



УДК 681.518.5; 621.565:621.59

# ОПТИМІЗАЦІЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ СИСТЕМ КОМФОРТНОГО КОНДИЦІОНУВАННЯ ПОВІТРЯ ЗА РАХУНОК ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМОВАНИХ ЛОГІЧНИХ КОНТРОЛЕРІВ

Ю. О. Очеретяний<sup>1</sup>, А.І. Головань<sup>2</sup>, Ю.М. Федорова<sup>1</sup><sup>1</sup>Національний університет «Одеська морська академія», вул. Дідріхсона 8, Одеса, 65029, Україна<sup>2</sup>Одеський національний морський університет, вул. Мечникова 34, Одеса, 65029, УкраїнаORCID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0002-8239-7587>, <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0001-6589-4381>e-mail: <sup>1</sup>och2008@ukr.net; <sup>2</sup>andrew.golovan@gmail.com

Copyright © 2020 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: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1704>

**Анотація.** Різноманітний кліматичний режим Світового океану та стан водної поверхні грають істотну роль у формуванні мікроклімату внутрішньосуднових приміщень. Гідрометеорологічні умови, викликаючи різні фізіологічні відхилення від норми у пасажирів і екіпажу, можуть створити у перших незадоволення морською подорожжю, а другим ускладнити виконання службових обов'язків по управлінню судном. Основним призначенням судової системи комфортного кондиціонування повітря (ССККП) є автоматична підтримка заданих параметрів мікроклімату внутрішньосуднових приміщень незалежно від зміни в часі та просторі зовнішніх гідрометеорологічних умов навколишнього середовища. До найбільш поширених на морському флоті способам автоматичного керування і регулювання ССККП відноситься спосіб регулювання шляхом зміни температури холодоносія, яка в свою чергу регулюється зміною продуктивності компресора за допомогою системи керування «Unisab». Дана система допускає регулювання продуктивності компресора в автоматичному режимі, однак, виникає необхідність в завданні значення температури холодоносія механіком в залежності від мінливих зовнішніх і внутрішніх умов навколишнього середовища. Запропонована модель використання програмованих логічних контролерів в якості генератора сигналу управління завданням температури холодоносія дозволяє вирішити проблему коректного регулювання і таким чином збільшити надійність та енергоефективність експлуатації ССККП.

**Abstract.** The diverse climatic regime of the oceans and the state of the water surface play a significant role in the formation of the microclimate of intravascular spaces. Hydro-meteorological conditions, causing various physiological deviations from the norm in passengers and crew, can in the first place create dissatisfaction with the sea voyage, and in the second complicate the performance of official duties for managing the ship. The primary purpose of the Comfortable Air Conditioning system is to automatically support the set microclimate parameters of intravascular premises, regardless of changes in the weather and space of external environmental meteorological conditions. The most common methods in the Navy are the automatic control and regulation of the SCACS control method by changing the temperature of the coolant, which in turn is governed by the change in compressor performance by the Unisab control system. This system allows the regulation of the compressor productivity in the automatic mode, however, there is a need to set the value of the temperature of the coolant by a mechanic, depending on the changing external and internal environmental conditions. The proposed model of the use of programmable logic controllers as a generator of the control signal of the temperature control of the cold carrier allows to solve the problem of correct regulation and thus to increase the reliability and energy efficiency of operation of the SCACS.

**Ключові слова:** суднова система комфортного кондиціонування повітря; суднова холодильна установка; гідрометеорологічні умови; система керування; холодоносії; енергоефективність; програмовані логічні контролери

**Keywords:** ship's system of comfortable air conditioning; ship refrigeration unit; hydrometeorological conditions; control system; cold carrier; energy efficiency; programmable logic controllers

## 1. Вступ

Відомо, що комфортне кондиціонування повітря на суднах забезпечує процес підтримання у всіх житлових приміщеннях заданих комфортних значень параметрів повітря (найчастіше температури і вологості) незалежно від зміни умов навколишнього середовища та в середині приміщень.



При температурі зовнішнього повітря нижче ніж 10°C ССККП повинна працювати у режимі обігріву, а при температурі вище 23 °С – у режимі охолодження. В інтервалі температур від 10°C до 23 °С – у режимі вентиляції.

Таким чином кондиціонування включає тепло вологу обробку повітря, забезпечення його нормального хімічного складу, доведення повітря до фізіологічних кондицій (озонування, іонізацію). У суднових приміщеннях параметри повітря змінюються інтенсивніше, ніж у берегових, у зв'язку з їх малим обсягом і високою теплопровідністю огорожувальних поверхонь. Мікроклімат внутрішньосуднових приміщень суттєво впливає на самопочуття людей, що постійно знаходяться в них, тому існує необхідність у підтримці комфортних умов в таких приміщеннях. Це забезпечується за допомогою судової системи комфортного кондиціонування повітря (ССККП). Ці системи здатні підтримувати комфортні значення температури, вологості і рухливості повітря і забезпечують необхідний повітрообмін. Усі ССККП мають установки для приготування тепло і холодної, та для тепло вологої обробки повітря і його подачі в приміщення (елементи центрального кондиціонера), повітроводи; розподільників повітря; системи контролю та управління.

Тепло вологий стан каютного повітря визначається не тільки тепло і волого виділеннями людей, а й теплопритоками (тепловтратами) через огороження приміщень, залежними від зовнішніх кліматичних умов. На тепловідчуття людини впливають температура і відносна вологість повітря, швидкість його руху і температура огорожувальних поверхонь. Чи не будь-яке поєднання цих параметрів забезпечує комфортні умови, кожен параметр може змінюватися тільки в обмежених межах. Так, відносна вологість повинна бути  $50 \pm 10\%$ , швидкість повітря -  $0,15 \text{ м / с}$  (допускається до  $0,5 \text{ м / с}$ ), різниця температур повітря в приміщенні і огорожувальних поверхонь не повинна перевищувати  $\pm 4 \text{ }^\circ\text{C}$ . Зазвичай різниця температур каютного і припливного повітря дорівнює  $5 \dots 10 \text{ }^\circ\text{C}$ . При спрямованих потоках повітря його температура в зоні проживання повинна бути не нижче  $22 \text{ }^\circ\text{C}$  і відрізнятися від середньої температури в приміщенні не більше ніж на  $5 \text{ }^\circ\text{C}$ . При високій температурі зовнішнього повітря ( $34 \dots 40 \text{ }^\circ\text{C}$ ) слід підтримувати в приміщенні температуру не нижче  $27 \text{ }^\circ\text{C}$ . При фізичній роботі і в період сну рекомендується знизити температуру на  $2 \dots 3 \text{ }^\circ\text{C}$ , наближаючи її до нижньої межі зони комфорту ( $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ). Слід зазначити, що згідно з санітарними правилами, значення результуючих температур приміщень судів необмеженого району плавання лежить у межах від  $18,1^\circ\text{C}$  – для холодного періоду, до  $24,2^\circ\text{C}$  – для теплого періоду. Значення норм мікроклімату для суднових приміщень доведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Значення норм мікроклімату для суднових приміщень

