.-416 p.
- [15] Salomaа A. Kryptohrafiya s otkryтым klyuchom: Per s anhl.-М.: Myr, 1996. - 304 p.
- [16] Shennon K.Z. Teoriya svyazy v sekretnykh systemakh. V kn. K.E. Shennona. "Raboty po teoryy ynformatsyy y kybernetyke". - М.: YLD963.- P. 243-332.
- [17] Zhelnykov V. Kryptohrafiya ot papyrusa do kompyutera. -М.:AVH,1997.-336 p.
- [18] Vynogradov Y.M. Osnovy teoryy chysel -М.: Nauka, 1981.
- [19] Pyterson U., Ueldon E. Kody, yspravlyayushchyye oshybky. Per. s anhl.-М.: Myr,1976. – 594 p.
- [20] Dyffy U. Khellman M.E. Zashchyshennost y ymytostoykost. Vvedeniye v kryptohrafiyu //TYYZR.-1979. - Т.67, №3. - P. 71-109.
- [21] Messy Dzh. L. Vvedeniye v sovremennuyu kryptolohyyu // TYYZR.-1988.-Т.76, №5. - P.24 -47.
- [22] Smyd M.E., Bransted D.K. Standart shyfrovanyya dannyyh. Proshloe y budushchee // TYYZR. -1988.-Т.76.- №5. -P.43-53.
- [23] V. Stollynhs. Kryptohrafiya y zashchyta setey. Pryntsypy y praktika. Yzd-vo Dyalektyka -2001. - 672 p.
- [24] Pravylnyy vybor kryptohraficheskyykh sredstv: Obzor sovremennoy



kryptohrafycheskoy tekhniky (po materialam zarubezhnoy pechaty) // Zashchyta ynformatsyy. - 1994.-№1.-P.42-47.

[25] Chmora A L. Krythhosystema s deponyrovanyem klyucha/Sop pes 1997. - №3 - P.34-39.

[26] HOST R 34.10 - 94. Ynformatsyonnaya tekhnopohyu. Kryptohrafycheskaya zashchyta ynformatsyy Protседury vyrabotky y proverky èlektronnoy tsyfrovoy podpysy na baze asymmetrychnoho kryptohrafycheskoho alhorytma.

УДК 66.012:66.048.3

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІЧНИХ РЕЖИМІВ ПРОЦЕСУ РЕКТИФІКАЦІЇ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ РУХЛИВИХ КЕРУЮЧИХ ВПЛИВІВ

Шейкус А. Р.

Український державний хіміко-технологічний університет, Дніпро, Україна

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5575-098X>

E-mail: a.sheykus@gmail.com

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation of technological and business - processes.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI:

Анотація. Підвищення якості керування об'єктами з розподіленими параметрами, до яких відноситься процес ректифікації, можливо досягти використанням рухливих впливів. Відомо, що переміщення за висотою колони точки подання живлення або перерозподіл даного потоку між двома контактними пристроями апарату дозволяє забезпечити недосяжні традиційним керуванням техніко-економічні показники стаціонарних режимів. При цьому перехідні процеси в колоні при використанні рухливих впливів залишилися недослідженими.

У статті розроблено математичну модель динаміки процесу ректифікації, що враховує рухливі керуючі впливи, а також досліджено особливості динамічних режимів роботи колони при їх використанні. В моделі передбачено можливість реалізації різних за формами і інтенсивностями збурень і керуючих впливів за декількома каналами одночасно або у визначені моменти часу. Модель дозволяє проводити розрахунки процесів багатокomпонентної і складної ректифікації, може використовуватися при моделюванні пускових режимів.

Процес ректифікації внаслідок використання рухливих впливів виходить зі стану динамічної рівноваги. Встановлено, що новий стаціонарний режим досягається регулюванням тиску наверху колони, рівнів в ємностях для збору кубового залишку і дистилляту. Запропоновано використання ПІД-регуляторів з впливами на витрати холодоагенту в конденсатор і продуктів поділу. Динамічна модель процесу доповнена описом даних контурів автоматичного регулювання.

З використанням розробленої моделі проведено обчислювальні експерименти на прикладі колони для поділу суміші метанол-вода. Доведено, що перехідні процеси при використанні рухливих керуючих впливів на процес ректифікації характеризуються допустимими показниками якості.

Abstract. Improving the control quality of objects with distributed parameters, including the rectification process, could be achieved by using mobile actions. It is known that moving along the column height of the feed supply point or redistributing a given flow between the apparatus' two contact devices allows getting the technical and economic indicators of stationary modes unattainable by using traditional control. Also, the transient responses in the column when using movable influences remained unstudied.

The article developed a mathematical model of the distillation process dynamics, considering mobile control actions, as well as there have been studied the dynamic modes' features of column operation when used them. The model allows implementing disturbances and control actions of various kinds and intensities via several channels simultaneously or at certain points of time. The model allows computing the processes of multicomponent and complex distillation, and can be used to compute the starting modes.



Due to mobile actions, the distillation process leaves the dynamic equilibrium state. It was established that a new stationary mode is achieved by regulating the pressure at the column top, the levels of the bottom product and distillate. There are proposed the PID controllers with effects on the refrigerant flow rate into the condenser and separation products. The process dynamic model is supplemented by a description of these automatic control loops.

By the developed model the computational experiments were carried out on the example of a column for separation of a methanol-water mixture. It is proved that transient responses are characterized by acceptable quality indicators when using mobile control actions on the distillation process.

Ключові слова: ректифікація, рухливе керування, модель динаміки, перехідний процес, тарілка живлення.

Keywords: distillation, control, mobile action, dynamic model, transient response, feed tray.

Вступ. Інтенсифікація виробництва, створення високоефективних апаратів великої потужності вимагають відповідного забезпечення сировинним матеріалом. Висока якість сировини і кінцевої продукції в хімічній, нафтохімічній, харчовій та багатьох інших галузях промисловості забезпечується використанням масообмінних процесів, серед яких особливе місце займає процес ректифікації.

Поділ рідинних сумішей на індивідуальні компоненти високої чистоти методами ректифікації здійснюється в спеціальних апаратах колонного типу, ширина яких може становити кілька метрів, висота – десятків метрів. Колони оснащені кількома десятками контактних пристроїв, на яких відбуваються процеси тепло- і масообміну між рідиною і паровою фазами [1].

Як об'єкт керування ректифікаційна колона характеризується високою енергоємністю і собівартістю продуктів, великим числом параметрів, їх взаємозв'язком, розподіленістю, значними запізненнями і інерційністю керуючих каналів [2]. Керування таким об'єктом необхідно здійснювати з урахуванням наведених особливостей і застосуванням інноваційних систем, так як традиційні методи не задовольняють високим вимогам, що висуваються до якості і собівартості одержуваних продуктів.

Для об'єктів з розподіленими параметрами успішно застосовують системи розподіленого [3], рухливого [4, 5] керування. Відомо, що можливість вибору закону руху матеріального або енергетичного джерела дозволяє здійснювати переведення розподіленого об'єкта в стани, що недосяжні в класі нерухоливих керуючих впливів, підвищити якість і швидкодію існуючих систем керування. Розробка систем автоматичного рухливого керування процесами ректифікації є актуальною науковою задачею.

Аналіз літературних даних і постановка проблеми. Для чіткого поділу компонентів суміші необхідні колони з великим числом контактних пристроїв. Інерційність таких апаратів ускладнює експериментальне дослідження їх динамічних характеристик, які необхідні для вибору і розрахунку систем автоматизації. Вирішення задач оптимального управління і оптимізації процесів ректифікації неможливе без використання методів і результатів математичного моделювання.

В даний час широке застосування одержали програмні засоби моделювання хіміко-технологічних процесів, такі як Aspen Plus [6, 7], Aspen Dynamics [8, 9], ChemCAD [10] та інші. Дані системи мають зручний інтерфейс, великі бібліотеки та бази даних фізико-хімічних властивостей речовин, типових процесів і апаратів, модулі проектування, дослідницьких розрахунків, оптимізації та економічної оцінки технологічних схем. Разом з цим, їх використання викликає складнощі з причин великих витрат на придбання і підтримку, обмеження набору апаратів типовими і ідеалізованими моделями, неможливості одержання результатів, що не передбачені розробниками.

На сьогодні розроблено велику кількість математичних моделей процесу ректифікації [11 – 13]. Точний опис перехідних процесів в системах автоматичного керування приводить до систем складних нелінійних диференціальних рівнянь з частинними похідними [14]. Для запобігання цього ставиться завдання статичної оптимізації процесу або спрощення моделювання обґрунтованими припущеннями.

Ректифікаційну колону, яка є розподіленим об'єктом, можливо розглядати як систему, що складається з ланок із зосередженими параметрами і чистими запізненнями: тарілок, кип'ятильників, конденсаторів, секцій насадки. Кожен з цих елементів має певну розділову здатність відносно потоків, які надходять до нього. Для кожної ланки складається система звичайних диференціальних рівнянь для балансових залежностей і нелінійних рівнянь, що описують гідродинаміку, процеси тепло- і масообміну [15].

Традиційні керуючі впливи на процес ректифікації призначені безпосередньо для впливу на матеріальний і енергетичний баланси колони, в той час як рухливі передбачають зміни не інтенсивностей потоків, а просторової координати їх надходження в апарат. На практиці розподілене, рухливе керування зводиться до вибору тарілок живлення та відбору проміжних продуктів [16], перерозподілу сировини при її двупоточній подачі в колону.

У напрямі рухливого керування процесами ректифікації вирішено завдання розробки адаптованої статичної моделі колони [17], вибору методу вирішення [18] і оптимізації процесу [19]. Доведено, що використання рухливих керуючих впливів забезпечує недосяжні стаціонарні режими роботи установок, проте не дослідженими залишаються режими динамічні.



Мета і завдання дослідження. Мета роботи – розробка математичної моделі динаміки процесу ректифікації, що враховує рухливі керуючі впливи, а також дослідження особливостей динамічних режимів роботи колони при їх використанні.

Завдання:

1. Розробка динамічної моделі процесу ректифікації, що дозволяє враховувати рухливі керуючі впливи, і алгоритму розрахунку нестационарних режимів роботи колони.
2. Вибір параметрів, що підлягають стабілізації при керуванні процесом, і моделювання відповідних контурів автоматичного регулювання.
3. Розрахунок і дослідження особливостей динамічних режимів роботи ректифікаційної колони при використанні рухливих керуючих впливів на процес.

Методи і матеріали досліджень. Процес ректифікації в результаті дії зовнішніх збурень виходить зі стану динамічної рівноваги. При цьому склади рідини і пари, їх витрати, ентальпії, а також температура і тиск на кожному контактному пристрої, в кубі колони і флегмовій ємності починають змінюватися.

Характерними особливостями такого технологічного об'єкта як ректифікаційна колона є багатовимірність, внутрішні взаємозв'язки між параметрами, їх розподіленість в просторі апарату і в часі, наявність значного числа збурень. Моделювання і розрахунок такого об'єкта необхідно здійснювати з урахуванням наведених його властивостей.

З метою спрощення розрахунків і необхідності врахування при моделюванні безлічі параметрів, що впливають на процес і також змінюють свої величини в часі, в динамічній моделі ректифікаційної колони, що розробляється, прийняті наступні припущення:

- 1) рідина на тарілках переміщується миттєво; це дозволяє розглядати тарілку як об'єкт із зосередженими параметрами;
- 2) гідравлічне запізнювання потоків рідини і пари не враховується;
- 3) віддача тепла в навколишнє середовище відсутня;
- 4) рідина на контактних пристроях знаходиться за температури кипіння, пар – температури конденсації;
- 5) інерційні властивості колони визначаються утримуючою здатністю колони за рідиною;
- 6) часом встановлення гідродинамічних режимів і фазової рівноваги в колоні можливо знехтувати в порівнянні з часом встановлення концентрацій.

При моделюванні ректифікаційна колона розглядається як сукупність елементарних ланок, що еквівалентні одній тарілці, випарнику куба, конденсатору і збірку флегми верху колони.

На рис. 1 схематично відображено основні матеріальні і енергетичні (теплові) потоки, що надходять і відводяться з контактної пристрою колони.

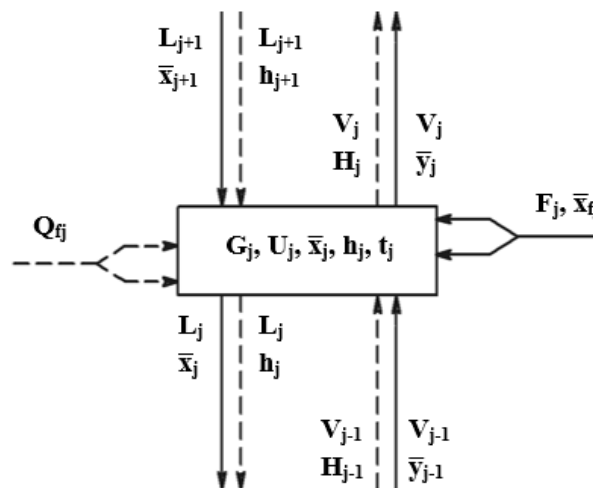


Рис. 1 – Схема матеріальних і енергетичних потоків контактної пристрою ректифікаційної колони

Перехідний процес розраховується послідовно, у визначених часових точках, які віддалені одна від одної на величину $\Delta\tau$

$$\tau[k+1] = \tau[k] + \Delta\tau = (k+1) \cdot \Delta\tau;$$

де $\tau[0] = 0$, k – ціле число, $k = 0, 1, \dots, m$.

Основні контрольовані збурення на процес наступні: витрата $F_f(\tau)$, склад $\bar{x}_f(\tau)$, температура живлення $t_{ff}(\tau)$ і тиск в трубопроводі живлення $P_{ff}(\tau)$.



В момент часу $\tau[k]$ відомі значення всіх показників контактної пристрою, що вказані на рис. 1. Дані величини визначаються використанням моделі статки для початкового моменту часу $\tau[0]$ або безпосередньо моделюванням перехідних процесів.

Розрахунок колони проводиться в одному напрямку, від низу до верху, тому при переході до j -ої тарілки вже відомі характеристики парового потоку, який залишає контактний пристрій, що розташовано нижче, в момент часу $\tau[k+1]$: $V_{j-1}[k+1]$, $\bar{y}_{j-1}[k+1]$, $H_{j-1}[k+1]$. Для рідинного потоку, що надходить на тарілку, необхідно використовувати в розрахунках його характеристики в момент часу $\tau[k]$: $L_{j+1}[k]$, $\bar{x}_{j+1}[k]$, $h_{j+1}[k]$.

Величинами, які розраховуються, є витрати і характеристики потоків, що залишають тарілку, а також температура і кількість рідини на ній в наступний момент часу $\tau[k+1]$: $L_j[k+1]$, $V_j[k+1]$, $\bar{x}_j[k+1]$, $\bar{y}_j[k+1]$, $h_j[k+1]$, $H_j[k+1]$, $G_j[k+1]$, $t_j[k+1]$.

З метою врахування рухливих керуючих впливів на процес в математичній моделі, що розробляється, кожний контактний пристрій розглядається як потенційна тарілка живлення

$$\begin{cases} F_j = q \cdot F, & j = N_{f,1}, \\ F_j = (1 - q) \cdot F, & j = N_{f,2}, \\ F_j = 0, & j \neq N_{f,1}, \neq N_{f,2}. \end{cases} \quad (1)$$

На кожну тарілку надходять рідина з контактної пристрою, що розташований вище, і пара з нижчого. Залишають тарілку рідина, склад якої відповідає складу на даній тарілці, і пара, характеристики якої залежать від ефективності масообміну на контактному пристрої. Загальний матеріальний баланс контактної пристрою

$$\frac{dG_j}{d\tau} = L_{j+1} + V_{j-1} + F_j - L_j - V_j. \quad (2)$$

Рівняння матеріальних балансів за компонентами

$$\frac{d(G_j \cdot x_{j,i})}{d\tau} = L_{j+1} \cdot x_{j+1,i} + V_{j-1} \cdot y_{j-1,i} + F_j \cdot x_{f,j,i} - L_j \cdot x_{j,i} - V_j \cdot y_{j,i}. \quad (3)$$

Ліва частина (3)

$$\frac{d(G_j \cdot x_{j,i})}{d\tau} = G_j \cdot \frac{dx_{j,i}}{d\tau} + x_{j,i} \cdot \frac{dG_j}{d\tau}. \quad (4)$$

Підстановка (4) і (2) в (3) дозволяє одержати рівняння для розрахунку концентрацій компонентів в рідинній фазі

$$G_j \cdot \frac{dx_{j,i}}{d\tau} = L_{j+1} \cdot (x_{j+1,i} - x_{j,i}) + V_{j-1} \cdot (y_{j-1,i} - x_{j,i}) + V_j \cdot (x_{j,i} - y_{j,i}) + F_j \cdot (x_{f,j,i} - x_{j,i}). \quad (5)$$

Постійна часу контактної пристрою колони

$$T_j = \frac{G_j}{L_{j+1} + V_{j-1} - V_j + F_j}. \quad (6)$$

Рівняння теплового балансу аналогічне (5) з урахуванням того, що накопичення тепла пов'язане зі зміною ентальпії рідини, що знаходиться на тарілці, а втрати тепла в навколишнє середовище відсутні

$$G_j \cdot \frac{dh_j}{d\tau} = L_{j+1} \cdot (h_{j+1} - h_j) + V_{j-1} \cdot (H_{j-1} - h_j) + V_j \cdot (h_j - H_j) + F_j \cdot (h_{f,j} - h_j). \quad (7)$$

Суттєвий вплив на зміну кількості речовини на контактному пристрої колони в динамічному режимі має конструктивне оформлення тарілки. Для тарілок ректифікаційної колони з переливом справедливо припущення про сталість рівня рідини. Утриманням парової фази рідиною можливо знехтувати, об'єм рідини на тарілці – величина постійна, а кількість речовини

$$G = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot U \cdot \rho}{4 \cdot \mu}. \quad (8)$$

Густина рідинної суміші і її молярна маса визначаються відповідно до принципу адитивності і розрахунку парціальних густин і молярних мас. Залежність густини чистого i -ого компонента від температури t лінійна

$$\rho_i = \rho_{i,1} \cdot t + \rho_{i,2}. \quad (9)$$

Густина суміші

$$\rho = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\rho_i} \right)} = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{\rho_{i,1} \cdot t + \rho_{i,2}} \right)}. \quad (10)$$

Молярні маси – величини постійні для чистих речовин. Молярна маса суміші



$$\mu = \sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot x_i). \quad (11)$$

З урахуванням (10) і (11) кількість речовини на контактному пристрої

$$G_j = \frac{\pi \cdot d_j^2 \cdot U_j}{4 \cdot \sum_{i=1}^n (\mu_i \cdot x_{j,i}) \cdot \sum_{i=1}^n \left(\frac{x_{j,i}}{\rho_{i,1} \cdot t_j + \rho_{i,2}} \right)}. \quad (12)$$

Кількість речовини – функція складу рідинної фази, що знаходиться на тарілці в момент часу, що розраховується. Рівні U_j є коефіцієнтами налаштування динамічної моделі.

Склад парової фази розраховується згідно з припущенням 8) і сталістю коефіцієнтів масовіддачі в рідинній $\beta_{x,j}$ і паровій $\beta_{y,j}$ фазах

$$m_j = \frac{\partial y_j^*(\bar{x})}{\partial x_j}, \quad (13)$$

$$K_{y,j} = \frac{S}{\frac{1}{\beta_{y,j}} + \frac{m_j}{\beta_{x,j}}}, \quad (14)$$

$$\eta_j = 1 - e^{-\frac{K_{y,j}}{V_{j-1}}}, \quad (15)$$

$$y_{j,i} = y_{j-1,i} + (y_{j,i}^* - y_{j-1,i}) \cdot \eta_{j,i}. \quad (16)$$

Рівноважний склад парової фази \bar{y}_j^* визначається за моделлю фазової рівноваги [20] і у загальному вигляді може бути представлений як функція від складу рідинної фази і тиску на контактному пристрої

$$\bar{y}_j^* = f(\bar{x}_j, P_j). \quad (17)$$

Одночасно з (17) ітераційними методами розраховується температура на контактному пристрої

$$t_j = f(\bar{x}_j, P_j). \quad (18)$$

З урахуванням (18) ентальпії рідинної і парової фаз є функціями їх складів і тисків на тарілці

$$h_j = f(\bar{x}_j, P_j), \quad (19)$$

$$H_j = f(\bar{y}_j, P_j). \quad (20)$$

Живлення може подаватися в колону у вигляді переохолодженої рідини, киплячої рідини, парорідинної суміші, пари, що конденсується, або перегрітої пари. Фазовий стан визначає ентальпію потоку сировини [21]

$$h_{f,j} = f(\bar{x}_{f,j}, P_{f,j}, t_{f,j}). \quad (21)$$

Залежності (1) – (21) дозволяють вирішити завдання розрахунку динамічних режимів окремого контактної пристрою колони. Пропонується наступний алгоритм визначення шуканих величин.

1) Перевіряється умова подачі потоку живлення на тарілку, що моделюється. У разі виконання умови розраховуються ентальпія сировини $h_{f,j}[k+1]$ (21) і витрата тепла в колону.

2) Визначаються концентрації рідинної фази на контактному пристрої (5)

$$\begin{aligned} x_{j,i}[k+1] = & x_{j,i}[k] + \\ & + \Delta\tau \cdot \frac{L_{j+1}[k] \cdot (x_{j+1,i}[k] - x_{j,i}[k]) + V_{j-1}[k] \cdot (y_{j-1,i}[k] - x_{j,i}[k])}{G_j[k]} + \\ & + \Delta\tau \cdot \frac{V_j[k] \cdot (x_{j,i}[k] - y_{j,i}[k]) + F_j[k] \cdot (x_{f,j,i}[k] - x_{j,i}[k])}{G_j[k]}. \end{aligned}$$

3) Склад і тиск на контактному пристрої дозволяють визначити ентальпію рідинної фази $h_j[k+1]$ (19).



- 4) Проводяться розрахунки рівноважних фазових умов (17), температури $t_j[k+1]$ (18), ККД контактної пристрою у випадку бінарної ректифікації (13) – (15) і складу парової фази $\bar{y}_j[k+1]$ (18), що залишає тарілку.
- 5) Склад парової фази визначає ентальпію $H_j[k+1]$ (20).
- 6) Розраховуються молярні маси (11) і густини (10) рідинної суміші з використанням $\bar{x}_j[k]$, $t_j[k]$ и $\bar{x}_j[k+1]$, $t_j[k+1]$.
- 7) Визначається кількість речовини на контактному пристрої згідно з умовою сталості рівня рідини на тарілці

$$\Delta U_j = U_j[k+1] - U_j[k] = \frac{4}{\pi \cdot d_j^2} \cdot \left(\frac{G_j[k+1] \cdot \mu_j[k+1]}{\rho_j[k+1]} - \frac{G_j[k] \cdot \mu_j[k]}{\rho_j[k]} \right) = 0;$$

$$G_j[k+1] = G_j[k] \cdot \frac{\mu_j[k] \cdot \rho_j[k+1]}{\mu_j[k+1] \cdot \rho_j[k]}.$$

(22)

- 8) Витрата парової фази, що залишає контактний пристрій, розраховується за тепловим балансом (7)

$$\begin{aligned} V_j[k+1] = & L_{j+1}[k] \cdot \frac{h_{j+1}[k] - h_j[k]}{H_j[k] - h_j[k]} + V_{j-1}[k] \cdot \frac{H_{j-1}[k] - h_j[k]}{H_j[k] - h_j[k]} + \\ & + F_j \cdot \frac{h_{ff}[k] - h_j[k]}{H_j[k] - h_j[k]} - G_j[k] \cdot \frac{h_j[k+1] - h_j[k]}{\Delta \tau \cdot (H_j[k] - h_j[k])}. \end{aligned} \quad (23)$$

- 9) Рівняння загального матеріального балансу контактної пристрою (2) дозволяє визначити останню невідому величину – витрату рідинної фази, що залишає тарілку

$$L_j[k+1] = L_{j+1}[k] + V_{j-1}[k] + F_j[k] - V_j[k] - \frac{G_j[k+1] - G_j[k]}{\Delta \tau}.$$

Або з врахуванням (22)

$$L_j[k+1] = L_{j+1}[k] + V_{j-1}[k] + F_j[k] - V_j[k] - \frac{G_j[k] \cdot \left(\frac{\mu_j[k] \cdot \rho_j[k+1]}{\mu_j[k+1] \cdot \rho_j[k]} - 1 \right)}{\Delta \tau}.$$

При розрахунку ректифікаційної колони дані операції здійснюються для всіх контактних пристроїв послідовно від низу апарату. Далі величина k збільшується на 1 і всі розрахунки повторюються для наступного моменту часу.

При розрахунках випарника колони величинами, що визначаються, є витрати і характеристики потоків, які залишають куб, а також температура, кількість рідини і рівень в ємності в наступний момент часу $\tau[k+1]$: $W[k+1]$, $V_0[k+1]$, $\bar{x}_0[k+1]$, $\bar{y}_0[k+1]$, $h_0[k+1]$, $H_0[k+1]$, $G_0[k+1]$, $U_0[k+1]$, $t_0[k+1]$.

При розрахунках дефлегматора: витрати і характеристики потоків, що залишають флегмову ємність, витрата холодоагенту в конденсатор, а також кількість речовини і рівень в збірнику флегми в момент часу $\tau[k+1]$: $F[k+1]$, $D[k+1]$, $\bar{x}_d[k+1]$, $\bar{x}_{fl}[k+1]$, $t_{fl}[k+1]$, $h_d[k+1]$, $h_{fl}[k+1]$, $F_{m3}[k+1]$, $G_d[k+1]$, $U_d[k+1]$.

Складання системи рівнянь, яка описує випарник куба колони і дефлегматор, за аналогією до моделі контактної пристрою (2) – (21) не становить особливих труднощів і в даній роботі опускається.

Очевидно, що перехідні процеси в ректифікаційній колоні підпорядковуються законам збереження матерії і енергії. Зміна величини будь-якого параметра процесу приводить до переходу колони зі стаціонарного в динамічний режим роботи, а забезпечення нового стаціонарного режиму неможливе без цілеспрямованих впливів на матеріальні та енергетичні потоки апарату.

Таким чином, при керуванні процесом ректифікації одночасно з рухливими обов'язковими є і традиційні керуючі впливи. Точки застосування останніх знаходяться на кінцях колони, а моделі динаміки куба і дефлегматора необхідно доповнити моделями необхідних контурів регулювання параметрів процесу.

Найважливіші традиційні керуючі впливи на процес полягають в змінах витрат тепла в кубі і зрошування, що подається в колону. Дані дії визначають навантаження апарату за рідинною і паровою фазами, продуктивність і собівартість продукції, що одержується. Розрахунок оптимальних величин даних впливів реалізується з використанням прогнозуючої нелінійної математичної моделі статистики за алгоритмами статичної оптимізації процесу ректифікації [19].



З метою підтримки матеріального балансу низу колони необхідно стабілізувати рівень в кубовій ємності шляхом зміни витрати кубового залишку. Передавальна функція за керуючим каналом $U_w - W$ відповідає інтегральній ланці

$$W_o(s) = -\frac{1}{T_{w,o} \cdot s}, \quad (24)$$

з постійною часу

$$T_{w,o} = \frac{\pi \cdot d_w^2 \cdot \rho_0}{4 \cdot \mu_0}.$$

Знак «мінус» у (24) вказує зворотну залежність між рівнем в ємності і витратою кубового продукту. Коефіцієнт передавальної функції не є постійним, так як молярна маса і густина кубового продукту залежать від його складу і температури.

Розузгодження

$$\Delta U_0[k+1] = U_0[k+1] - U_{0,z}. \quad (25)$$

При використанні ПІД-регулятора складові керуючого впливу

$$u_p[k+1] = K_p \cdot \Delta U_0[k+1], \quad (26)$$

$$u_i[k+1] = u_i[k] + K_p \cdot \frac{\Delta \tau}{T_i} \cdot \Delta U_0[k+1], \quad (27)$$

$$u_d[k+1] = K_p \cdot \frac{T_d}{\Delta \tau} \cdot (\Delta U_0[k+1] - \Delta U_0[k]). \quad (28)$$

Нове значення витрати кубового продукту з урахуванням негативного зворотного зв'язку і від'ємності передавальної функції (24)

$$W[k+1] = W[k] + u_p[k+1] + u_i[k+1] + u_d[k+1]. \quad (29)$$

Регулювання рівня в збірнику флегми U_d здійснюється шляхом відведення необхідної кількості дистилляту D . Постійна часу інтегральної ланки, якою описується флегмова ємність

$$T_{d,o} = \frac{\pi \cdot d_d^2 \cdot \rho_d}{4 \cdot \mu_d}.$$

Регулювання тиску наверху колони реалізується шляхом зміни витрати холодоагенту F_{m3} в конденсатор. При цьому збільшується витрата тепла Q_d , яке відводиться від пароподібного продукту верху колони, конденсується більше пари, що знижує тиск в апараті.

Надлишковий тиск у колоні пов'язаний з накопиченням парової фази в міжтарілочному просторі ректифікаційної колони. Постійна часу

$$T_{P,o} = \frac{(N+1) \cdot S \cdot h_y \cdot (H_N - h_d)}{R \cdot T_N \cdot \Delta h_{m3}}. \quad (30)$$

Температура T_N в (30) розраховується як температура конденсації парової фази, склад якої \bar{y}_N , при тиску P_N .

Для регулювання рівня дистилляту і тиску наверху колони також застосовують ПІД-регулятори. Розрахунки $D(\tau)$ і $F_{m3}(\tau)$ здійснюють відповідно до (25) – (29).

З урахуванням витрат холодоагенту F_{m3} швидкість конденсації пари

$$V_{N,cond}[k+1] = G_d[k] \cdot \frac{h_d[k+1] - h_d[k]}{\Delta \tau \cdot (H_N[k] - h_d[k])} + F_{m3}[k] \cdot \frac{h_{m3}[k] - h_{m4}[k]}{H_N[k] - h_d[k]}. \quad (31)$$

Залежності (23) для останньої тарілки колони і (31) для дефлегматора дозволяють визначити зміну кількості речовини в кожній міжтарілочній ємності колони

$$\Delta G_{y,j}[k+1] = \frac{V_N[k] - V_{N,cond}[k]}{N+1} \cdot \Delta \tau.$$

Тиск на кожному контактному пристрої в момент часу, що розраховується



$$P_j[k+1] = P_j[k] + \frac{\Delta G_{y,j}[k+1] \cdot R \cdot T_j[k+1]}{S \cdot h_y}$$

Розроблена модель динаміки дозволяє досліджувати перехідні процеси в колоні при застосуванні рухливих керуючих впливів.

Досліджено колону для поділу бінарної суміші метанол-вода, що містить 18 контактних пристроїв, виносні кип'ятильник і дефлегматор. Концентрація метанолу в живленні становить 0,273 мол. частки. Показники, що визначають регламентований режим роботи колони: $N_f = 9$, $Q_w = 6,4$ ГДж/год, $D = 62,8$ кмоль/год, $F = 229,3$ кмоль/год, $P_f = P_{j=0} = P_{j=18} = 1$ атм, $\beta_x = 3060,5$ кмоль/(м²·год), $\beta_y = 142,82$ кмоль/(м²·год), живлення, зрошування і дистилат знаходяться за температури кипіння. Цільовим компонентом є метанол, продуктом – дистилат. Початковий режим розраховано з використанням моделі статичної.

Розрахунки проведено з кроком Δt , що складає 0,05 с. Використано наступні величини коефіцієнтів налаштування моделі: рівень в кубовій ємності і збірнику флегми $U_w = U_d = 0,3$ м; рівень на контактних пристроях $U_j = 0,04$ м. Відстань між тарілками $h_y = 0,2$ м.

Для стабілізації рівнів кубового продукту, дистилату, а також тиску наверху колони використано ПІД-регулятори. Параметри їх налаштування наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 - Параметри налаштування ПІД-регуляторів

Величина, що регулюється	Параметри		
	K_p	T_i, c	T_d, c
Рівень в кубовій ємності U_w	0,683	64,62	68,22
Рівень в збірнику флегми U_d	0,308		
Тиск наверху колони P_N	0,018		

Результати досліджень.

Досліджено перехідні процеси при використанні дискретних рухливих керуючих впливів, які полягають у зміні точки введення живлення в колону (рис. 2 – 4). Переключення здійснювалось на сусідні з регламентованим контактні пристрої.