Район плавання	Период года	Результирующая температура, °С		
		Нижняя граница	Рекомендуемая расчетная	Верхняя граница
Тропики	—	22,6	24,2	25,7
Субтропики	Теплый	20,8	22,0	23,2
	Холодный	17,7	19,2	20,7
Умеренные широты	Теплый	17,7	19,8	22,0
	Холодный	15,9	18,1	20,3
Северные (приполярные)	Теплый	18,3	20,0	21,6
	Холодный	17,6	19,0	20,4
Неограниченный	Теплый	22,6	24,2	25,7
	Холодный	15,9	18,1	20,3

Різноманітний кліматичний режим Світового океану і стан водної поверхні грають дуже істотну роль у формуванні мікроклімату внутрішньосуднових приміщень.

Мікроклімат таких приміщень залежить від температури і вологості зовнішнього повітря, на величинах яких відбивається вплив ступеня нагрівання бортів і палуби судна, яка визначається значною мірою припливом прямої сонячної радіації. Ця залежність виражається головним чином, через вентилявання суднових приміщень зовнішнім повітрям, обробленим ССККП. Вологість повітря дуже помітно позначається на роботі різних вентиляційних пристроїв. У тих вентиляційних відділеннях, де є повітроохолоджувачі використовують воду зі зниженою температурою ( $8 \div 12^\circ\text{C}$ ), може статися і відбувається конденсація вологи на поверхнях теплообмінних апаратів, а в разі недостатньої теплової ізоляції - і на підвідних магістралях системи охолодження. Утворена в результаті цього вода накопичується на поверхнях і розтрубах вентиляції, якщо дренажна система не забезпечує повноцінного стоку.

Облік таких кліматичних характеристик, як мінімальні і максимальні температури і вологість повітря, від яких залежить ентальпія, є необхідним для роботи систем кондиціонування повітря на морських судах.

Кліматичні умови тропічних широт створюють певний мікроскопічний режим і в інших внутрішніх приміщеннях судна. Наприклад, від нагрівання бортів і палуб судна сонячними променями в денні години, а також в наслідок спільного впливу високої температури і від-відносної вологи повітря у внутрішніх приміщеннях судна виникає задуха, яка без кондиціонування повітря важко переноситься людьми. У нічні години, якщо відсутній кондиціонер в наслідок великого вмісту вологи повітря в каютах з'являється вогкість. Вона особливо помітна на постільній білизні, на обмундированні та інших предметах з тканин, і якщо їх вдень не виносить на палубу, вони покриваються пліснявою.



Небажаною є і велика сухість повітря в суднових приміщеннях у зв'язку з широким використанням синтетичних матеріалів для обробки останніх на сучасних судах. При малому значенні відносної вологості повітря (22 ÷ 24%) виникають поля статичної електрики великої напруженості, які негативно діють на самопочуття і здоров'я екіпажу та пасажирів. Таким чином, гідрометеорологічні умови, викликаючи різні фізіологічні відхилення від норми у пасажирів і екіпажу, можуть створити у перших незадоволення морською подорожжю, а другим ускладнити виконання службових обов'язків по управлінню судном.

Успішна експлуатація сучасних ССККП можлива тільки при використанні систем ав-томатизації. Автоматичні пристрої значно спрощують роботу персоналу, обслуговуючого ССККП - точно підтримують заданий температурно-вологовий режим, скорочують експлуатаційні витрати, збільшують термін роботи холодильних компресорів, забезпечують захист ССККП і холодильної установки від аварій.

Такі автоматичні пристрої виконують функції - сигналізації, контролю, захисту, регулювання і управління.

При повній автоматизації всі функції управління і контролю передаються автоматичним системам без безпосередньої участі людини. Пристрої автоматики контролюють режим роботи холодильної установки (показують і записують), автоматичним регулюванням підтримують задані параметри. За допомогою звукових і світлових сигналів сигналізують про включення окремих пристроїв, а також попереджають про небезпечний відхилення параметрів.

Таким чином, метою даної роботи є визначення можливостей оптимізації та збільшення енергоефективності експлуатації ССККП за допомогою оптимального управління програмованих логічних контролерів, в умовах, де постійно змінюються гідрометеорологічні умови.

## 2. Аналіз проблеми та постановка завдання

Добре відомо, що в даний час на судах морського флоту найбільше використовується система Unisab III.



Рис. 1 – Зовнішній вигляд сучасної системи керування ССККП Unisab III

Unisab III – це комп'ютерна система управління та поточного контролю, яка допускає декілька способів регулювання продуктивності компресора по тискам і температурі. При цьому, регулювання продуктивності може здійснюватися як вручну, так і автоматично. Слід так само відзначити, що навіть в автоматичному режимі роботи, завдання значення температури вихідної охолоджуючої води проводиться обслуговуючим персоналом, в залежності від оцінки впливу зовнішніх гідрометеорологічних умов, сумарних теплоприпливів, що потрапляють в судно із зовні, а також внутрішніх тепло і волого надходжень. При цьому значення температури покидаючої чиллер охолоджуючої води, згідно суднової технічної специфікації, знаходиться в межах 6 ÷ 12 °С. Відповідно більш низькі значення, що встановлюються оператором відповідають більш високим показникам температури і відносній вологості навколишнього середовища, і навпаки, при більш низьких значеннях встановлюється більш високе значення температури холодоносія.

Схема сучасного методу управління ССККП наведена на рисунку 2.



Рис. 2 – Схема сучасного методу управління ССККП

Як видно зі схеми, на даний час прийняття рішень з управління, і як слідство відповідальність за енергоефективну та екологічну складову процесу з експлуатації ССККП повністю лежить на людині – операторі.