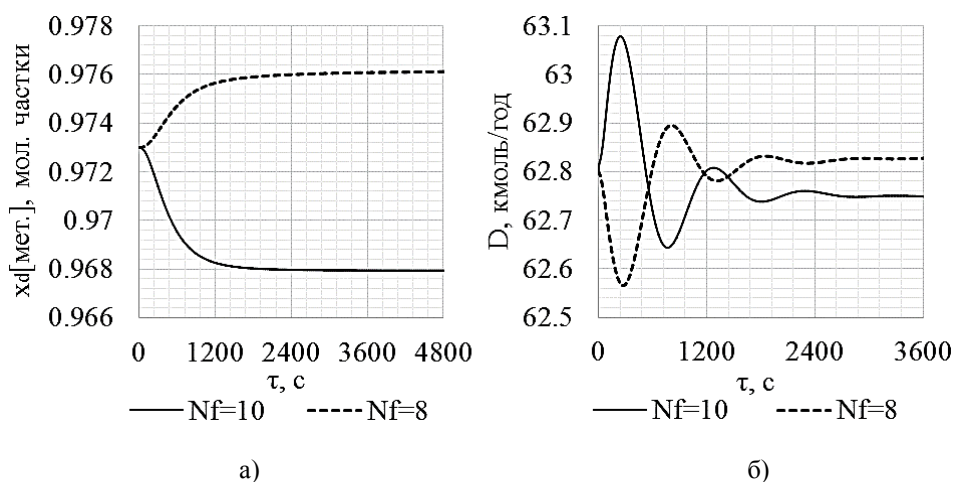


Рис. 2 – Перехідні процеси за каналами «концентрація метанолу в дистилаті – номер тарілки живлення» (а) і «витрата дистилату – номер тарілки живлення» (б) при зміні номера тарілки живлення

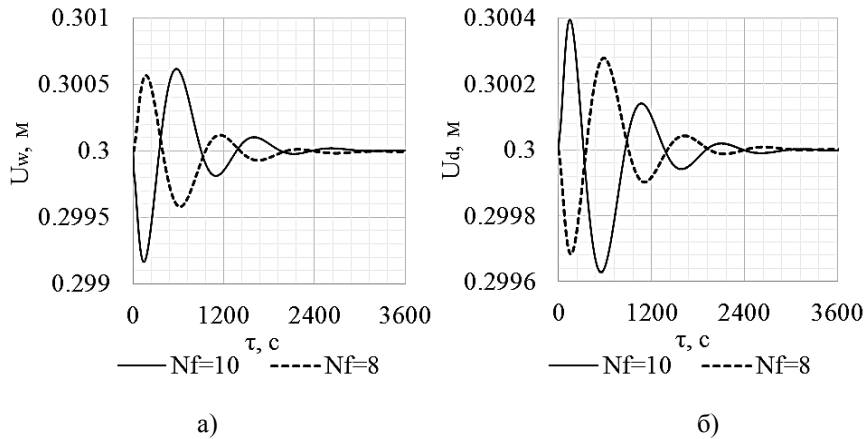


Рис. 3 – Перехідні процеси за каналами «рівень в кубовій ємності – номер тарілки живлення» (а) і «рівень в збірнику флегми – номер тарілки живлення» (б) при зміні номера тарілки живлення

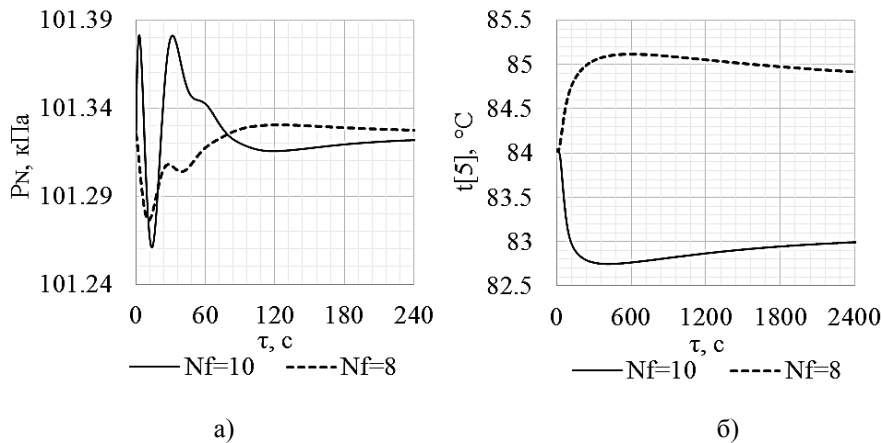


Рис. 4 – Перехідні процеси за каналами «тиск наверху колони – номер тарілки живлення» (а) і «температура на контрольній тарілці – номер тарілки живлення» (б) при зміні номера тарілки живлення

Досліджено перехідні процеси при застосуванні неперервних рухливих керуючих впливів, які полягають у перерозподілі потоку живлення між двома контактними пристроями колони (рис. 5 – 7). В якості контактних пристроїв, між якими перерозподіляється живлення, обрано 7-у і 9-у тарілки колони.

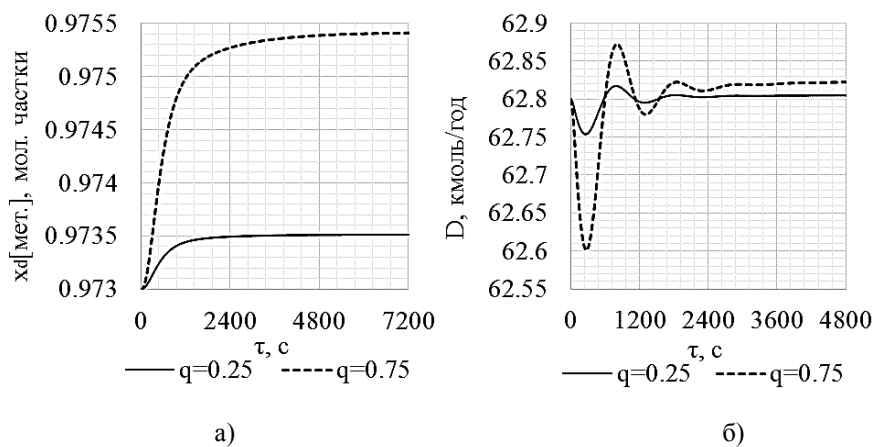


Рис. 5 – Перехідні процеси за каналами «концентрація метанолу в дистилаті – коефіцієнт перерозподілу живлення» (а) і «витрата дистилату – коефіцієнт перерозподілу живлення» (б) при зміні коефіцієнта перерозподілу живлення

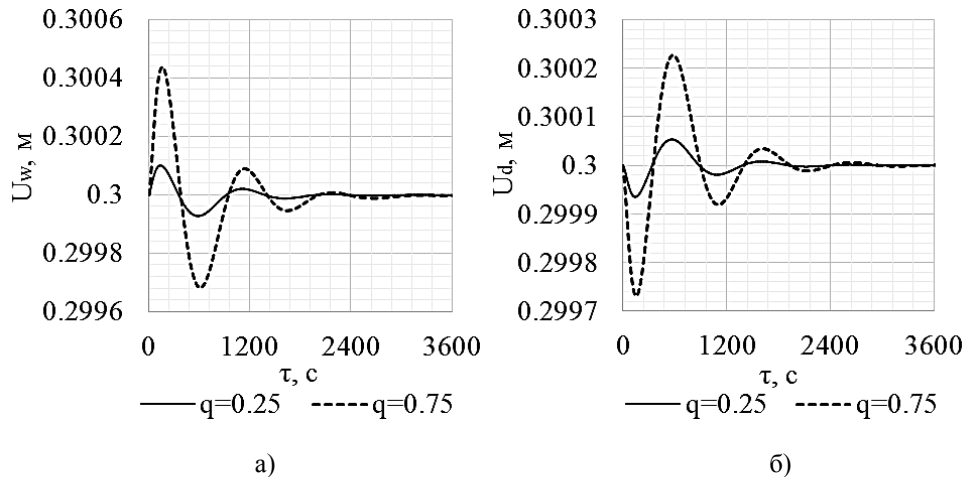


Рис. 6 – Перехідні процеси за каналами «рівень в кубовій ємності – коефіцієнт перерозподілу живлення» (а) і «рівень в збірнику флегми – коефіцієнт перерозподілу живлення» (б) при зміні коефіцієнта перерозподілу живлення

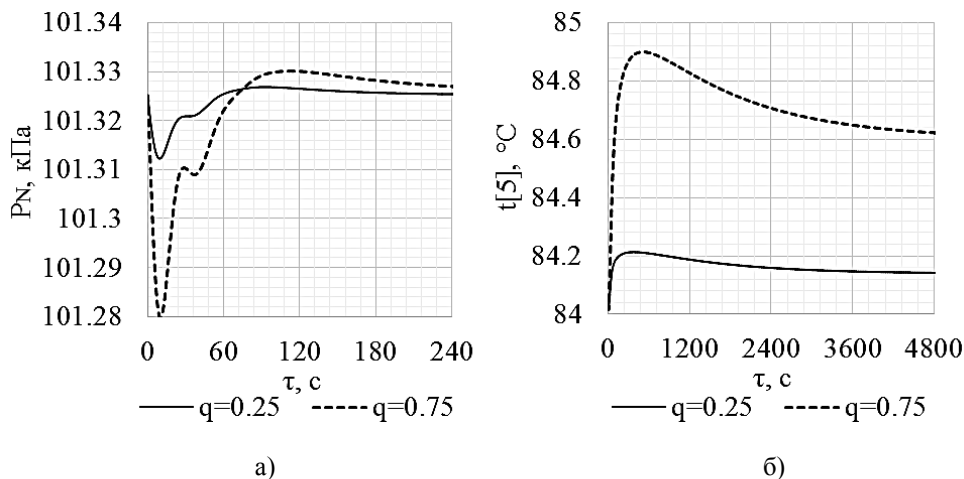


Рис. 7 – Перехідні процеси за каналами «тиск наверху колони – коефіцієнт перерозподілу живлення» (а) і «температура на контрольній тарілці – коефіцієнт перерозподілу живлення» (б) при зміні коефіцієнта перерозподілу живлення

Обговорення результатів.

Подання живлення на 8-у тарілку підвищує якість цільового продукту (рис. 2), що пояснюється наближенням до оптимальної точки введення живлення в колону за даним критерієм. Перехідні процеси за каналом $x_{d,nz} - N_f$ носять монотонний аперіодичний характер. Зміни концентрацій на інших контактних пристроях можуть характеризуватися перерегулюванням.

Зниження тарілки живлення приводить до підвищення рівня в кубовій ємності і зниження – у флегмовій (рис. 3). При регулюванні рівнів ПД-регулятор змінює витрати кубового продукту і дистилату. При переключенні подання живлення на 8-у тарілку вихід дистилату починає знижуватися, але саме такий вплив по завершенні перехідного процесу дозволяє підвищити продуктивність колони.

Зниження якості і продуктивності при переключенні подання живлення на 10-у тарілку значніше, ніж підвищення – при поданні на 8-у.

Так як рухливі впливи не змінюють загальне матеріальне і енергетичне навантаження колони, то динамічні похибки при регулюванні рівнів незначні. Час регулювання становить одну годину і співставний з часом встановлення концентрацій і температур.

В якості контрольного обрано 5-й контактний пристрій колони (рис. 4). Підвищення концентрації метанолу в дистилаті при переключенні живлення на 8-у тарілку знижує його кількість в вичерпній частині апарату. Це приводить до підвищення концентрації важкого компонента і, як наслідок, температури на контрольній тарілці.



Час регулювання тиску наверху колони незначний (рис. 4), що пояснюється меншим смісним запізнюванням за паровою фазою в порівнянні з рідинною і малою величиною постійної часу (30). Динамічні похибки, що пов'язані зі змінами енергетичного навантаження колони і витратою парової фази, несуттєві.

Характер перехідних процесів при підвищенні величини коефіцієнта перерозподілу аналогічний характеру при зниженні тарілки живлення, при цьому динамічні похибки і час регулювання залежать від значення q . Істотні зміни величини коефіцієнта перерозподілу приводять до збільшення тривалості перехідних процесів в колоні, а також викликають суттєву реакцію з боку показників процесу.

Висновки.

Використанням розробленої моделі динаміки процесу ректифікації досягається висока швидкість розрахунків нестационарних режимів. Можливе моделювання різних за формами і інтенсивностями збурень і керуючих впливів на процес за декількома каналами одночасно або в певні моменти часу.

Запропонований алгоритм розрахунку нестационарних режимів процесу ректифікації і структура моделі передбачають можливості врахування транспортних запізнювань парової і рідинної фаз в колоні, нестационарності процесів масо- і теплопередачі.

Рухливі керуючі впливи полягають у зміні не інтенсивностей матеріальних і енергетичних потоків, а просторової координати їх надходження в апарат. Цим пояснюються встановлені особливості перехідних процесів при автоматичному керуванні процесами ректифікації з використанням рухливих впливів.

Використання рухливих впливів не приводить до істотних динамічних похибок при керуванні ректифікаційною колоною. Час регулювання можливо порівняти з тривалістю перехідних процесів при основних збуреннях на процес.

У той же час, застосування лише рухливих впливів на процес ректифікації недостатньо. Для забезпечення нового оптимального стаціонарного режиму необхідні традиційні впливи на витрати продуктів поділу, зрошування, а також теплоносія і холодоагенту у випарник і конденсатор.

Модель дозволяє вести розрахунки процесів багатокомпонентної і складної ректифікації, може використовуватись для розрахунків пускових режимів колон. Результати проведених досліджень можуть застосовуватись при побудові систем автоматичного рухливого керування процесами ректифікації, систем адаптивного, оптимального керування з використанням прогнозуючих моделей.

Умовні позначення.

D – мольна витрата дистиляту, кмоль/год;

d – діаметр, м;

F – мольна витрата живлення, кмоль/год;

Fl – мольна витрата зрошування, кмоль/год;

G – кількість речовини, кмоль;

H – ентальпія парової фази, кДж/кмоль;

h – ентальпія рідинної фази, кДж/кмоль;

h_y – відстань між тарілками, м;

j – номер контактної пристрою;

K – коефіцієнт масопередічі; коефіцієнт посилення;

k – номер точки, що розраховується, перехідного процесу;

L – мольна витрата рідинної фази, кмоль/год;

m – тангенс кута нахилу дотичної до кривої рівноваги;

N – кількість контактних пристроїв в колоні;

n – кількість компонентів в суміші;

N_f – номер тарілки живлення, величина дискретного рухливого керуючого впливу;

P – тиск, МПа;

Q – витрата тепла, кДж/год;

q – коефіцієнт перерозподілу живлення, величина неперервного рухливого керуючого впливу, кмоль/кмоль;

R – універсальна газова стала, кДж/(кмоль·К);

S – ефективна площа тарілки, м²;

s – оператор передавальної функції;

T – стала часу, с; температура, К;

t – температура, °С;

U – рівень, м;

u – керуючий вплив, кмоль/год;

V – мольна витрата парової фази, кмоль/год; об'єм, м³;

W – мольна витрата кубового продукту, кмоль/год;

x – мольна концентрація компонента в рідинній фазі, кмоль/кмоль;



y – мольная концентрация компонента в паровой фазе, кмоль/кмоль.

Грецькі символи:

β – коефіцієнт масовіддачі, який розраховано на одиницю ефективної площі тарілки, кмоль/(м²·год);

η – ефективність масопереносу на контактному пристрої за Мерфрі;

μ – молярна маса, кг/кмоль;

ρ – густина, кг/м³;

τ – час, с.

Нижні індекси:

cond – параметр конденсату;

d – параметр дистиляту, диференціальна складова;

f – параметр живлення;

fl – параметр зрошування;

i – параметр компонента суміші; інтегральна складова;

j – параметр контактної пристрою колони;

m3 – параметр холодоагенту, що надходить в дефлегматор;

m4 – параметр холодоагенту, що відводиться з дефлегматора;

N – параметр верху колони;

nz – параметр цільового компонента суміші;

o – параметр об'єкта керування;

P – параметр регулювання тиску;

p – пропорційна складова;

w, 0 – параметр кубового продукту; параметр випарника куба колони;

x – параметр рідинної фази;

y – параметр парової фази;

z – завдання.

Верхній індекс:

* – рівноважний параметр.

Список використаних джерел

- [1] Sinnott R. Chemical Engineering Design / R. Sinnott, G. Towler. – Elsevier Butterworth-Heinemann, 2009. – 1038 p.
- [2] Mehta B.R. Industrial Process Automation Systems: Design and Implementation / B.R. Mehta, Y.J. Reddy. – Butterworth-Heinemann, 2015. – 668 p.
- [3] Werle L.O. Control Strategy with Distributed Action for Minimization of Transients in Distillation Column / L.O. Werle, C. Marangoni, J.G. Teleken, C. Sayer, R.F. Machado // Computer Aided Chemical Engineering. – 2009. – 27. – P. 1527–1532. DOI: 10.1016/s1570-7946(09)70645-5
- [4] Бутковский А.Г. Теория подвижного управления системами с распределенными параметрами / А.Г. Бутковский, Л.М. Пустыльников. – М.: Наука, 1980. – 384 с.
- [5] Kubyshkin V.A. Mobile control of vibrations in systems with distributed parameters / V.A. Kubyshkin // Automation and Remote Control. – 2011. – 72 (10). – P. 2112-2122. DOI: 10.1134/S0005117911100109
- [6] Cao Y. Comparison of pressure-swing distillation and extractive distillation with varied-diameter column in economics and dynamic control / Y. Cao, J. Hu, H. Jia, G. Bu, Z. Zhu, Y. Wang // Journal of Process Control. – 2017. – 49. – P. 9-25. DOI: 10.1016/j.jprocont.2016.11.005
- [7] Taqvi S.A. Optimization and Dynamics of Distillation Column Using Aspen Plus / S.A. Taqvi, L.D. Tufa, S. Muhadzir // Procedia Engineering. – 2016. – 148. – P. 978-984. doi:10.1016/j.proeng.2016.06.484
- [8] Ma K. Control of an energy-saving side-stream extractive distillation process with different disturbance conditions / K. Ma, M. Yu, Y. Dai, Y. Ma, J. Gao, P. Cui, Y. Wang // Separation and Purification Technology. – 2019. – 210. – P. 195–208. DOI: 10.1016/j.seppur.2018.08.004
- [9] Luyben W.L. Aspen Dynamics simulation of a middle-vessel batch distillation process / W.L. Luyben // Journal of Process Control. – 2015. – 33. – P. 49–59. DOI: 10.1016/j.jprocont.2015.06.002
- [10] Wang X.G. Simulation of Reactive Distillation Process with ChemCAD Software / X.G. Wang, Y.Y. Yang // Advanced Materials Research. – 2011. – 347-353. – P. 3706–3709. doi:10.4028/www.scientific.net/amr.347-353.3706
- [11] Torgashov A. Comparative Study of Multicomponent Distillation Static Estimators Based on Industrial and Rigorous Model Datasets / A. Torgashov, S. Skogestad, A. Kozlov // IFAC-PapersOnLine. – 2016. – 49 (7). – P. 1187-1192. DOI: 10.1016/j.ifacol.2016.07.369
- [12] Ермолаева В.А. Математическое моделирование ректификации многокомпонентной смеси / В.А. Ермолаева, Д.М. Николаева, Н.Г. Столетовых // Международный журнал гуманитарных и естественных наук. – 2019. – 2-2. – С. 35-39. DOI: 10.24411/2500-1000-2019-10567