При цьому, людині не завжди вдається об'єктивно оцінити усі обставини постійно змінних зовнішніх та внутрішніх умов, та прийняти вірне рішення що до енергоефективного керування. Слід зазначити, що під енергетичною ефективністю розуміють раціональне використання (витрачання) енергетичних ресурсів.

Таким чином безпосередній практичний інтерес представляє питання автоматичного управління завданням значень температури холодоносія, без участі в цьому процесі людини. Це допоможе виключити можливі помилки, так званий людський фактор, а так само підвищити надійність та енергоефективність експлуатації систем СККВ. Передбачається також передача даних термодинамічних параметрів у реальному режимі часу за допомогою бездротових протоколів на будь-який Android або Ios пристрій оператора. Внаслідок чого, механік, який обслуговує систему, може здійснювати повноцінний контроль за роботою системи, незалежно від свого місцезнаходження. Система зв'язку так само робить можливим під'єднання Unisab III до програмованого контролера або персонального комп'ютера системи центра-лізованого контролю, управління і реєстрації даних.

Тому у даній роботі пропонується можливість застосування програмованих логічних контролерів як допоміжних модулів управління ССККП.

Для реалізації системи моніторингу в "жорсткому" реальному часі обраний ПЛК серії Inline ILC 130 ETH німецької фірми Phoenix Contact, який виконаний відповідно до загально-прийнятих стандартів програмування MEK 61131-3 і технології передачі даних Ethernet, підтримує паралельний обмін даними з OPC -Серверами і комунікацію з кінцевими пристроями, що підтримують протокол TCP / IP.

Контролери Unisab III конфігуруються на заводі-виробнику. Вони оснащені комунікаційним обладнанням і протоколами зв'язку для моніторингу та управління широким асортиментом компресорів, холодильних машин і теплових насосів. Також з їх допомогою здійснюється діагностика обладнання та обробка даних (Рис. 3).

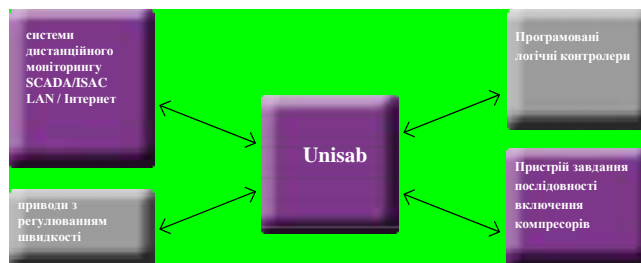


Рис. 3 – Підключення контролера Unisab III до зовнішнього контрольно-вимірювального обладнання



Рис. 4 – Зовнішній вигляд ПЛК «Phoenix»

Основні характеристики ПЛК ILC 130 ETH:

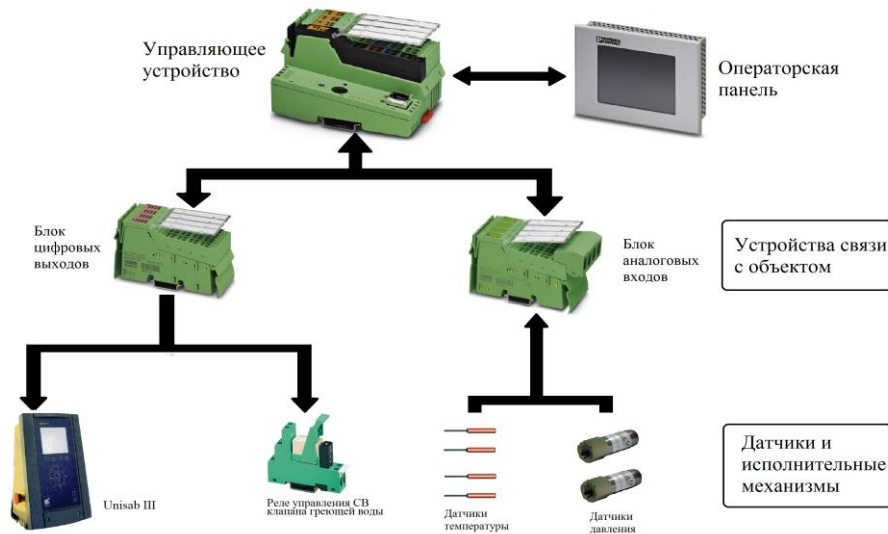
- швидкість обробки 90 мкс на 1000 інструкцій для логічного типу даних і 1,7 мс на 1000 інструкцій для змішаного типу даних;
- один INTERBUS інтерфейс і один Ethernet інтерфейс;
- 192 Кбайт пам'яті програм і 192 Кбайт пам'яті даних, 8 Кбайт незалежної пам'яті даних;
- 8 прямих входів і 4 прямих виходу;
- максимум 2048 точки введення / виведення;
- харчування 24 В;
- вбудований web / FTP server;
- підтримка OPC.

ILC 130 ETH має ступінь захисту IP20 і здатний функціонувати при наступних умовах навколишнього середовища:

- температура навколишнього повітря -25 ° C - 55 ° C;



- допустима відносна вологість повітря 10% - 95%;
- тиск повітря 70 кПа - 106 кПа (До 3000 м над рівнем моря);
- вібрація 5 g.



**Рис. 5 – Функціональна схема запропонованого методу системи управління за рахунок використання ПЛ-контролерів**

Запропонований метод оптимізації експлуатації ССКВ за допомогою використання ПЛК, представлений у вигляді схеми на рисунку 4, полягає в наступному.

Для зв'язку між ПЛК та UNISAB III використовується протокол Danbus. Цей протокол зарезервован для розподілу навантаження (послідовності включення) в установках до 14 Unisab II та Unisab III.

Інтерфейс Danbus можна використовувати для зв'язку з системами моніторингу на базі ПК через перетворювач RS2LAN. Перетворювач RS2LAN розроблений для комунікації з OPC, тобто підтримка OPC в системі моніторингу на базі ПК є обов'язковою умовою.

Danbus заснований на RS485, який є електричним стандартом для послідовного зв'язку. RS485 використовує 2-провідний кабель і повинен бути приєднаний відповідно до специфікацій інструкції Unisab (кабель від Unisab до Unisab тощо). Перетворювач не потрібен, якщо Danbus використовується тільки для послідовності контролерів Unisab.