- [13] Ramesh K. Nonlinear Model Predictive Control of a Distillation Column Using NARX Model / K. Ramesh, S.R.A. Shukor, N. Aziz // *Computer Aided Chemical Engineering*. – 2009. – 27. – P. 1575–1580. DOI: 10.1016/S1570-7946(09)70653-4
- [14] Девятков Б.Н. Динамика распределенных процессов в технологических аппаратах, распределенный контроль и управление / Б.Н. Девятков, Н.Д. Демиденко, В.А. Охорзин – Красноярск: Красноярское книжное издательство, 1976. – 310 с.
- [15] Кафаров В.В. Основы массопередачи / В.В. Кафаров. – 3-е изд. – М.: Высш. школа, 1979. – 439 с.
- [16] Demidenko N.D. Distributed control for systems with distributed parameters / N.D. Demidenko, L.V. Kulagina // *J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol.* – 2018. – 11 (2). – P. 221-228. DOI: 10.17516/1999-494X-0025
- [17] Шейкус А.Р. Моделювання процесу багатоконпонентної ректифікації з врахуванням рухливих керуючих впливів / А.Р. Шейкус, В.Я. Тришкін, І.Л. Левчук // *Комп'ютерне моделювання: аналіз, управління, оптимізація*. – 2018. – № 1 (3). – С. 82-91.
- [18] Sheikus A. Developing a technique for improving the efficiency of iterative methods for the calculation of the multicomponent rectification process / A. Sheikus, E. Belobrova, Ya. Dovgopolyi, I. Levchuk, V. Korsun // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2016. – Vol. 6, N 2 (84). – P. 38-44. – DOI: 10.15587/1729-4061.2016.85372
- [19] Sheikus A.R. Static optimization of rectification processes using mobile control actions / A.R. Sheikus, V.Ya. Trishkin // *Radio Electronics, Computer Science, Control*. – 2018. – 1. – P. 192-201. DOI: 10.15588/1607-3274-2018-1-22
- [20] Шейкус А.Р. Моделирование парожидкостного равновесия при подвижном управлении процессами ректификации / А.Р. Шейкус, И.Л. Левчук, В.Я. Тришкин, В.И. Корсун // *Вестник НТУ "ХПИ". Серия: Информатика и моделирование*. – Харьков: НТУ "ХПИ". – 2016. – № 44 (1216). – С. 87-100. – DOI: 10.20998/2411-0558.2016.44.08
- [21] Шейкус А.Р. Управление процессом ректификации с использованием подвижных управляющих воздействий с двумя степенями свободы [Текст] / А.Р. Шейкус, И.Л. Левчук, В.Я. Тришкин // *Интегрированные технологии и энергосбережение*. – 2017. – №1. – С. 60 – 72.

References

- [1] Sinnott, R., Towler, G. *Chemical Engineering Design*. Elsevier Butterworth-Heinemann, 1038 p., 2009.
- [2] Mehta, B.R., Reddy, Y.J. *Industrial Process Automation Systems: Design and Implementation*. Butterworth-Heinemann, 668 p., 2015.
- [3] Werle, L.O., Marangoni, C., Teleken, J.G., Sayer, C., Machado, R.F. *Control Strategy with Distributed Action for Minimization of Transients in Distillation Column*. *Computer Aided Chemical Engineering*, 27, P. 1527-1532, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70645-5](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70645-5)
- [4] Butkovskij, A.G. *Teorija podvizhnogo upravljenija sistemami s raspredelennymi parametrami*. Moskva, Nauka, 384 s., 1980.
- [5] Kubyshkin, V.A. *Mobile control of vibrations in systems with distributed parameters*. *Automation and Remote Control*, 72 (10), P. 2112-2122, 2011. <https://doi.org/10.1134/S0005117911100109>
- [6] Cao, Y., Hu, J., Jia, H., Bu, G., Zhu, Z., Wang, Y. *Comparison of pressure-swing distillation and extractive distillation with varied-diameter column in economics and dynamic control*. *Journal of Process Control*, 49, P. 9-25, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2016.11.005>
- [7] Taqvi, S.A., Tufa, L.D., Muhadzir, S. *Optimization and Dynamics of Distillation Column Using Aspen Plus*. *Procedia Engineering*, 148, P. 978-984, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.484>
- [8] Ma, K., Yu, M., Dai, Y., Ma, Y., Gao, J., Cui, P., Wang, Y. *Control of an energy-saving side-stream extractive distillation process with different disturbance conditions*. *Separation and Purification Technology*, 210, P. 195-208, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2018.08.004>
- [9] Luyben, W.L. *Aspen Dynamics simulation of a middle-vessel batch distillation process*. *Journal of Process Control*, 33, P. 49-59, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2015.06.002>
- [10] Wang, X.G., Yang, Y.Y. *Simulation of Reactive Distillation Process with ChemCAD Software*. *Advanced Materials Research*, 347-353, P. 3706-3709, 2011. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.347-353.3706>
- [11] Torgashov, A., Skogestad, S., Kozlov, A. *Comparative Study of Multicomponent Distillation Static Estimators Based on Industrial and Rigorous Model Datasets*. *IFAC-PapersOnLine*, 49(7), P. 1187-1192, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.07.369>
- [12] Ermolaeva, V.A., Nikolaeva, D.M., Stoletov, N.G. *Matematicheskoe modelirovanie rektifikacii mnogokomponentnoj smesi*. *Mezhdunarodnyj zhurnal gumanitarnyh i estestvennyh nauk*, 2-2, S. 35-39, 2019. DOI: 10.24411/2500-1000-2019-10567
- [13] Ramesh, K., Shukor, S.R.A., Aziz, N. *Nonlinear Model Predictive Control of a Distillation Column Using NARX Model*. *Computer Aided Chemical Engineering*, 27, P. 1575-1580, 2009. [https://doi.org/10.1016/S1570-7946\(09\)70653-4](https://doi.org/10.1016/S1570-7946(09)70653-4)
- [14] Devyatov, B.N., Demidenko, N.D., Ohorzin, V.A. *Dinamika raspredelennyh processov v tehnologicheskikh apparatah, raspredelennyj kontrol' i upravlenie*. Krasnojarsk, Krasnojarskoe knizhnoe izdatel'stvo, 310 s., 1976.



- [15] Kafarov, V.V. *Osnovy massoperedachi*. Moskva, Vysshaja shkola, 439 s., 1979.
- [16] Demidenko, N.D., Kulagina, L.V. *Distributed control for systems with distributed parameters*. J. Sib. Fed. Univ. Eng. technol, 11 (2), P. 221-228, 2018. <https://doi.org/10.17516/1999-494X-0025>
- [17] Sheikus, A.R., Tryshkin, V.Ja., Levchuk, I.L. *Modeljuvannja procesu bagatokomponentnoi' rektifikacii' z vrahuvannjam ruhlyvyh kerujuchyh vplyviv*. Komp'juterne modeljuvannja: analiz, upravlinnja, optymizacija, 1(3), S. 82-91, 2018.
- [18] Sheikus, A., Belobrova, E., Dovgopolij, Ya., Levchuk, I., Korsun, V. *Developing a technique for improving the efficiency of iterative methods for the calculation of the multicomponent rectification process*. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, Vol. 6, N 2 (84), P. 38-44, 2016. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2016.85372>
- [19] Sheikus, A.R., Trishkin, V.Ya. *Static optimization of rectification processes using mobile control actions*. Radio Electronics, Computer Science, Control, 1, P. 192-201, 2018. <https://doi.org/10.15588/1607-3274-2018-1-22>
- [20] Sheikus, A.R., Levchuk, I.L., Trishkin, V.Ja., Korsun, V.I. *Modelirovanie parozhidkostnogo ravnovesija pri podvizhnom upravlenii processami rektifikacii*. Vestnik NTU "HPI". Serija: Informatika i modelirovanie, 44 (1216), S. 87-100, 2016. <https://doi.org/10.20998/2411-0558.2016.44.08>
- [21] Sheikus, A.R., Levchuk, I.L., Trishkin, V.Ja. *Upravlennie processom rektifikacii' s ispol'zovaniem podvizhnyh upravljajushchih vozdeystvij s dvumja stepenjami svobody*. Integrirovannye tehnologii i jenergosberezhenie, 1, S. 60-72, 2017.

УДК 697

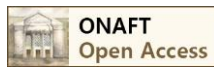
ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛА ПАРОВОПІТРЯНИХ СУМІШЕЙ: ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Ковальчук Д. А.¹, Мазур О. В.²

Одеська національна академія харчових технологій, вул. Канатна, 112, Одеса, 65039, Україна
¹асистент, ²доцент, к.т.н.

ORCID: ¹ 0000-0003-0549-5244, ² 0000-0001-7104-9010
E-mail: ¹radiolomaster@gmail.com, ²mazur.av.ua@gmail.com

Copyright © 2018 by author and the journal "Automation of technological and business - processes.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>



DOI:

Анотація.

Розглянуті основні підходи до розробки імітаційних моделей, освітлені їх недоліки та переваги. Розглянута імітаційна модель процесу глибокої утилізації тепла пароповітряних сумішей з використанням парокомпресійного теплового насосу, до складу якої входять імітаційні моделі компресора, конденсатора, електронного розширювального вентиля, випарника, переохолоджувача та контактного теплообмінника – утилізатора тепла пароповітряних сумішей. Імітаційні моделі цих складових побудовані з використанням експериментальних даних, отриманих авторами в результаті виконання фізичних натурних експериментів на лабораторній дослідній установці. В імітаційній моделі випарника теплового насосу реалізовано функцію розрахунку «баластної» та «ефективної» витрати холодоагенту. «Баластна» витрата виникає за рахунок переохолодження холодоагенту до температури кипіння і супроводжується випаровуванням його частки, яка не приймає участі у відборі тепла випарником. Для цього до імітаційної моделі випарника була додана підсистема розрахунку перепаду температур кипіння (тиску) по довжині випарника в залежності від витрати холодоагенту та температурного напору у випарнику, що враховує довжину ділянки випарника на якій відбувається кипіння рідкої фази. Залежність перепаду тиску по довжині випарника від витрат холодоагенту через нього є не монотонно зростаючою функцією а має екстремум і спадає при рівнях перегріву холодоагенту від 15 до 0 °С. Тиск на виході випарника розраховується в



моделі з використанням нелінійної функції двох змінних – положення електронного розширювального вентиля та частоти обертання компресора. Динамічні властивості каналів моделюються ланками, передатні функції яких були отримані в результаті фізичних експериментів. Проведена перевірка розробленої імітаційної моделі на адекватність, для чого було організовано ряд комп'ютерних експериментів з умовами, аналогічними умовам проведення натурних фізичних експериментів. Порівняння результатів моделювання та фізичного експерименту показало високу ступінь їх схожості.

Annotation.

The article considers basic approaches to the development of simulation models, their advantages and disadvantages. The article outlines the simulation model for deep heat recovery process of steam-air mixtures with steam-compressor heat pump, including simulation models of the compressor, condenser, electronic expansion valve, evaporator, supercooler and contact heat exchanger recovering heat from steam-air mixtures. The simulation models of these components were prepared using experimental data obtained by the authors as a result of performing physical field experiments at a laboratory test facility. The function of calculating the "ballast" and "effective" refrigerant flow is implemented in the simulation model of the heat pump evaporator. "Ballast" flow occurs due to the refrigerant supercooling to boiling point and is accompanied by partial evaporation of its share, which does not take part in the heat extraction by the evaporator. To do this, the evaporator simulation model was supplemented with a subsystem calculating the difference in boiling points (pressure) along the length of the evaporator based on the refrigerant flow rate and the evaporator temperature and taking into account the length of the evaporator segment where the liquid phase boils. Dependence of the pressure drop along the length of the evaporator on the refrigerant flow passing through it, is not a monotonically increasing function but is that having an extremum and decreasing at the refrigerant overheating levels ranging from 15 to 0 °C. Evaporator outlet pressure is calculated in the model using a nonlinear function of two variables - the position of EEV and the compressor's rotational speed. The dynamic properties of the channels are modelled based on the links which transfer functions were obtained as a result of physical experiments. The adequacy of the simulation model was tested and a series of computer experiments were performed under conditions similar to those of the full-scale physical experiments at the laboratory facility. Comparison of simulation results and physical experiment showed a high degree of similarity.

Ключові слова: дослідження, імітаційна модель, моделювання, тепловий насос, утилізація тепла, пароповітряна суміш, статичні характеристики, динамічні характеристики, компресор, випарник, конденсатор, переохолоджувач, електронний розширювальний вентиль.

Keywords: research, simulation model, simulation, heat pump, heat recovery, steam-air mixture, static characteristics, dynamic characteristics, compressor, evaporator, condenser, supercooler, electronic expansion valve

1. Вступ

Сучасні підходи до розробки та дослідження систем управління передбачають застосування імітаційних моделей об'єктів управління. () Для розробки енергоефективних алгоритмів управління процесом глибокої утилізації ППС необхідно створити його імітаційну модель, що більш-менш адекватно відображає властивості реальної фізичної системи утилізації.

Існують різні підходи до побудови таких моделей. Деякі з них орієнтовані на розрахунок конструктивних особливостей елементів системи [11, 16, 17, 18]. Однак такий підхід призводить до того, що моделі містять велику кількість емпіричних коефіцієнтів, необхідних для розрахунку конструкції даних агрегатів. Ці моделі відрізняються достатньою громіздкістю, включають велику кількість емпіричних коефіцієнтів та в решті решт дають досить великий розкид значень розрахункових параметрів і зазвичай слабо відображають динамічні властивості модельованих елементів системи, які дуже важливі при побудові систем управління.

Інший, спрощений підхід до розрахунку таких систем [3, 9, 13, 14] зазвичай полягає в застосуванні моделей елементів системи з зосередженими параметрами, без урахування їх конструктивних особливостей. Він зазвичай зводиться до розрахунку основних параметрів процесів на підставі термодинамічних властивостей теплоносіїв, а також теплових і матеріальних балансів системи. При цьому матеріальний баланс описується умовою нерозривності, тобто рівністю масової витрати теплоносія через послідовно включені елементи системи, а тепловий - визначається законом збереження енергії і описується рівняннями теплового балансу.

Застосована при розробці та дослідженні алгоритмів керування імітаційна модель процесу УТППС може бути побудована на основі моделей елементів із зосередженими параметрами, однак вона повинна адекватно відображати фізичні, статичні і динамічні властивості елементів системи. Дослідженню динамічних і статичних властивостей процесів глибокої утилізації тепла пароповітряних сумішей (УТПВС) з використанням парокомпресійного теплового насоса були присвячені роботи [1, 2].

Ця стаття стосується розробки імітаційної моделі процесу УТПВС, реалізації її в середовищі Simulink і перевірки на адекватність

2. Розробка імітаційної моделі

2.1. Загальна структура імітаційної моделі

У статтях [1, 2] була описана і досліджена фізична модель системи глибокої утилізації тепла ППС, яка складається з парокомпресійного теплового насоса типу "вода-вода" і контактного теплообмінника-утилізатора. Структура



імітаційної моделі була обрана відповідно до структури описаної в [2] фізичної моделі. Взаємозв'язки між елементами моделі також відповідають фізичним параметрам.

Структурна схема імітаційної моделі представлена на рисунку 1.

До її складу входять моделі: ЕРВ (1), випарника (2), компресора (3), конденсатора (4), переохолоджувача (5) і контактного теплообмінника-утилізатора (6). Взаємозв'язки між ними відображають основні матеріальні та енергетичні потоки процесу. В системі присутні 2 основних контури в яких зберігається матеріальний і енергетичний баланси [7, 10]. Контур холодоагенту парокompресійного теплового насоса "Вода – вода" і водяний контур теплоутилізатора. Контур холодоагенту включає в себе компресор, конденсатор, ЕРВ, переохолоджувач і випарник. Умова матеріального балансу (нерозривності) визначає те, що масова витрата холодоагенту G_M через всі елементи цього контуру однакова.

$$G_M = G_{Mкк} = G_{Mкд} = G_{Mпх} = G_{Mерв} = G_{Mе} = G_{Me}$$

де $G_{Mкк}$ – масова витрата холодоагенту через компресор;

$G_{Mкд}$ – масова витрата холодоагенту через конденсатор;

$G_{Mпх}$ – масова витрата холодоагенту через переохолоджувач;

$G_{Mерв}$ – масова витрата холодоагенту через ЕРВ;

$G_{Mе}$ – масова витрата холодоагенту через випарник.

Умовою безаварійного ведення технологічного процесу УТПВС є газоподібний стан холодоагенту на вході компресора. Рушійною силою, що забезпечує циркуляцію холодоагенту, є перепад тисків, який створюється компресором. Рівень тиску парів холодоагенту на вході компресора забезпечує виконання умови матеріального балансу – рівності масової витрати холодоагенту через ЕРВ і компресор. Рівень тиску парів холодоагенту на виході компресора визначається режимом роботи конденсатора.