Сигнали, що надходять у контролер від датчиків температур і вологостей зовнішніх і внутрішніх гідрометеорологічних параметрів навколишнього середовища, а також значень параметрів продуктивності і споживаної потужності компресора, обробляються в контролері за допомогою відповідного алгоритму і програми тепловолого розрахунку необхідної холодопотребности та дійсної холодопродуктивності. Чисельне значення холодопотребности порівнюється зі значенням його дійсної холодопродуктивності для того, щоб зробити обґрунтований висновок про технічний стан холодильної установки і далі, при наявності підстав, перейти до технічної діагностики компонентів всієї холодильної системи. І як наслідок отримати дійсний холодильний коефіцієнт, що слугує показником енергетичної ефективності СХУ ССКВ.

З точки зору управління і діагностики цей підхід дозволить мати достовірні оперативні дані що до холодопродуктивності, споживання електричної енергії, а також по питомій витраті енергії на вироблення холоду, крім того, користувач отримає динаміку зміни цих величин за обраний період часу.

На підставі, отриманих від датчиків, зовнішніх і внутрішніх параметрів навколишнього середовища і відповідних функціональних залежностей, алгоритма і програми обробки даних ПЛК формує і за допомогою відповідного протоколу передачі даних, передає керуючий сигнал оптимального значення температури хладоносія системі Unisab III для подальшої її реалізації в СХУ ССКВ, яка задає параметри управління значенням продуктивності компресора.

Таким чином метою даної роботи є отримання графіків функцій та відповідних функціональних залежностей, що пов'язують воедино умови впливу зовнішніх ГМУ, параметрів температури і вологості внутрішньосуднових приміщень, вплив зовнішніх і внутрішніх теплопритоків з температурою холодоносія.

$$T_{охл.в} = f(t_{ос}, \varphi_{ос}, t_{ном}, N_{ном})$$

$$T_{ном} = f(t_{охл.в})$$

Для досягнення поставленої мети використовується методика проведення повного факторного експерименту. Експериментальні дослідження проводилися на борту пасажирського теплохода «BERLIN», загальною сумарною холодопродуктивністю ССКВ 1 650 000 Ккал / год., В період з 08.01.19 по 26.03.19., в умовах плавання судна в різних районах Світового океану з часто змінюючимися зовнішніми гідрометеорологічними умовами.



### 3. Проведення повного факторного експерименту

Для визначення впливу зовнішніх гідрометеорологічних умов на енергетичну ефективність експлуатації ССККВ необхідно досліджувати вплив таких чинників, як температура навколишнього середовища -Тн.с, температура забортної води – Т з.в , температура охолоджуючої води (холодоносця) – Т о.в., та отримати Y (Рис. 6).

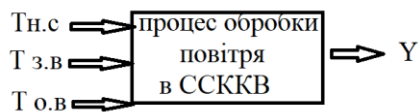


Рис. 6 – Функціональна схема отримання критерія оптимізації

Інтервали варіювання фактора визначаються на основі попередніх експериментів. Ефективність обробки Y – це критерій оптимізації. Так як в умовах судна діяли два паралельно працюючих СХУ ССККВ, то факторний експеримент, за цим прикладом, проводився тричі: для першого і другого ССККВ, що працюють паралельно і для другого ССККВ, що працює самостійно. Фактори записують на верхньому і нижньому рівнях у вигляді таблиці.

Таблиця 2 – Інтервали варіювання фактора для першого ССККВ

Фактори	Min(-1)	Max(+1)
X1(тнс)	26.2	34.9
X2(тзв)	23	26
X3(тов)	12.1	14

При відомому значенні числа фактора можна знайти число дослідів для реалізації всіх можливих поєднань рівнів і факторів за формулою:

$$N = 2^n = 2^3 = 8,$$

де N – кількість експериментів; n – кількість факторів.

План експерименту задамо у вигляді таблиці. Для експеримента такого типу таблиця має вигляд:

Таблиця 3 – План експерименту

#(1)	x0	x1	x2	x3	x1x2	x2x3	x1x3	x1x2x3	Y1	Y2	Ymed
1	1	1	1	1	1	1	1	1	16.3	16	16.15
2	1	-1	1	1	1	-1	1	-1	17.1	17.4	17.25
3	1	1	-1	1	1	-1	-1	1	17.5	17.8	17.65
4	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1	17.5	17.8	17.65
5	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1	17.3	17	17.15
6	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	17.3	17.5	17.4
7	1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1	15.3	15.8	15.55
8	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1	18.3	19	18.65
											137.45

Запишемо для повного факторного експеримента рівняння регресії, яке описує процес обробки повітря:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

#### Визначення коефіцієнтів рівняння регресії

Визначимо вільний член за формулою:

$$b_0 = \sum Y_{cp} / N,$$

$$b_0 = 137.45 / 8.$$

Визначимо коефіцієнти взаємодії за формулою:

$$b_1 = \sum x_i \cdot Y_{icp} / N$$

Рівняння регресії після розрахунку має вигляд:

$$Y = 17.18125 - 0.55625x_1 - 0.19375x_2 - 0.00625x_3 + 0.21875x_1x_2 - 0.28125x_2x_3 + 0.28125x_1x_3 - 0.49375x_1x_2x_3$$

#### Перевірка відтворюваності процесу і значущості коефіцієнтів регресії

Для перевірки відтворюваності процесу і проведення статичних оцінок передбачаються паралельні досліди. Якщо кожен досвід повторюється однакове число раз, то таке повторення називають паралельним дублюванням. При однаковому числі паралельних дослідів на кожному поєднанні рівнів і факторів розраховуються построківі дисперсії і перевіряється їх однорідність за критерієм Кохрена.

Однорідність перевіряється шляхом вибору максимального значення з рядкової дисперсії і визначення для нього розрахункового критерію Кохрена.

Построкові дисперсії розраховуємо за формулою:



$$S^2_{y_i} = (\sum(Y_{1_{\text{экс}}} - Y_{\text{ср.экс}})^2 + (Y_{2_{\text{экс}}} - Y_{\text{ср.экс}})^2) / (H-1),$$

де  $H = 2$  – кількість паралельних дослідів.

$$\begin{aligned} S^2_{y_1} &= (16.3 - 16.15)^2 + (16 - 16.15)^2 / (2-1) = 0.045 \\ S^2_{y_2} &= (17.1 - 17.25)^2 + (17.4 - 17.25)^2 / (2-1) = 0.045 \\ S^2_{y_3} &= (17.5 - 17.65)^2 + (17.8 - 17.65)^2 / (2-1) = 0.045 \\ S^2_{y_4} &= (17.5 - 17.65)^2 + (17.8 - 17.65)^2 / (2-1) = 0.045 \\ S^2_{y_5} &= (17.3 - 17.15)^2 + (17 - 17.15)^2 / (2-1) = 0.045 \\ S^2_{y_6} &= (17.3 - 17.4)^2 + (17.5 - 17.4)^2 / (2-1) = 0.02 \\ S^2_{y_7} &= (15.3 - 15.55)^2 + (15.8 - 15.55)^2 / (2-1) = 0.125 \\ S^2_{y_8} &= (8.3 - 18.65)^2 + (19 - 18.65)^2 / (2-1) = 0.245 \\ \sum S^2_{y_i} &= 0.615 \end{aligned}$$

Мах значення  $S^2_{y_8} = 0.245$

Визначивши максимальне значення порядкової дисперсії обчислюємо для неї розрахунковий критерій Кохрена:

$$\begin{aligned} G_p &= S^2_{y_{\text{max}}} / \sum S^2_{y_i} \\ G_p &= 0.245 / 0.615 = 0.4 \end{aligned}$$

Висновок про однорідність робимо на основі порівняння отриманого розрахункового критерію Кохрена з табличним значенням.

Визначимо дисперсію експерименту:

$$\begin{aligned} S^2_{y_{\text{ср}}} &= \sum S^2_{y_i} / N \\ S^2_{y_{\text{ср}}} &= 0.615 / 8 = 0.077 \end{aligned}$$

#### Визначення дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Деякі з обчислень за експериментальними даними коефіцієнтів рівняння регресії по абсолютній величині можуть виявитися дуже малими в порівнянні з іншими, тобто одні з коефіцієнтів будуть значимі, а інші – ні.

Для перевірки гіпотези щодо статичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії розрахуємо дисперсію коефіцієнтів за формулою:

$$\begin{aligned} S^2_{b_i} &= \sum S^2_{y_{\text{ср}}} / N \cdot M, \\ S^2_{b_i} &= 0.077 / 8 \cdot 2 = 0.0048, \end{aligned}$$

де  $M = 2$  - кількість паралельних серій.

Для оцінки значущості коефіцієнтів з довірчого інтервалу обчислюємо для кожного коефіцієнта за формулою:

$$\begin{aligned} \Delta b_i &= \pm t \cdot \sqrt{S^2_{b_i}}, \\ \Delta b_i &= \pm 2.31 \cdot \sqrt{0.0048} = \pm 0.16, \end{aligned}$$

де  $t = 2.31$  - критерій Стюдента.

Довірчий інтервал  $\Delta b_i$  однаковий для всіх коефіцієнтів, тому для визначення їх значимості можна застосувати правило - коефіцієнт значущий, якщо його абсолютна величина більше довірчого інтервалу.

Незначні коефіцієнти виключаємо з рівняння.

$$\Delta b_i < |\Delta b_{ij}|$$

Остаточно рівняння регресії має вигляд:

$$\begin{aligned} Y &= 17.18125 - 0.55625x_1 - 0.19375x_2 + 0.21875x_1x_2 - 0.28125x_2x_3 + 0.28125x_1x_3 - 0.49375x_1x_2x_3 \\ Y &= 16.625 - 0.025x_2 + 0.28125x_3 - 0.775x_2x_3 \end{aligned}$$

#### Обчислення розрахункових параметрів оптимізації

Шляхом підстановки відповідних знаків в отримане рівняння регресії повернемося до матриці і перерахуємо рівняння у значущих коефіцієнтах.

Таблиця 4 – Значення коефіцієнтів

$Y_{\text{ср}}$	$Y$	$\Delta Y = Y_{\text{ср}} - Y$	$\Delta Y^2$
16.15	16.13	0.02	0.00035
17.25	16.13	1.12	1.2516
17.65	17.68	-0.03	0.00098
17.65	17.68	-0.03	0.00098
17.15	17.12	0.03	0.0010
17.4	17.12	0.28	0.0791
15.55	15.57	-0.02	0.00035
18.65	15.57	3.08	9.4941
$\sum = 137.45$			$\sum = 10.828$

Побудуємо поверхню відгуку:



x2 \ x3	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
1	17.1438	17.0450	16.9463	16.8475	16.7488	16.6500	16.5513	16.4525	16.3538	16.2550	16.1563
0.8	16.9838	16.9160	16.8483	16.7805	16.7128	16.6450	16.5773	16.5095	16.4418	16.3740	16.3063
0.6	16.8238	16.7870	16.7503	16.7135	16.6768	16.6400	16.6033	16.5665	16.5298	16.4930	16.4563
0.4	16.6638	16.6580	16.6523	16.6465	16.6408	16.6350	16.6293	16.6235	16.6178	16.6120	16.6063
0.2	16.5038	16.5290	16.5543	16.5795	16.6048	16.6300	16.6553	16.6805	16.7058	16.7310	16.7563
0	16.3438	16.4000	16.4563	16.5125	16.5688	16.6250	16.6813	16.7375	16.7938	16.8500	16.9063
-0.2	16.1838	16.2710	16.3583	16.4455	16.5328	16.6200	16.7073	16.7945	16.8818	16.9690	17.0563
-0.4	16.0238	16.1420	16.2603	16.3785	16.4968	16.6150	16.7333	16.8515	16.9698	17.0880	17.2063
-0.6	15.8638	16.0130	16.1623	16.3115	16.4608	16.6100	16.7593	16.9085	17.0578	17.2070	17.3563
-0.8	15.7038	15.8840	16.0643	16.2445	16.4248	16.6050	16.7853	16.9655	17.1458	17.3260	17.5063
-1	15.5438	15.7550	15.9663	16.1775	16.3888	16.6000	16.8113	17.0225	17.2338	17.4450	17.6563