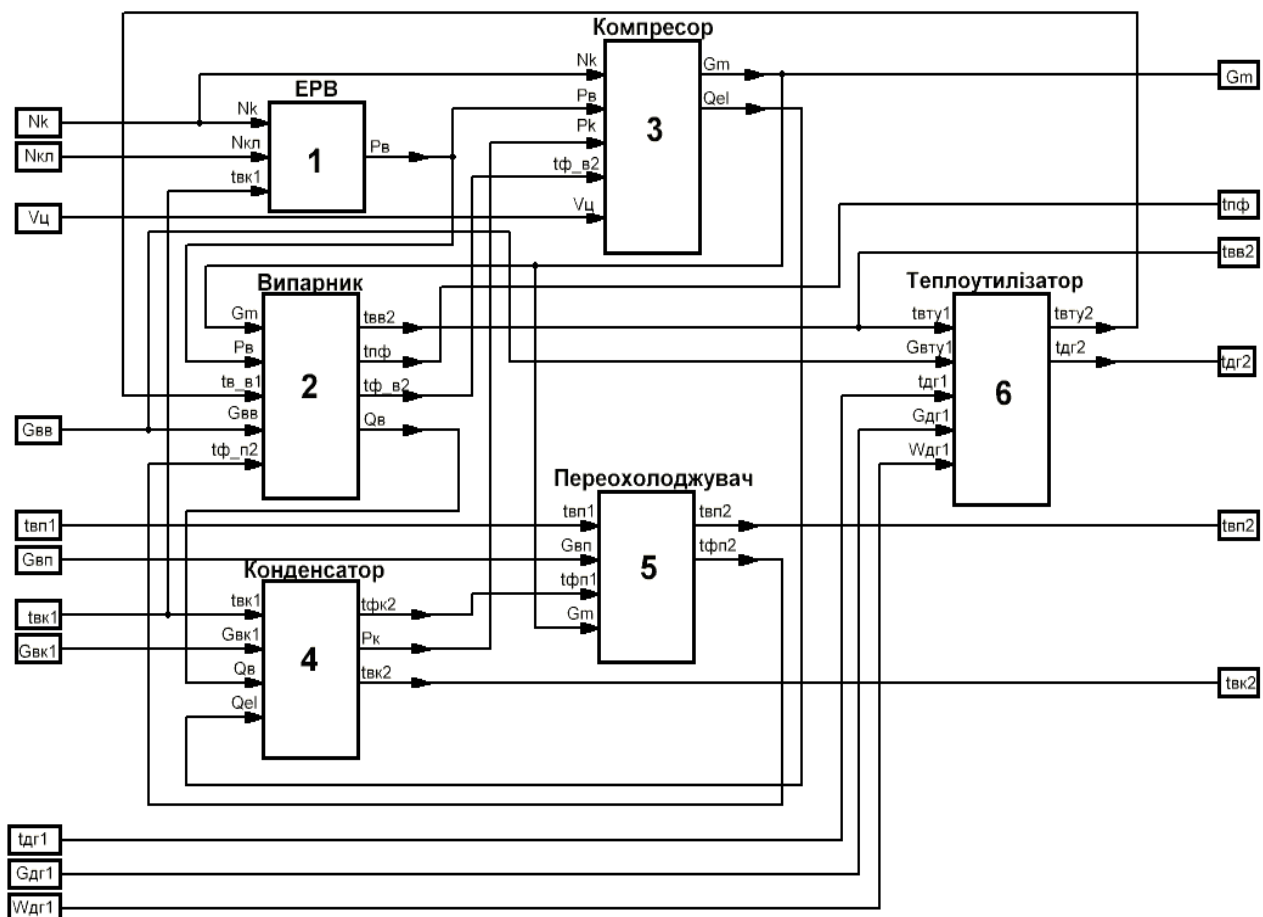


Рис. 1 – структурна схема моделі теплонасосного утилізатора тепла ППС

Водяний контур включає в себе контактний теплообмінник повітря-вода і випарник. В ньому відбувається конденсація частини вологи з ППС і за рахунок цього збільшення маси води в контурі. Однак в системі присутній пристрій для відводу зайвої води що підтримує постійну масу охолоджуючої води в контурі.



Енергетичний (тепловий) баланс процесу УТПВС без урахування втрат в навколишнє середовище описується рівністю теплових потужностей:

$$P_{TV} = P_B = (P_{KD} + P_{II} - P_{KI})$$

де P_{TV} – потужність контактного теплообмінника;

P_B – потужність випарника;

P_{KD} – потужність конденсатора;

P_{II} – потужність переохолоджувача;

P_{KI} – потужність компресора.

2.2. Імітаційна модель ЕРВ

Імітаційна модель ЕРВ (1) побудована на основі експериментальних досліджень статичних та динамічних властивостей процесу УТПВС, викладених у [1, 2]. Вхідними параметрами для моделі ЕРВ є положення ЕРВ, частота обертання компресора та температура води на вході в конденсатор. Вихідний параметр моделі – тиск на виході випарника, який є функцією трьох змінних. Дві з них – положення клапану ЕРВ (N_{KL}) та частота обертання компресора (N_K) – зазвичай виконують функції керуючих впливів в системі керування. Статичні властивості цієї залежності описуються функцією двох змінних.

$$P_{\Phi B2}(N_{KL}, N_K) = \left(\frac{1500}{88 + N_K} \right) - 0.03 \cdot N_{KL} \cdot N_K \cdot \left(1 - e^{-\frac{N_{KL}}{50}} \right)$$

де $P_{\Phi B2}$ – тиск холодоагенту на виході випарника

N_{KL} – положення клапану ЕРВ;

N_K – частота обертання компресора

На рисунку 2 представлена реалізація цієї залежності у середовищі Simulink:

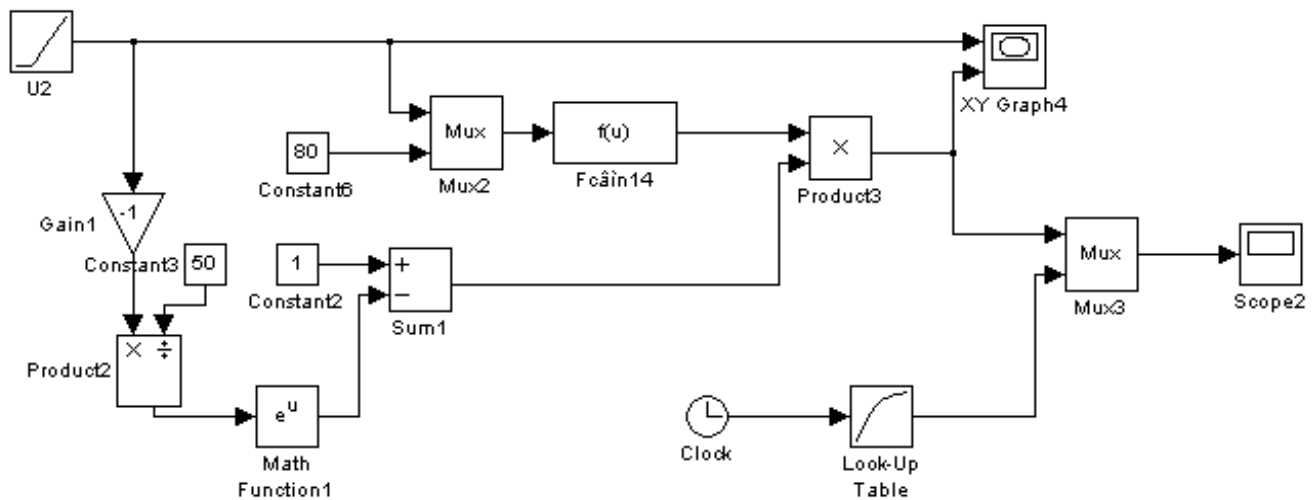


Рис. 2 – реалізація моделі блоку розрахунку тиску на виході випарника

Третя змінна – температура теплоносія на вході в конденсатор. За результатами проведених досліджень зміна температурного режиму конденсатору призводить до суттєвого зсуву статичної залежності тиску холодоагенту на вході компресора від положення клапану ЕРВ (N_{KL}) та частоти обертання компресора (N_K). Залежність величини зсуву від температури води а вході конденсатора має лінійний характер. Динамічні властивості каналів формуються динамічними ланками, передатні функції яких були отримані у [2].

На рисунку 3 представлена реалізація імітаційної моделі ЕРВ у середовищі Simulink.

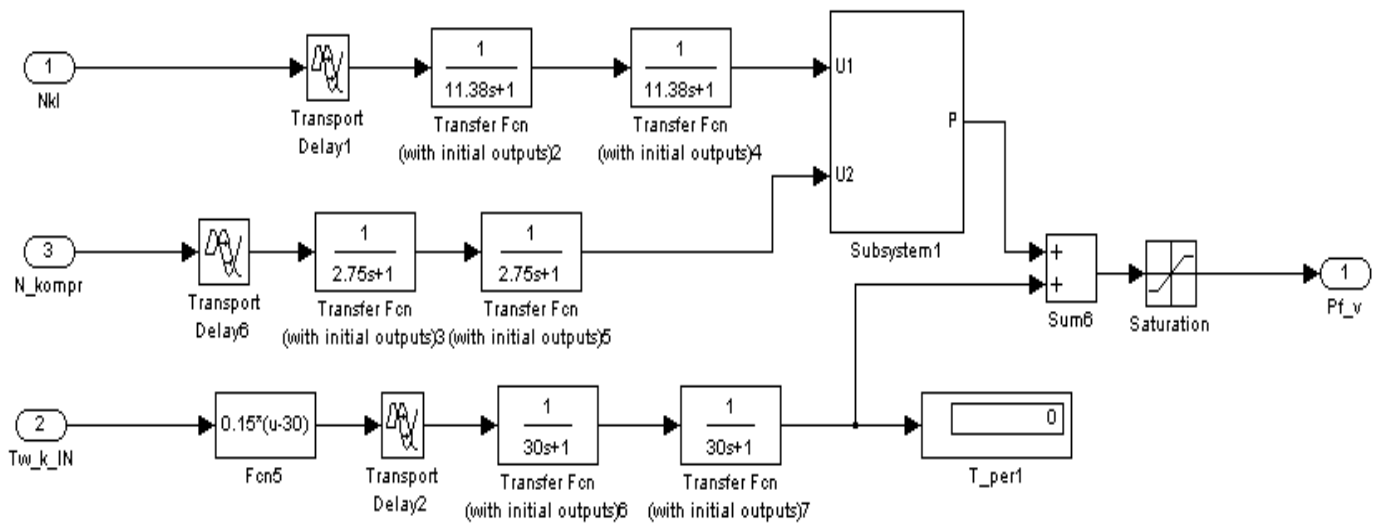


Рис. 3 – реалізація імітаційної моделі ЕРВ у середовищі Simulink

2.3. Імітаційна модель випарника ТН

У реальному тепловому насосі через різницю між температурою рідкого холодоагенту до ЕРВ і температурою, що відповідає тиску після ЕРВ, відбувається його часткове випаровування та охолодження до температури, що відповідає тиску на початку випарника (після ЕРВ). При цьому частина холодоагенту, що випаровується, не бере участі в процесі відбору тепла в випарнику і є «баластовою витратою» (G_{MB}). Тому «ефективна витрата» холодоагенту (G_{ME}), яка бере участь у відборі тепла в випарнику, завжди менше, ніж його загальна витрата через ЕРВ.

$$G_{ME} = G_M - G_{MB}$$

де G_M – загальна масовавитратахолодоагенту крізь ЕРВ;

G_{MB} – баластова витрата холодоагенту (яка не приймає участі у відборі тепла у випарнику).

Баластова витрата холодоагенту розраховується наступним чином:

$$G_{MB} = \frac{(t_{кл1} - t_{кл2}) \cdot C_{fr} \cdot G_M}{L_\phi}$$

де $t_{кл1}, t_{кл2}$ – температури холодоагенту до та після розширювального вентиля (РВ);

C_{fr} – теплоємність холодоагенту при середній температурі на РВ;

L_ϕ – питома теплота пароутворення при середній температурі на РВ.

Реалізація імітаційної моделі підсистеми розрахунку рівнів «ефективної» (G_{ME}) та «баластової» (G_{MB}) витрат холодоагенту в середовищі Simulink представлена на рисунку 4.

Експериментальні дослідження показали, що залежність витрат тиску (а значить і перепаду температур кипіння) на випарнику від витрати холодоагенту не монотонно зростаюча функція. Вона має екстремум і є спадаючою при роботі випарника в режимах близьких до максимальних завантажень [2, 11, 15]. При зміні величини перегріву парів холодоагенту на виході випарника в діапазоні від 15 до 0 °C перепад температур його кипіння за довжиною випарника зменшується на кілька градусів. Що істотно впливає на енергетичні показники його роботи і має бути враховано при побудові імітаційної моделі і розробці алгоритмів керування. Тому при створенні імітаційної моделі випарника до неї була додана підсистема розрахунку перепаду температур кипіння (тиску) по довжині випарника в залежності від витрати холодоагенту, що враховує довжину ділянки випарника на якій відбувається кипіння рідкої фази.

Перепад температур кипіння холодоагенту на випарнику розраховується з використання наступної залежності:

$$\Delta t_B = \left(\frac{G_E}{G_{MAX}} \cdot G_E^2 \cdot K_3 \right) + \left(\left(1 - \frac{G_E}{G_{MAX}} \right) \cdot (G_M \cdot K_P)^2 \cdot K_4 \right)$$

де G_{MAX} – максимально можлива витрата холодоагенту при даних умовах*;

K_P – коефіцієнт розширення холодоагенту при випаровуванні;

K_3, K_4 – емпіричні коефіцієнти, які характеризують питомий опір каналу випарника для газу та рідини.

* – витрати холодоагенту при досягненні нульового перегріву парів на виході випарника.

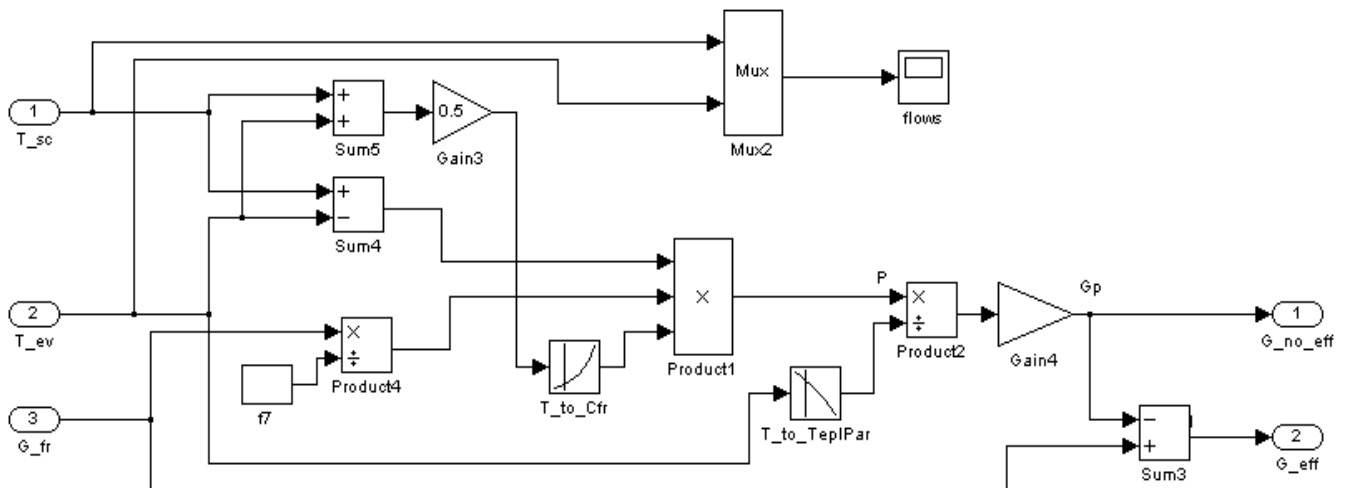


Рис. 4 – Реалізація імітаційної моделі підсистеми розрахунку рівнів «ефективної» (G_{ME}) та «баластової» (G_{MB}) витрат холодоагенту в середовищі Simulink

Тоді температура холодоагенту на вході випарника t_{BB1} (після $EPBt_{KL2}$):

$$t_{BB1} = t_{KL2} = t_{BB2} - \Delta t_B.$$

Імітаційна модель цієї підсистеми, реалізована у середовищі Simulink, представлена на рисунку 5 А, а результати моделювання при різних температурних напорах в випарнику (ΔT_H) на рис 5 Б (1 - $\Delta T_H = 13^\circ C$, 2 - $\Delta T_H = 11^\circ C$, 3 - $\Delta T_H = 9^\circ C$, 4 – точки максимально можливої витрати холодоагенту).