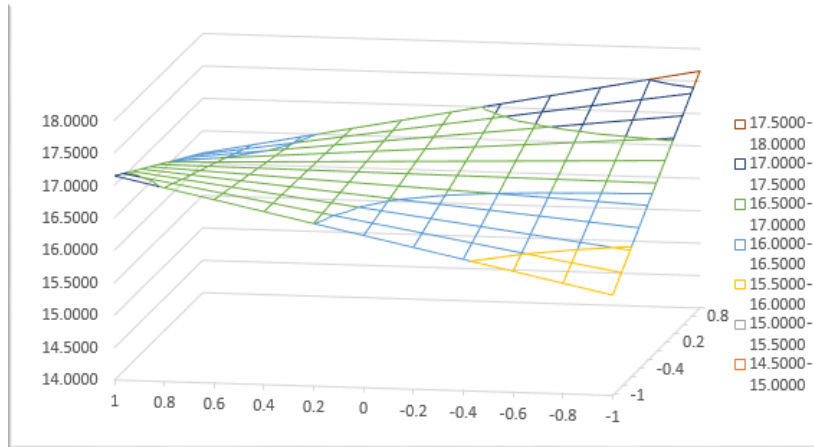


Рис. 7 – Побудова поверхні відгуку

Таблиця 5 – Інтервали варіювання фактора для другого ССКВ

Фактори	Min(-1)	Max(+1)
X1(тоc)	25.9	34.6
X2(тзв)	22.7	25.7
X3(тов)	11.8	13.7

Число дослідів для реалізації всіх можливих поєднань рівнів і факторів обчислюється за формулою:

$$N = 2^n = 2^3 = 8,$$

де N – кількість експериментів; n – кількість факторів.

План експерименту наведено у таблиці 6:

Таблиця 6 – План експерименту

#(2)	x0	x1	x2	x3	x1x2	x2x3	x1x3	x1x2x3	Y1	Y2	Ymed
1	1	1	1	1	1	1	1	1	62	62.3	62.15
2	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	60	59.7	59.85
3	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	60	59.7	59.85
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	60	59.7	59.85
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	68	68.3	68.15
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	68	67.8	67.9
7	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	62	61.5	61.75
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	72	71.3	71.65
											511.15

Рівняння регресії, що описує процес обробки повітря, має вигляд:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

**Визначення коефіцієнтів рівняння регресії**

Визначимо вільний член за формулою:

$$b_0 = \sum Y_{cp} / N,$$

$$b_0 = 511.15 / 8.$$



Визначимо коефіцієнти взаємодії за формулою:

$$b_1 = \sum x_i \cdot Y_{icp} / N$$

Рівняння регресії після розрахунку має вигляд:

$$Y = 63.89375 - 0.91875x_1 + 0.61875x_2 - 3.46875x_3 + 1.55625x_1x_2 - 0.04375x_2x_3 + 1.49375x_1x_3 - 0.98125x_1x_2x_3$$

### Перевірка відтворюваності процесу і значущості коефіцієнтів регресії

Для перевірки відтворюваності про-процесу і проведення статичних оцінок перед-розглядаються паралельні досліди. Якщо кожен досвід повторюється однаковий-ше число раз, то таке повторення називають паралельним дублюванням. При однаковому числі паралельних дослідів на кожному поєднанні рівнів і факто-рів розраховуються построккові дисперсії і перевіряється їх однорідність за критерієм Кохрена. Однорідність перевіряється шляхом вибору максимального значення з рядкової дис-персів і визначення для нього розрахункового кри-терия Кохрена.

Построкові дисперсії розраховуємо за формулою:

$$S_{y_i}^2 = (\sum (Y_{1_{екс}} - Y_{cp.екс})^2 + (\sum (Y_{2_{екс}} - Y_{cp.екс})^2) / (H-1),$$

де  $H=2$  – кількість паралельних дослідів.

$$S_{y_1}^2 = (62 - 62.15)^2 + (62.3 - 62.15)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S_{y_2}^2 = (60 - 59.8)^2 + (59.7 - 59.85)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S_{y_3}^2 = (60 - 59.8)^2 + (59.7 - 59.8)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S_{y_4}^2 = (60 - 59.8)^2 + (59.7 - 59.8)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S_{y_5}^2 = (68 - 68.15)^2 + (68.3 - 68.15)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S_{y_6}^2 = (68 - 67.9)^2 + (67.8 - 67.9)^2 / (2-1) = 0.02$$

$$S_{y_7}^2 = (62 - 61.75)^2 + (61.5 - 61.75)^2 / (2-1) = 0.125$$

$$S_{y_8}^2 = (72 - 71.65)^2 + (71.3 - 71.65)^2 / (2-1) = 0.245$$

$$\sum S_{y_i}^2 = 0.615$$

Мах значення  $S_{y_8}^2 = 0.245$

Визначивши максимальне значення рядкової дисперсії обчислюємо для неї розрахунковий критерій Кохрена:

$$G_p = S_{y_{max}}^2 / \sum S_{y_i}^2$$

$$G_p = 0.245 / 0.615 = 0.4$$

Висновок про однорідність робимо на основі порівняння отриманого розрахункового критерію Кохрена з табличним значенням.

Визначимо дисперсію експерименту:

$$S_{y_{cp}}^2 = \sum S_{y_i}^2 / N$$

$$S_{y_{cp}}^2 = 0.615 / 8 = 0.077$$

### Визначення дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Для перевірки гіпотези щодо статичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії розрахуємо дисперсію коефіцієнтів по формулі:

$$S_{b_i}^2 = \sum S_{y_{cp}}^2 / N \cdot M,$$

$$S_{b_i}^2 = 0.077 / 8 \cdot 2 = 0.0048,$$

де  $M = 2$  – кількість паралельних серій.

Для оцінки значущості коефіцієнтів з довірчого інтервалу обчислюємо для кожного коефіцієнта за формулою:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot \sqrt{S_{b_i}^2}$$

$$\Delta b_i = \pm 2.31 \cdot \sqrt{0.0048} = \pm 0.16$$

де  $t = 2.31$  – критерій Стьюдента.

Довірчий інтервал  $\Delta b_i$  однаковий для всіх коефіцієнтів, тому для визначення їх значущості можна застосувати правило: коефіцієнт значущий, якщо його абсолютна величина більше довірчого інтервалу. Незначні коефіцієнти виключаємо із рівняння.

$$\Delta b_i < |\Delta b_{ij}|$$

Остаточно рівняння регресії має вигляд:

$$Y = 63.89375 - 0.91875x_1 - 0.61875x_2 - 3.46875x_3 + 1.55625x_1x_2 + 1.49375x_1x_3 - 0.98125x_1x_2x_3$$

$$Y = 62.975 + 2.175x_2 - 1.975x_3 - 0.98125x_2x_3$$

### Обчислення розрахункових параметрів оптимізації

Шляхом підстановки відповідних знаків в отримане рівняння регресії повернемося до матриці і перерахуємо рівняння у значущих коефіцієнтів.

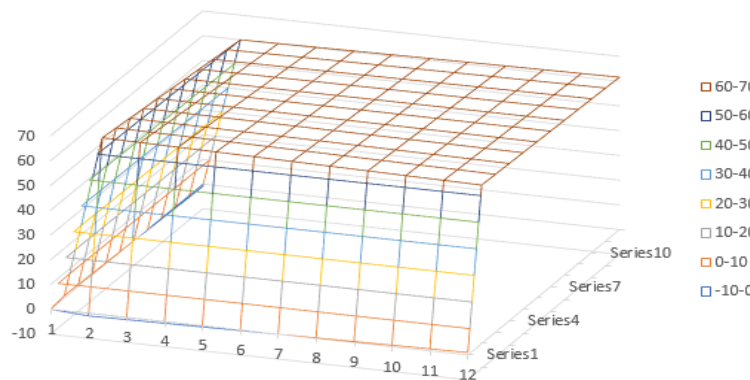


**Таблиця 7 – Значення коефіцієнтів**

$Y_{cp}$	$Y$	$\Delta Y = Y_{cp} - Y$	$\Delta Y^2$
62.15	62.19	-0.04	0.002
59.85	62.19	-2.34	5.49
59.85	59.81	0.04	0.002
59.85	59.81	0.04	0.002
68.15	68.11	0.04	0.002
67.9	68.11	-0.21	0.04
61.75	61.79	-0.04	0.002
71.65	61.79	9.86	97.15
$\Sigma=511.15$		$\Sigma=102.69$	

Побудуємо поверхню відгуку:

$x_3 \backslash x_2$	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
1	66.32875	66.093	65.85725	65.6215	65.38575	65.15	64.91425	64.6785	64.44275	64.207	63.97125
0.8	65.6975	65.501	65.3045	65.108	64.9115	64.715	64.5185	64.322	64.1255	63.929	63.7325
0.6	65.06625	64.909	64.75175	64.5945	64.43725	64.28	64.12275	63.9655	63.80825	63.651	63.49375
0.4	64.435	64.317	64.199	64.081	63.963	63.845	63.727	63.609	63.491	63.373	63.255
0.2	63.80375	63.725	63.64625	63.5675	63.48875	63.41	63.33125	63.2525	63.17375	63.095	63.01625
0	63.1725	63.133	63.0935	63.054	63.0145	62.975	62.9355	62.896	62.8565	62.817	62.7775
-0.2	62.54125	62.541	62.54075	62.5405	62.54025	62.54	62.53975	62.5395	62.53925	62.539	62.53875
-0.4	61.91	61.949	61.988	62.027	62.066	62.105	62.144	62.183	62.222	62.261	62.3
-0.6	61.27875	61.357	61.43525	61.5135	61.59175	61.67	61.74825	61.8265	61.90475	61.983	62.06125
-0.8	60.6475	60.765	60.8825	61	61.1175	61.235	61.3525	61.47	61.5875	61.705	61.8225
-1	60.01625	60.173	60.32975	60.4865	60.64325	60.8	60.95675	61.1135	61.27025	61.427	61.58375



**Рис. 8 – Побудова поверхні відгуку**

**Таблиця 8 – Інтервали варіювання фактора для другого ССККВ, що працює самостійно**

Фактори	Min(-1)	Max(+1)
X1(тоє)	19.2	23.3
X2(тзв)	14	21
X3(тов)	10.2	12.1

План експерименту наведено у таблиці 9:

**Таблиця 9 – План експерименту**

	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_1x_2$	$x_2x_3$	$x_1x_3$	$x_1x_2x_3$	$Y_1$	$Y_2$	$Y_{med}$
1	1	1	1	1	1	1	1	1	50	50.3	50.15
2	1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	48	47.7	47.85
3	1	1	-1	1	-1	-1	1	-1	48	47.7	47.85
4	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	33	32.7	32.85
5	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	33	33.3	33.15
6	1	-1	1	-1	-1	-1	1	1	19	18.8	18.9
7	1	1	-1	-1	-1	1	-1	1	25	24.5	24.75
8	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	15	14.3	14.65
											270.15



Запишемо для повного фактичного експерименту рівняння регресії, яке описує процес обробки повітря:

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{12}x_1x_2 + b_{23}x_2x_3 + b_{13}x_1x_3 + b_{123}x_1x_2x_3$$

### Визначення коефіцієнтів рівняння регресії

Визначимо вільний член за формулою:

$$b_0 = \sum Y_{cp} / N,$$

$$b_0 = 270.15/8.$$

Визначимо коефіцієнти взаємодії за формулою:

$$b_1 = \sum x_i \cdot Y_{icp} / N$$

Рівняння регресії після розрахунку має вигляд:

$$Y = 33.76875 + 5.20625x_1 + 3.74375x_2 + 10.90625x_3 - 1.06875x_1x_2 + 0.58125x_2x_3 - 0.88125x_1x_3 - 2.10625x_1x_2x_3$$

### Перевірка відтворюваності процесу і значущості коефіцієнтів регресії

Для перевірки відтворюваності процесу і проведення статичних оцінок розглядаються паралельні досліди. Якщо кожен досвід повторюється однакове число разів, то таке повторення називають паралельним дублюванням.

При однаковому числі паралельних дослідів на кожному поєднанні рівнів і факторів розраховуються построківі дисперсії і перевіряється їх однорідність за критерієм Кохрена. Однорідність перевіряється шляхом вибору максимального значення з рядкової дисперсії і визначення для нього розрахункового критерію Кохрена.