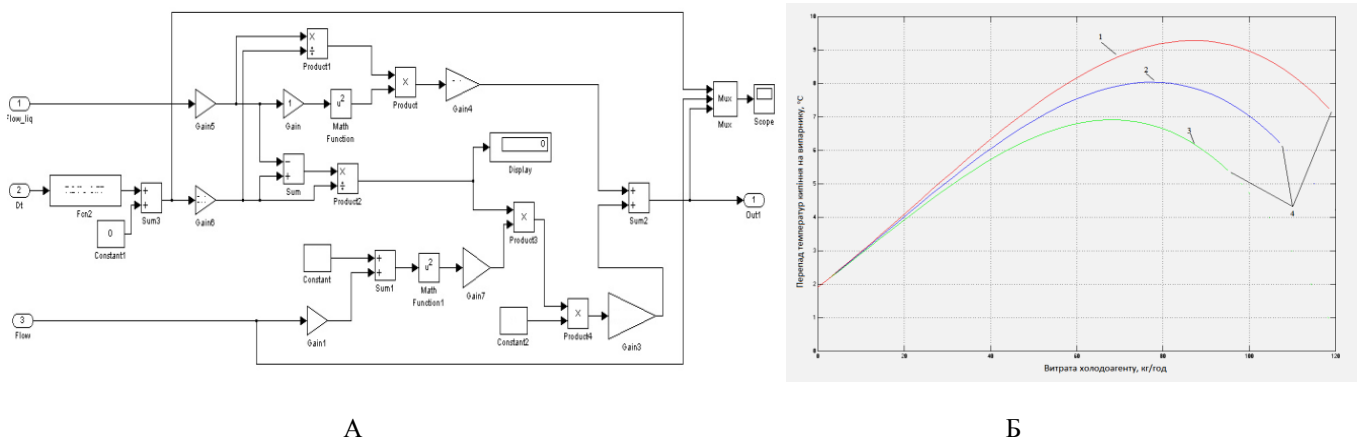


Рис. 5 – Реалізація імітаційної моделі підсистеми розрахунку перепаду температур кипіння холодоагенту у випарнику в середовищі Simulink (А) та результати моделювання при різних температурних напорах в випарнику (Б).

Суттєвий вплив на роботу випарника має температура теплоносія на його вході та його витрата. Ці величини впливають на температурний напір у випарнику і визначають при інших рівних умовах максимально можливе теплове навантаження випарника при наявності перегріву парів холодоагенту на його виході, тобто повному википанні.

Температура теплоносія на виході випарника розраховується за наступним виразом:

$$t_{BB2} = t_{BB1} - \frac{P_{fr} \cdot K_{BT}}{G_{BB} \cdot C_B}$$

де t_{BB1} – температура води на вході в випарник;

P_{fr} – теплова потужність випарника по холодоагенту;

K_{BT} – коефіцієнт втрат потужності ($K_{BT} = 0,9 \dots 0,97$, залежить від конструкції випарника);

G_{BB} – витрата води у випарнику;

C_B – теплоємність води.

Теплова потужність випарника по холодоагенту:



$$P_{fT} = G_{ME} \cdot (I_g - I_l)$$

де I_g – ентальпія газоподібного холодоагенту на виході випарника;

I_l – ентальпія рідкого холодоагенту на вході випарника;

G_{ME} – «ефективна витрата» холодоагенту крізь випарник.

Імітаційна модель випарника включає також динамічні залежності по каналам температури води та холодоагенту на виході випарника, які були ідентифіковані експериментально [2].

Загальна імітаційна модель випарника наведена на рисунку 6.

2.4. Імітаційна модель компресора

Імітаційна модель компресора розраховує масову G_M витрату холодоагенту та електричну потужність компресора P_{el} . На вході в якості вхідних параметрів моделі використовуються частота обертання двигуна компресора, об'єм одного циліндра компресора, кількість циліндрів компресора, коефіцієнт подачі компресора, тиск холодоагенту на вході компресора (на виході випарника), тиск на виході компресора (на вході в конденсатор), температура холодоагенту на вході компресора. Для спрощення моделі в ній не враховуються динамічні властивості компресора, а статичні залежності розраховуються за наступними виразами.

Об'ємна витрата холодоагенту:

$$G_{об} = N_k \cdot V_{cyl} \cdot N_{cyl} \cdot K_n$$

де N_k – частота обертання двигуна компресора;

V_{cyl} – об'єм одного циліндра компресора;

N_{cyl} – кількість циліндрів компресора;

K_n – коефіцієнт подачі компресора.

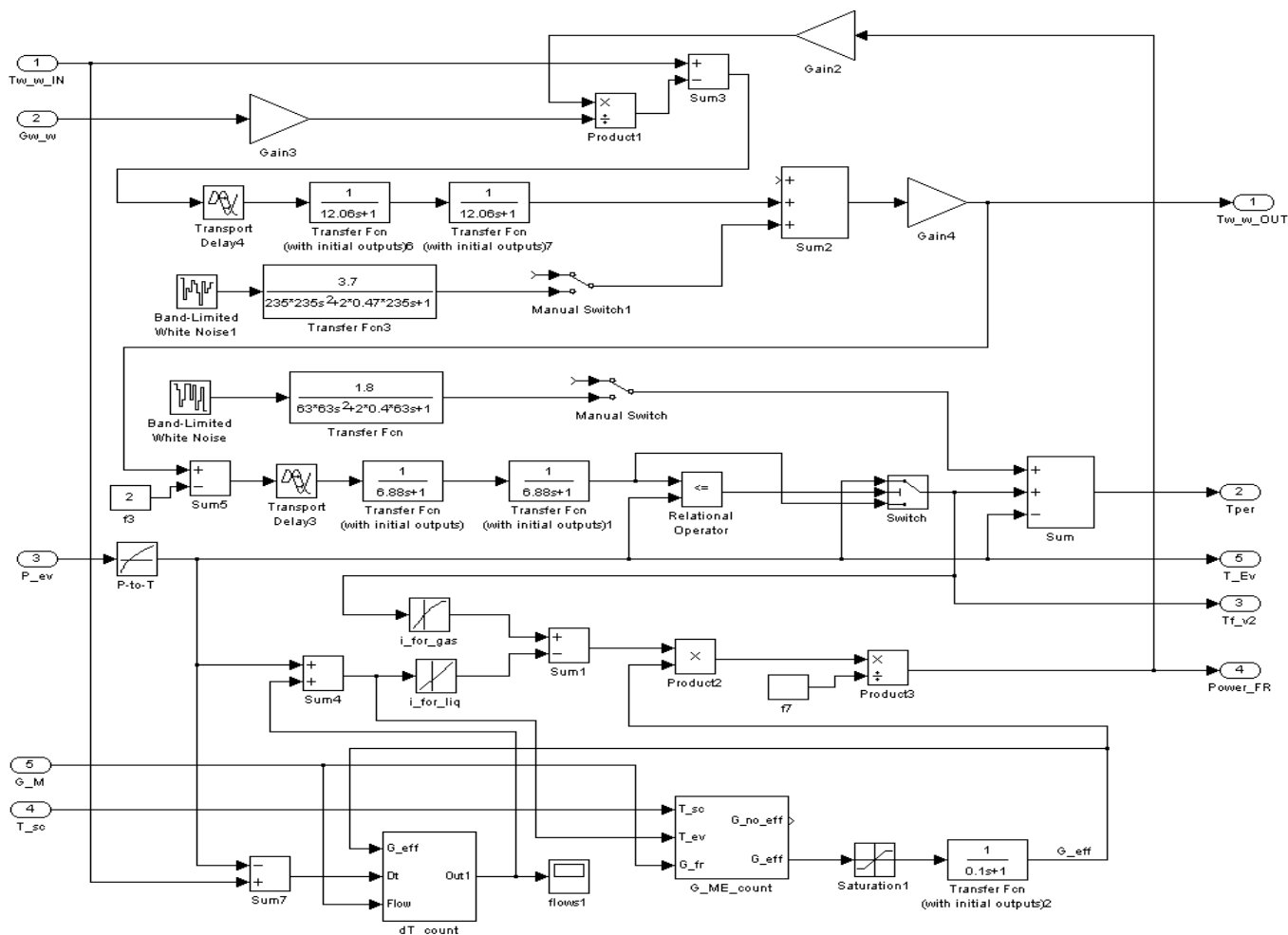


Рис. 6 – Загальна імітаційна модель випарника



Коефіцієнт подачі залежить від значення тисків холодоагенту до та після компресора [3]:

$$K_{\eta} = 1 - \left(\frac{P_K}{P_B} \cdot a \right),$$

де P_K – тиск у конденсаторі;

P_B – тиск у випарнику;

a – коефіцієнт, який враховує об'ємні втрати, притаманні даному типу компресора (для роторних компресорів $a = (0,03 - 0,05)$).

Масова витрата холодоагенту (G_M)[6]:

$$G_M = \frac{G_{об} \cdot P_B \cdot M_{fr}}{R \cdot T} \cdot K_K$$

де P_B – тиск холодоагенту на вході компресора;

M_{fr} – молярна маса холодоагенту;

R – універсальна газова постійна;

T – температура перегрітого холодоагенту на вході компресора;

K_K – коригувальний коефіцієнт, враховуючий не ідеальність газу.

Електрична потужність компресора (P_{ei}):

$$P_{ei} = ((P_K - P_B) \cdot K_1 + P_B \cdot K_2) \cdot \eta_K$$

де P_K – тиск холодоагенту на виході компресора;

P_B – тиск холодоагенту на вході компресора;

K_1, K_2 – емпіричні коефіцієнти (залежать від типу компресора);

$\eta_K = f(N_K)$ – ККД електропривода (залежить від частоти обертання компресора та типу електропривода).

Реалізація блоку розрахунку електричної потужності компресора та загальної моделі компресора в середовищі Simulink наведена на рисунках 7 та 8 відповідно.

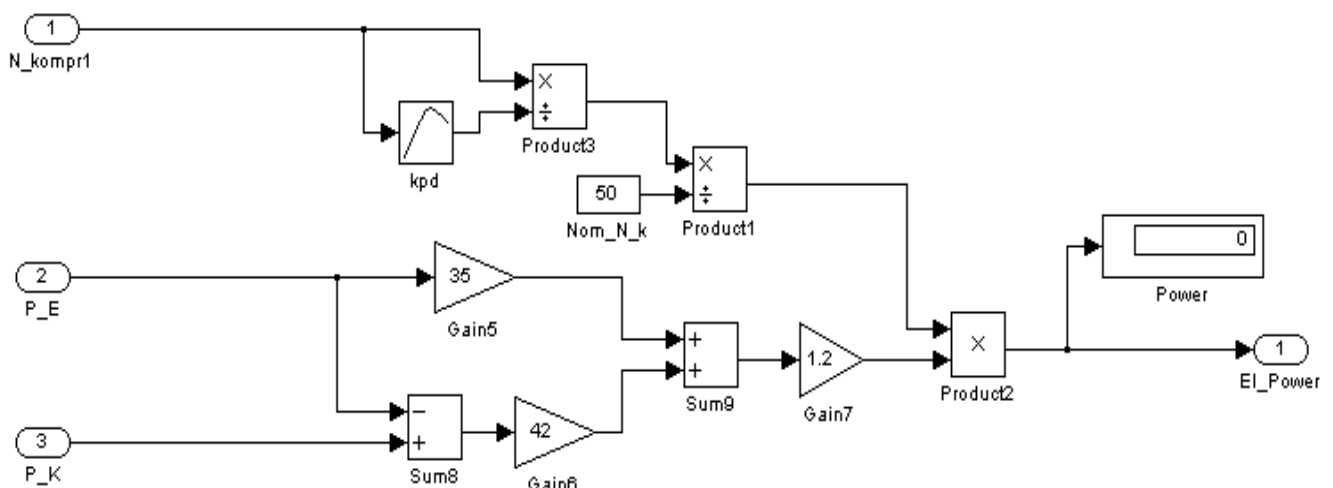


Рис. 7 – Реалізація блоку розрахунку електричної потужності компресора

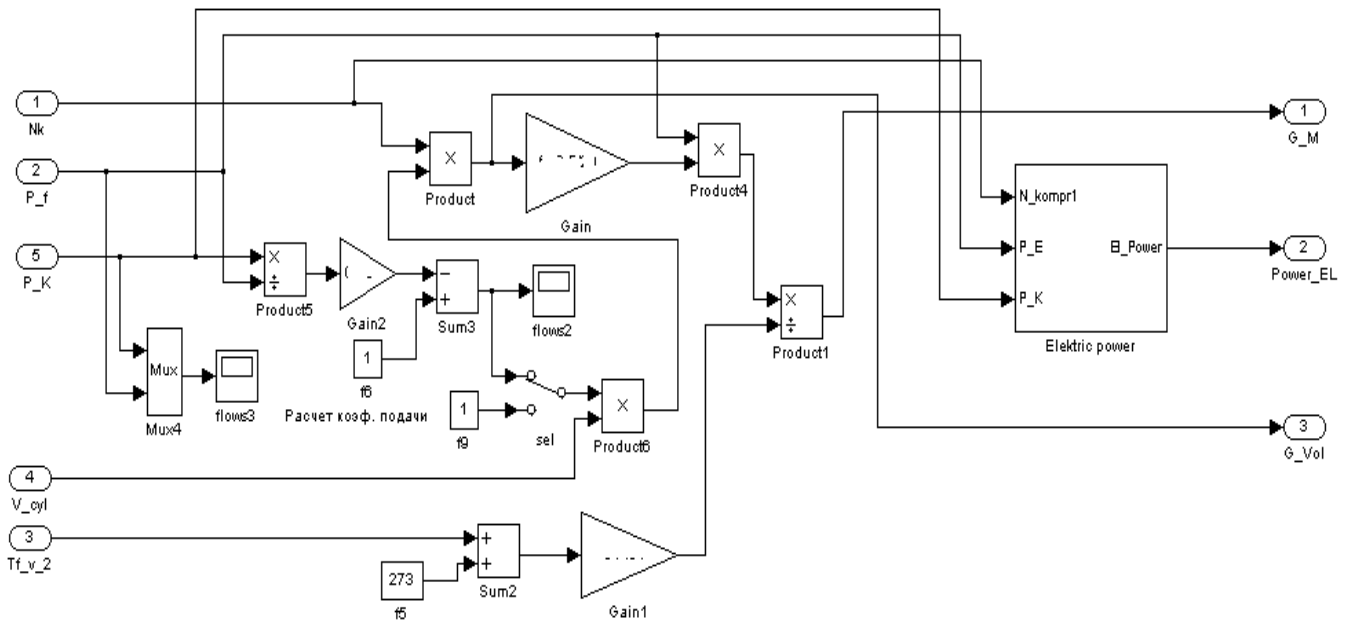


Рис. 8 – Загальна імітаційна модель компресора

2.5. Імітаційна модель конденсатора

Вхідними параметрами моделі є теплова потужність випарника (P_{fr}), електрична потужність компресора (P_{el}), температура (t_{BK1}) та витрата води крізь конденсатор (G_{BK}). Розглядаючи конденсатор як об'єкт з зосередженими параметрами та виходячи з того, що у системі в статичних режимах підтримуються тепловий та енергетичний баланси, можна розрахувати теплову потужність (P_k), яка виділяється на конденсаторі як суму потужностей випарника та компресора з урахуванням втрат в навколишнє середовище:

$$P_k = (P_{fr} + P_{el} \cdot K_{вте})$$

- де P_{fr} – теплова потужність випарника по холодоагенту;
- P_{el} – електрична потужність споживана компресором;
- $K_{вте}$ – коефіцієнт втрат теплової потужності на двигуні

Тоді температура води на виході конденсатора (t_{BK2}):

$$t_{BK2} = t_{BK1} + \frac{P_k \cdot K_{втк}}{G_{BK} \cdot C_B}$$

- де t_{BK1} – температура води на вході в конденсатор;
- $K_{втк}$ – коефіцієнт втрат теплової потужності на конденсаторі;
- G_{BK} – витрата води крізь конденсатор;
- C_B – теплоємність води.

Температура конденсації холодоагенту (t_{KD}) залежить від температури води на виході конденсатора та щільності теплового потоку крізь нього, яка в свою чергу залежить від потужності, що виділяється на конденсаторі та його конструкції [1]:

$$t_{KD} = t_{BK2} + (P_{fr} + P_{el}) \cdot K_5$$

- де K_5 – емпіричний коефіцієнт, який залежить від конструкції конденсатора.

Температура холодоагенту на виході конденсатора ($t_{\Phi K2}$):

$$t_{\Phi K2} = t_{BK1} + (P_{fr} + P_{el}) \cdot K_6$$

- де K_6 – емпіричний коефіцієнт, який залежить від конструкції конденсатора.

Динамічні властивості каналів описуються ланками, передатні функції яких були отримані у [2].

На рисунку 9 представлена реалізація імітаційної моделі конденсатора у середовищі Simulink.

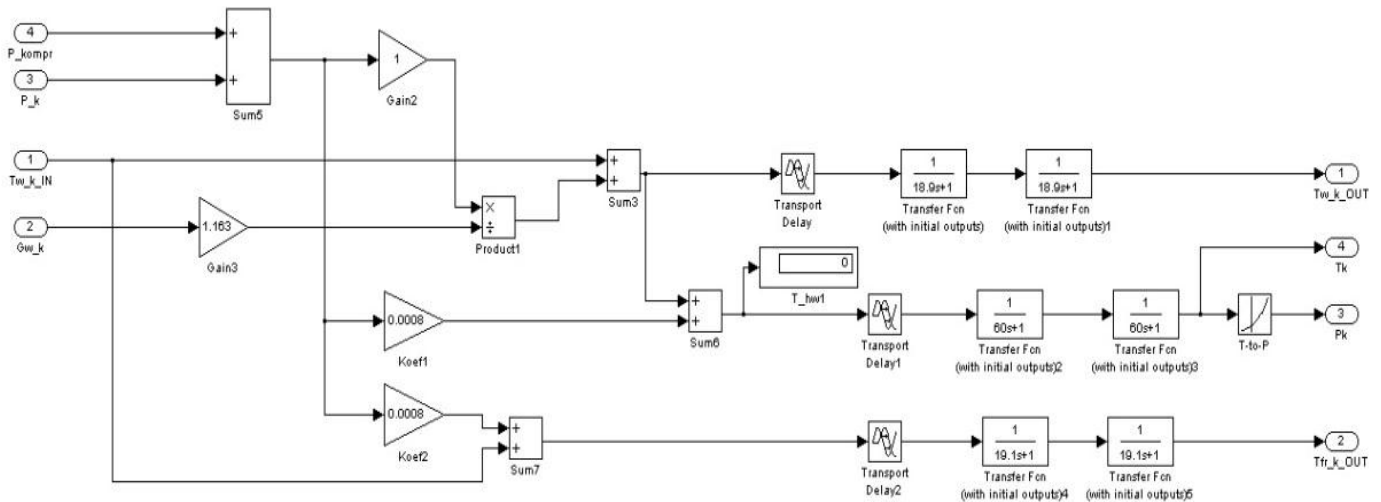


Рис. 9 – реалізація імітаційної моделі конденсатора у середовищі Simulink

2.6. Імітаційна модель переохолоджувача

Вхідними параметрами моделі є температура ($t_{ВП1}$) та витрата ($G_{ВП}$) води крізь переохолоджувач, а також температура ($t_{ФП1}$) та витрата (G_M) холодоагенту крізь нього. Переохолоджувач також розглядається як об'єкт з зосередженими параметрами. Потужність, що виділяється на переохолоджувачі рідкого холодоагенту ($P_{П}$) розраховується за наступною залежністю:

$$P_{П} = G_M \cdot (I_{I1} - I_{I2}),$$

де I_{I1} та I_{I2} – ентальпії рідкого холодоагенту на вході і виході переохолоджувача відповідно;

Температура води на виході переохолоджувача рідкого холодоагенту ($t_{ВП2}$):

$$t_{ВП2} = t_{ВП1} + \frac{P_{П}}{G_{ВП} \cdot c_B},$$

де $t_{ВП1}$ – температура води на вході в переохолоджувач;

$P_{П}$ – теплова потужність переохолоджувача;

$G_{ВП}$ – витрата води через переохолоджувач.

Температура холодоагенту на виході переохолоджувача ($t_{ФП2}$):

$$t_{ФП2} = t_{ВП1} + P_{П} \cdot K_7,$$

де $t_{ВП1}$ – температура води на вході переохолоджувача;

$P_{П}$ – теплова потужність переохолоджувача;

K_7 – емпіричний коефіцієнт, який залежить від конструкції.

Динамічні властивості каналів описуються ланками, передатні функції яких були отримані у [2].

Реалізація імітаційної моделі переохолоджувача у середовищі Simulink представлена на рисунку 10.

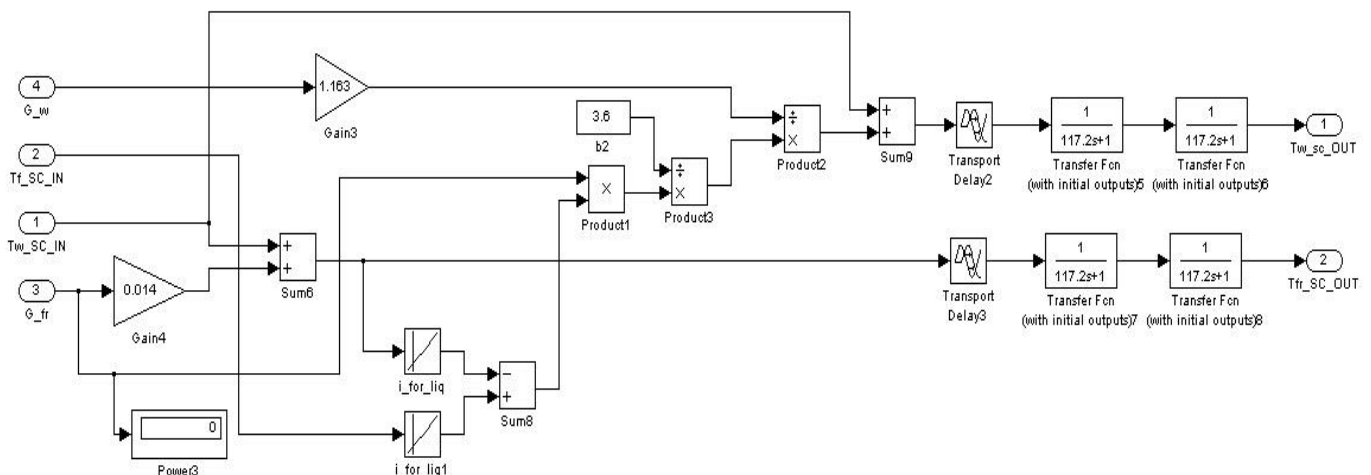


Рис. 10 – реалізація імітаційної моделі переохолоджувача у середовищі Simulink



2.7. Імітаційна модель контактного теплообмінника-утилізатора тепла ППС

Вхідними параметрами моделі є температура ($t_{ВТУ1}$) та витрата ($G_{ВТУ}$) охолоджуючої води, а також температура ($t_{ППС1}$), витрата ($G_{ППС}$) та вологовміст (f_1) ППС. В моделі контактний теплообмінник-утилізатор (ТУ) ППС, також розглядається як об'єкт з зосередженими параметрами. Витрати охолоджуючої води через ТУ прийняті сталими і керування потужністю здійснюється за рахунок зміни її температури.

Експериментальні дослідження показали, що залежність температури ППС на виході ТУ від температури води на його вході з достатнім ступенем достовірності можна описати лінійним рівнянням[12]:

$$t_{ППС2} = t_{ВТУ1} \cdot K_g + b,$$

де $t_{ВТУ1}$ – температура води на вході в теплоутилізатор;

K_g, b – емпіричні коефіцієнти, які залежать від конструкції ТУ.

Теплова потужність, яка відбирається від ППС ($P_{ТУ}$) складається з чотирьох частин [12]: потужності охолодження повітря ($P_{ОП}$), потужність, яка виділяється при охолодженні водяних парів до точки конденсації ($P_{ОВП}$), потужність, яка виділяється при конденсації водяних парів ($P_{КП}$), потужність, яка виділяється при переохолодженні конденсату до температури води на виході ТУ ($P_{ПК}$).

$$P_{ТУ} = P_{ОП} + P_{ОВП} + P_{КП} + P_{ПК}$$

$$P_{ОП} = G_{ППС} \cdot C_{П} \cdot (t_{ППС1} - t_{ППС2})$$

$$P_{ОВП} = f_1 \cdot G_{ППС} \cdot C_{в} (t_{ППС1} - t_{Кс})$$

$$P_{КП} = (f_1 - f_2) \cdot G_{ППС} \cdot L_{в}$$

$$P_{ПК} = (f_1 - f_2) \cdot G_{ППС} \cdot C_{в} \cdot (t_{Кс} - t_{ВТУ2})$$

$$P_{ТУ} = G_{ППС} \cdot C_{П} \cdot (t_{ППС1} - t_{ППС2}) + f_1 \cdot G_{ППС} \cdot C_{в} (t_{ППС1} - t_{Кс}) + (f_1 - f_2) \cdot G_{ППС} \cdot L_{в} + (f_1 - f_2) \cdot G_{ППС} \cdot C_{в} \cdot (t_{Кс} - t_{ВТУ2})$$

Де: f_1 – абсолютний вологовміст ППС при температурі $t_{ППС1}$;

f_2 – максимально можливий абсолютний вологовміст ППС виході ТУ при температурі $t_{ППС2}$;

$G_{ППС}$ – витрата ППС через ТУ;

$C_{П}$ – теплоємність повітря;

$t_{ППС1}$ – температура ППС на вході в ТУ;

$t_{ППС2}$ – температура ППС на виході з ТУ;

$L_{в}$ – питома теплота пароутворення води при середній температурі конденсації.

Температура води на виході теплоутилізатора ($t_{ВТУ2}$):

$$t_{ВТУ2} = t_{ВТУ1} + \frac{P_{ТУ} \cdot K_{втту}}{G_{ВТУ} \cdot C_{в}}$$

де: $t_{ВТУ1}$ – температура води на вході в теплоутилізатор;

$P_{ТУ}$ – теплова потужність теплоутилізатора;

$K_{втту}$ – коефіцієнт втрат потужності на теплоутилізаторі;

$G_{ВТУ}$ – витрата води через теплоутилізатор.

Динамічні властивості каналів описуються ланками, передатні функції яких були отримані у [2].

Реалізація імітаційної моделі теплоутилізатора в середовищі Simulink представлена на рисунку 11.

2.8. Складання загальної імітаційної моделі

На рисунку 12 представлена реалізація загальної імітаційної моделі процесу УТПВС з використанням ТН в середовищі Simlink. До складу моделі в якості підсистем входять моделі розглянуті вище.

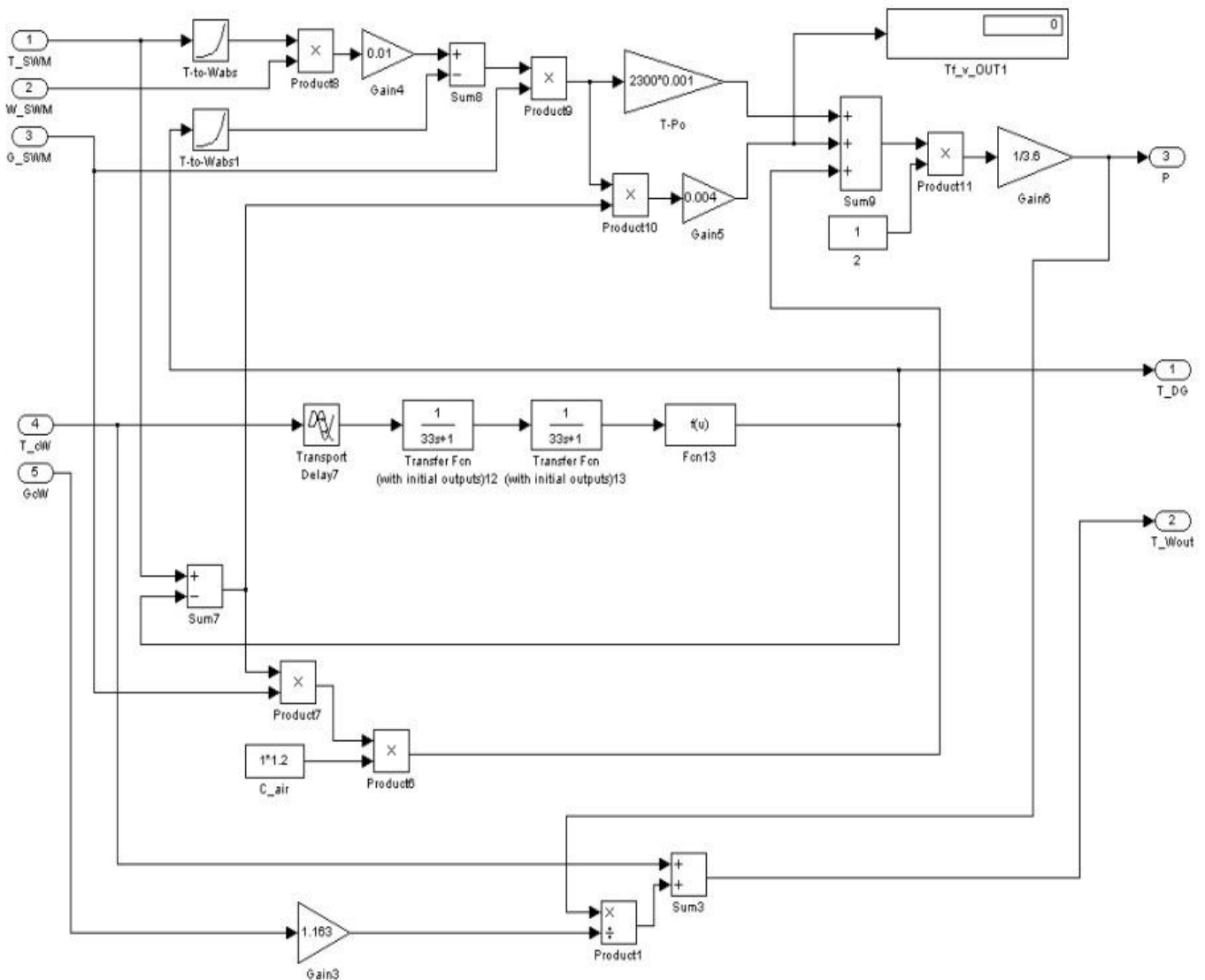


Рис. 11 – реалізація імітаційної моделі теплоутилізатора в середовищі Simulink

3. Перевірка моделі на адекватність

Для перевірки моделі на адекватність було проведено ряд комп'ютерних експериментів та отримані квазістатичні та динамічні залежності по основним каналам перетворення.

На рисунку 13 А представлено сімейство отриманих в результаті проведення експерименту та при моделюванні квазістатичних залежностей тиску у випарнику від положення ЕРВ при різних частотах обертання компресора (1 - 45 об/с, 2 - 50 об/с, 3 - 55 об/с, 4 - 60 об/с), а на рисунку 13 Б - при різних температурах води на вході конденсатора (1 - 45°C, 2 - 40°C, 3 - 35°C, 4 - 30°C)

На рисунку 13 В представлено сімейство отриманих в результаті проведення експерименту та при моделюванні квазістатичних залежностей тиску у випарнику від частоти обертання компресора при різних положеннях ЕРВ (1 - 300 кр, 2 - 350 кр, 3 - 400 кр, 4 - 450 кр), а на рисунку 13 Г - при різних температурах води на вході конденсатора (1 - 45°C, 2 - 40°C, 3 - 35°C, 4 - 30°C).

На рисунку 14 А представлені результати моделювання перехідного процесу при ступінчастій зміні частоти обертання компресора з 40 до 60 об/с. На рисунку: 1 - температура кипіння, 2 - тиск у випарнику, 3 - температура перегріву холодоагенту.

На рисунку 14 Б представлені результати моделювання динамічних властивостей при ступінчастій зміні положення ЕРВ з 400 до 500 кроків. На рисунку: 1 - температура кипіння, 2 - тиск у випарнику, 3 - температура перегріву холодоагенту.

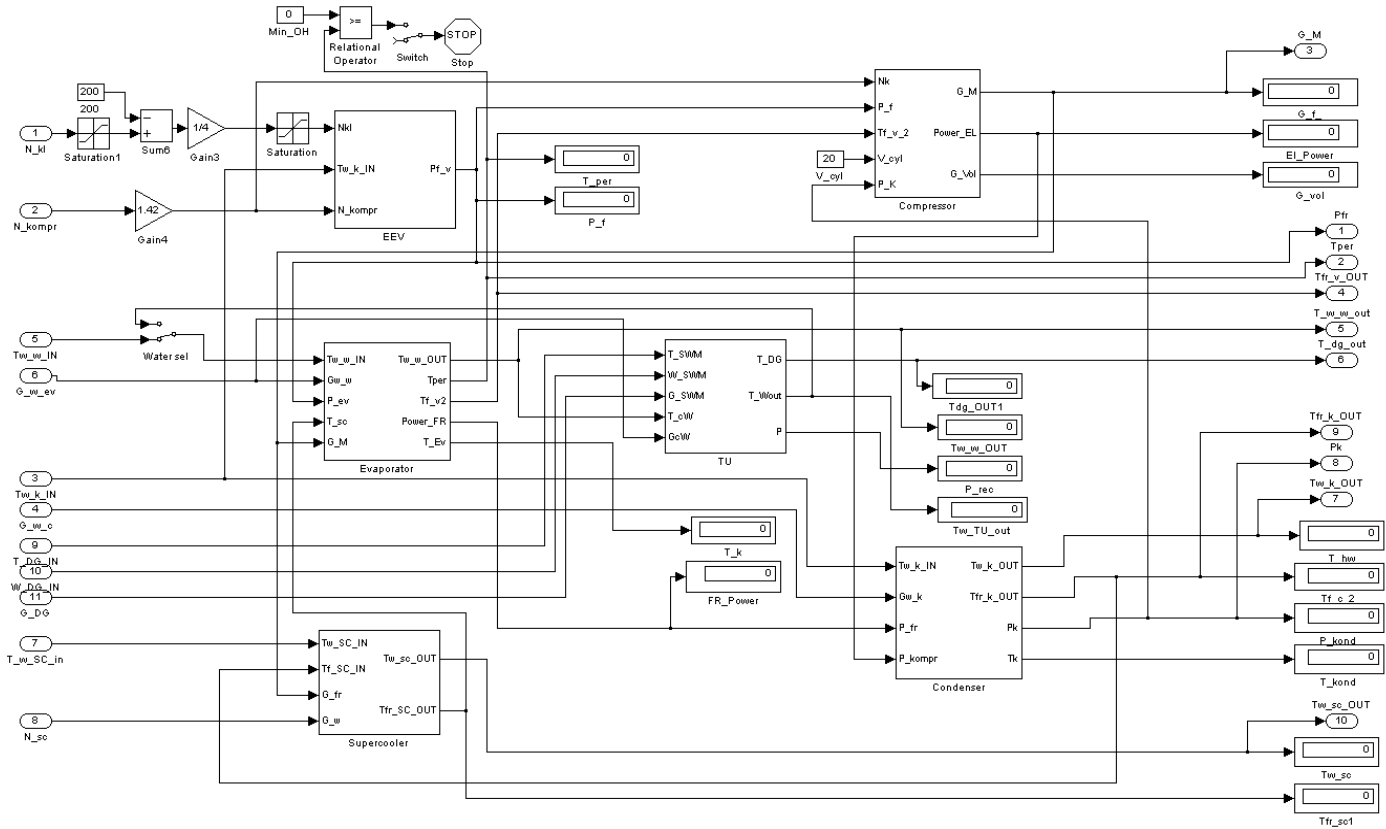


Рис. 12 – реалізація загальної імітаційної моделі процесу УТПВС з використанням ТН в середовищі Simlink

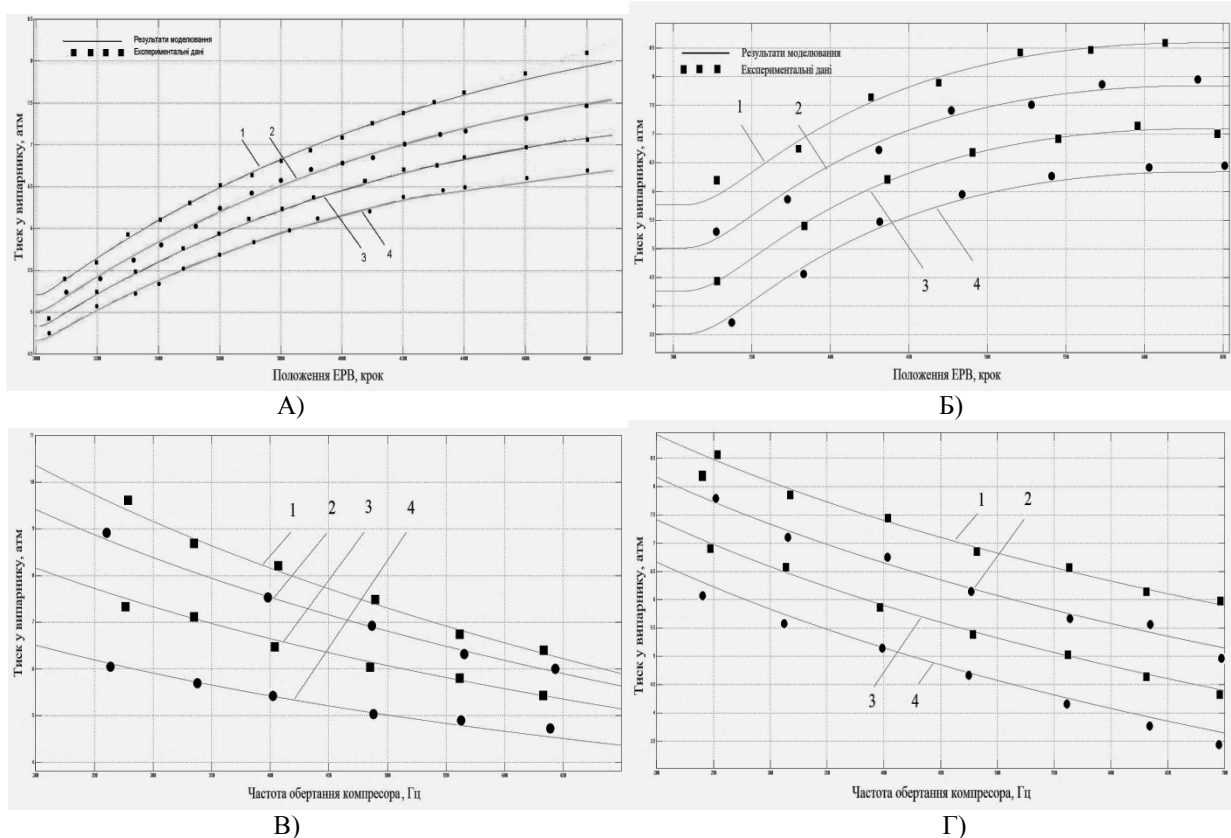


Рис. 13 – порівняння експериментальних даних та результатів моделювання статичних характеристик

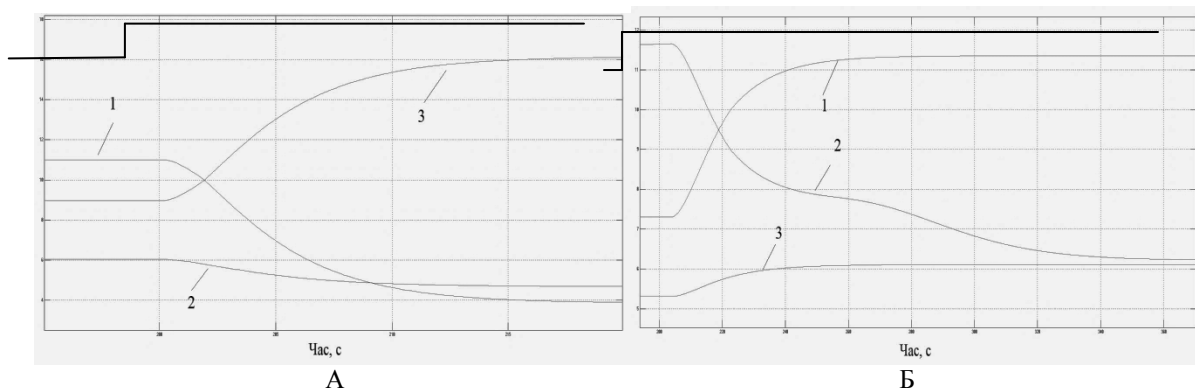


Рис. 14 – порівняння експериментальних даних та результатів моделювання динамічних характеристик

Представлені результати досліджень свідчать про те, що розроблену імітаційну модель можна вважати адекватною, оскільки вона досить точно відтворює процеси, які протікають в реальній системі УТПВС з використанням ТН.

4. Висновки

В результаті виконаної роботи була розроблена імітаційна модель процесу утилізації тепла ПВС з використанням теплового насоса. До складу імітаційної моделі процесу УТПВС входять імітаційні моделі компресора, конденсатора, електронного розширювального вентиля, випарника, переохолоджувача та контактного теплообмінника – утилізатора тепла пароповітряних сумішей. Імітаційні моделі цих складових побудовані з використанням експериментальних даних, отриманих авторами в результаті виконання фізичних натурних експериментів на лабораторній дослідній установці.

Модель досить точно відтворює фізичні властивості реальної системи, про що свідчить перевірка її на адекватність і може бути використаною при розробці енергоефективних алгоритмів керування процесом УТПВС з використанням ТН а також для оцінки рівня ефективності використання утилізації тепла ППС для конкретних умов.

В імітаційній моделі випарника теплового насоса реалізовано функцію розрахунку «баластної» та «ефективної» витрати холодоагенту. «Баластна» витрата виникає за рахунок переохолодження холодоагенту до температури кипіння і супроводжується випаровуванням його частки, яка не приймає участі у відборі тепла випарником. Для цього до імітаційної моделі випарника була додана підсистема розрахунку перепаду температур кипіння (тиску) по довжині випарника в залежності від витрати холодоагенту та температурного напору у випарнику, що враховує довжину ділянки випарника на якій відбувається кипіння рідкої фази. Залежність перепаду температури (тиску) кипіння по довжині випарника від витрат холодоагенту через нього є не монотонно зростаючою функцією а має екстремум і спадає при рівнях перегрівів холодоагенту від 15 до 0 °С на декілька градусів. Тиск на виході випарника розраховується в моделі з використанням нелінійної функції двох змінних – положення клапана ЕРВ та частоти обертання компресора. Динамічні властивості каналів описуються ланками, передатні функції яких були отримані в результаті фізичних експериментів.

Порівняння результатів моделювання та фізичного експерименту показало високу ступінь їх схожості.

Список використаних джерел

- [1] Ковальчук Д. А., Мазур О. В., Гудзь С. С. Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: лабораторна установка, вимірювані змінні, автоматизація експериментів //Automation of technological and business processes. – 2018. – Т. 10. – №. 2.
- [2] Ковальчук Д. А., Мазур О. В., Хобін В. А. Дослідження процесів утилізації тепла пароповітряних сумішей: результати експериментів, структурна та параметрична ідентифікація основних каналів об'єкту //Automation of technological and business processes. – 2019. – Т. 11. – №. 1.
- [3] Карелин Д. Л. Динамическая модель пароконденсационной системы охлаждения энергетических машин. Вестник ТюмГУ: Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. 2018. Том 4 № 2.
- [4] Розенфельд, Л. М., Ткачев, А. Г. Холодильные машины и аппараты. Госторгиздат, Москва, ГИТЛ, 1960, 666 с.
- [5] Kovalchuk D., Mazur A., Hudz S. The model for power efficiency assessment of condensation heating installations //Автоматизация технологических та бизнес-процесів. – 2017. – Т. 9. – №. 3.
- [6] Касаткин, А. Г. Основные процессы и аппараты химической промышленности. М.: Госхимиздат, 1971.
- [7] Ефимов, А. В., Гончаренко, А. Л. Математическая модель системы "котел–теплоутилизатор" // Вестник Национального технического университета Харьковский политехнический институт. Серия: Информатика и моделирование. 2010. №21. С. 76-87. http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2010_21.pdf
- [8] Jin, Hui, and Jeffrey D. Spitler. "A parameter estimation based model of water-to-water heat pumps for use in energy calculation programs." *ASHRAE transactions* 108 (2002): 3.
- [9] Чемяков, В. В. (2012). Построение математической модели системы автономного теплоснабжения на базе теплового насоса. Научно-технические ведомости СПбПУ. Естественные и инженерные науки, (2-2 (147)).
- [10] Казаков, В. Г., Луканин, П. В., & Смирнова, О. С. (2011). Термодинамические методы анализа в энергоиспользующих процессах: учебное пособие. СПб ГТУРП. СПб., 2011, 93 с.



- [11] Ейдеюс А. И., Кошелев С. В., Никишин М. Ю. Теплоотдача и падение давления при кипении хладагентов в змеевиках // Вестник Международной академии холода. 2016. № 2. С. 42–47.
- [12] Кудинов, А. А. *Энергосбережение в теплогенерирующих установках*. Ульяновск: УлГТУ, 2000. 139 с.
- [13] Кишкин, А. А., Лавров, Н. А., Делков, А. В., Мокеев, В. В. (2012). Моделирование режимов работы малых холодильных установок. Инженерный журнал: наука и инновации, 5 (5). 91-98 DOI: 10.18698/2308-6033-2012-5-187
- [14] Шешунова, Е. В., & Зиновьев, К. А. (2017). Математическое моделирование работы теплового насоса. *Вестник АПК Верхневолжья*, (1), 73-78.
- [15] Малышев, А. А., Мамченко, В. О., Мизин, В. М., Потанина, А. В., Прошин, С. И., Девятов, Т. И. (2013). Перспективные типы испарителей холодильных машин. *Вестник Международной академии холода*, (2). С. 13-18
- [16] Иваняков, С. В., Конигин, С. Б. Гидродинамика насадочных аппаратов. Самара; Самар. гос. техн. ун-т, 2008. 44 с.
- [17] Кулагин, В. А., Пьяных, Т. А. (2013). Расчет режимных параметров суперкавитационного испарителя. In *ТА Пьяных//Research Journal of International Studies: сб. по результатам XVIII заочной научной конференции.– Екатеринбург: ООО «Европринт»* (pp. 56-59).
- [18] Kandlikar, S. G. (1990). A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes.
- [19] Компрессоры холодильные объемного действия: методы испытания [Электронный ресурс]. – 2005. – Режим доступа: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294826/4294826223.htm>. (Дата зверения: 11.11.2019)

References

- [1] Kovalchuk, D. A., Mazur, O. V., Gudz, S. S. Doslidzhennya protsesiv utilizatsiyi tepla paropovitryanih sumishey: laboratorna ustanovka, vimiryuvani zminni, avtomatizatsiya eksperimentiv. Automation of technological and business processes, 2018, Vol. 10, No. 2, pp. 64-72. Doi: <https://doi.org/10.15673/atbp.v10i2.981>
- [2] Kovalchuk, D. A., Mazur, O. V., Hobin, V. A. A research of steam-air mixtures heat utilization processes: experiment results, structural and parametric identification of the object main channels. Automation of technological and business processes, 2019, Vol. 11, No. 1, pp. 32-42. Doi: <https://doi.org/10.15673/atbp.v11i1.1327>
- [3] Karelin, D. L. Dinamicheskaya model parokompressionnoi sistemyi ohlazhdeniya energeticheskikh mashin. Vestnik TyumGU: Fiziko-matematicheskoe modelirovanie. Neft, gaz, energetika, 2018, Vol. 4, No. 2.
- [4] Rozenfeld, L. M., Tkachev, A. G. Holodilnyie mashinyi i apparaty. Gostorgizdat, Moskva, GITL, 1960, 666 p.
- [5] Kovalchuk, D., Mazur, A., Hudz, S. The model for power efficiency assessment of condensation heating installations. Automation of technological and business processes, 2017, Vol. 9, No. 3, pp. 13-19. DOI <https://doi.org/10.15673/atbp.v9i3.715>
- [6] Kasatkina, A. G. Osnovnyie protsessy i apparaty himicheskoy promyshlennosti. M.: Goshimizdat, 1971.
- [7] Efimov, A. V., Goncharenko, A. L. Matematicheskaya model sistemyi "kotel–teploutilizator". Vestnik natsionalnogo tehnikeskogo universiteta "Harkovskiy politehnicheskii institut". Seriya: Informatika i modelirovanie, 2010, No. 21, pp. 76-87. http://library.kpi.kharkov.ua/files/Vestniki/2010_21.pdf
- [8] Jin, Hui, Jeffrey D. Spitler. A parameter estimation based model of water-to-water heat pumps for use in energy calculation programs. ASHRAE transactions 108 (2002): 3.
- [9] Chemekov, V. V. (2012). Postroenie matematicheskoy modeli sistemyi avtonomnogo teplosnabzheniya na baze teplovogo nasosa. Nauchno-tehnicheskie vedomosti SPbPU. Estestvennyie i inzhenernyie nauki, 2-2 (147).
- [10] Kazakov, V. G., Lukanin, P. V., Smirnova, O. S. (2011). Termodinamicheskie metody analiza v energoispolzuyuschih protsessah: uchebnoe posobie. SPb GTURP. SPb., 2011, 93 p.
- [11] Eideyus, A. I., Koshelev, S. V., Nikishin, M. Yu. Heat transfer and pressure drop at refrigerant boiling in the plate coils. Vestnik Mezhdunarodnoy akademii holoda, 2016, No.2, pp. 42-47. Doi: 10.21047/1606-4313-2016-15-2-42-47
- [12] Kudinov, A. A. Energoberezhenie v teplogeneriruyuschih ustanovkakh. Ulyanovsk: UIGTU, 2000. 139 p.
- [13] Kishkin, A. A., Lavrov, N. A., Delkov, A. V., Mokeev, V. V. (2012). simulation of operating modes of small-productivity refrigeration units. Eng. J.: Science and Innovation, 5 (5), pp. 91-98. DOI: 10.18698/2308-6033-2012-5-187
- [14] Sheshunova, E. V., & Zinovev, K. A. (2017). Matematicheskoe modelirovanie raboty teplovogo nasosa. Vestnik APK Verhnevolyzha, 1, 73-78.
- [15] Malyshev, A. A., Mamchenko, V. O., Mizin, V. M., Potanina, A. V., Proshin, S. I., Devyatov, T. I. (2013). Perspektivnyie tipy ispariteley holodilnyih mashin. Vestnik Mezhdunarodnoy akademii holoda, 2, pp. 13-18.
- [16] Ivanyakov, S. V., Konyigin, S. B. Gidrodinamika nasadochnyih apparatov. Samara; Samar. gos. tehn. un-t, 2008, 44 p. <http://window.edu.ru/resource/333/77333/files/gad-nasadka.pdf>
- [17] Kulagin, V. A., & Pyanyih, T. A. (2013). Raschet rezhimnyih parametrov superkavitatsionnogo isparitelya. In *ТА Pyanyih. Research Journal of International Studies. Ekaterinburg: ООО Европринт*, pp. 56-59.
- [18] Kandlikar, S.G. A general correlation for saturated two-phase flow boiling heat transfer inside horizontal and vertical tubes. J. Heat Transfer, 1990, 112(1), pp. 219-228. Doi: <https://doi.org/10.1115/1.2910348>
- [19] Компрессоры холодильные объемного действия: методы испытания [Elektronnyi resurs]. 2005. Access mode: <https://files.stroyinf.ru/Data2/1/4294826/4294826223.htm>. Date of access: 11 November 2019.