Построкові дисперсії розраховуємо за формулою:

$$S^2_{yi} = (\sum (Y_{1\text{экс}} - Y_{cp.\text{экс}})^2 + (\sum (Y_{2\text{экс}} - Y_{cp.\text{экс}})^2)) / (H-1)$$

де  $H=2$  – кількість паралельних дослідів.

$$S^2_{y1} = (50 - 50.15)^2 + (50.3 - 50.15)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S^2_{y2} = (48 - 47.85)^2 + (47.7 - 47.85)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S^2_{y3} = (48 - 47.85)^2 + (47.7 - 47.85)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S^2_{y4} = (33 - 32.85)^2 + (32.7 - 32.85)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S^2_{y5} = (33 - 33.15)^2 + (33.3 - 33.15)^2 / (2-1) = 0.045$$

$$S^2_{y6} = (19 - 18.9)^2 + (18.8 - 18.9)^2 / (2-1) = 0.02$$

$$S^2_{y7} = (25 - 24.75)^2 + (24.5 - 24.75)^2 / (2-1) = 0.125$$

$$S^2_{y8} = (15 - 14.65)^2 + (14.3 - 14.65)^2 / (2-1) = 0.245$$

$$\sum S^2_y = 0.615$$

Мах значення  $S^2_{y8} = 0.245$

Визначивши максимальне значення рядкової дисперсії обчислюємо для нього розрахунковий критерій Кохрена:

$$G_p = S^2_{y \max} / \sum S^2_i$$

$$G_p = 0.245 / 0.615 = 0.4$$

Висновок про однорідність робимо на основі порівняння отриманого розрахункового критерію Кохрена з табличним значенням.

Визначимо дисперсію експерименту:

$$S^2_{y \text{ cp}} = \sum S^2_i / N$$

$$S^2_{y \text{ cp}} = 0.615 / 8 = 0.077$$

### Визначення дисперсії коефіцієнтів рівняння регресії

Для перевірки гіпотези щодо статичної значущості коефіцієнтів рівняння регресії розрахуємо дисперсію коефіцієнтів:

$$S^2_{bi} = \sum S^2_{y \text{ cp}} / N \cdot M$$

$$S^2_{bi} = 0.077 / 8 \cdot 2 = 0.0048$$

де  $M = 2$  – кількість паралельних серій.

Для оцінки значущості коефіцієнтів з довірчого інтервалу обчислюємо для кожного коефіцієнта за формулою:

$$\Delta b_i = \pm t \cdot \sqrt{S^2_{bi}}$$

$$\Delta b_i = \pm 2.31 \cdot \sqrt{0.0048} = \pm 0.16$$

де  $t = 2.31$  – критерій Стюдента.

Незначні коефіцієнти виключаємо із рівняння.

Остаточне рівняння регресії має вигляд:

$$Y = 38.975 + 3.74375x_2 + 10.90625x_3 - 1.06875x_2 + 0.58125x_2x_3 - 0.88125x_3 - 2.10625x_1x_2x_3$$

$$Y = 38.975 + 2.675x_2 + 10.025x_3 - 1.525x_2x_3$$

**Обчислення розрахункових параметрів оптимізації**

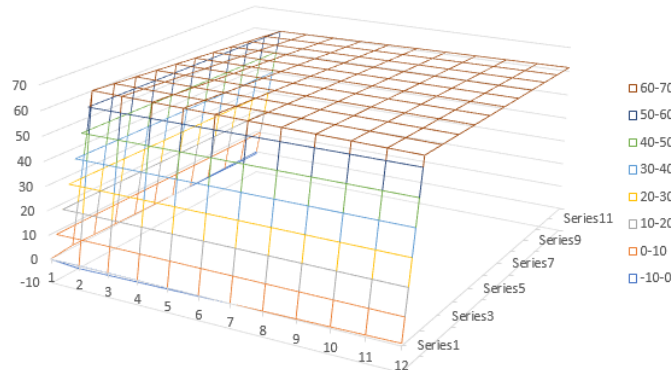
Шляхом підстановки відповідних знаків в отримане рівняння регресії повернемося до матриці і перерахуємо рівняння у значимих коефіцієнтів.

**Таблиця 10 – Значення коефіцієнтів**

$Y_{cp}$	$Y$	$\Delta Y = Y_{cp} - Y$	$\Delta Y^2$
50.15	50.15	0	0
47.85	50.15	-2.3	5.29
47.85	47.85	0	0
32.85	47.85	-15	225
33.15	33.15	0	0
18.9	33.15	-14.25	203.0625
24.75	24.75	0	0
14.65	24.75	-10.1	102.01
$\Sigma=270.15$		$\Sigma=535.3625$	

Побудуємо поверхню відгуку

$x_2 \backslash x_3$	-1	-0.8	-0.6	-0.4	-0.2	0	0.2	0.4	0.6	0.8	1
1	66.32875	66.093	65.85725	65.6215	65.38575	65.15	64.91425	64.6785	64.44275	64.207	63.97125
0.8	65.6975	65.501	65.3045	65.108	64.9115	64.715	64.5185	64.322	64.1255	63.929	63.7325
0.6	65.06625	64.909	64.75175	64.5945	64.43725	64.28	64.12275	63.9655	63.80825	63.651	63.49375
0.4	64.435	64.317	64.199	64.081	63.963	63.845	63.727	63.609	63.491	63.373	63.255
0.2	63.80375	63.725	63.64625	63.5675	63.48875	63.41	63.33125	63.2525	63.17375	63.095	63.01625
0	63.1725	63.133	63.0935	63.054	63.0145	62.975	62.9355	62.896	62.8565	62.817	62.7775
-0.2	62.54125	62.541	62.54075	62.5405	62.54025	62.54	62.53975	62.5395	62.53925	62.539	62.53875
-0.4	61.91	61.949	61.988	62.027	62.066	62.105	62.144	62.183	62.222	62.261	62.3
-0.6	61.27875	61.357	61.43525	61.5135	61.59175	61.67	61.74825	61.8265	61.90475	61.983	62.06125
-0.8	60.6475	60.765	60.8825	61	61.1175	61.235	61.3525	61.47	61.5875	61.705	61.8225
-1	60.01625	60.173	60.32975	60.4865	60.64325	60.8	60.95675	61.1135	61.27025	61.427	61.58375

**4. Висновок**

Запропонована система з використанням програмованих логічних контролерів дозволить:

- уникнути прийняття суб'єктивних рішень з управління, і як слідство – відповідальність за енергоефективну та екологічну складову процесу з експлуатації ССККП людиною – оператором;
- збільшити енергетичну ефективність використання ССККП за допомогою оптимального управління програмованих логічних контролерів, в умовах, де постійно змінюються зовнішні гідрометеорологічні умови.
- в автоматичному режимі отримувати дані та можливість їх корегування, з холодопродуктивності, споживання електричної енергії у реальному часі, а також дані з питомої витрати енергії на вироблення холоду, крім того, користувач отримує динаміку змін цих величин за обраний період часу.

**Список використаних джерел**

- [1] Загоруйко В.А., Голиков А.А. Судовая холодильная техника–Киев: Наукова думка, 2000.– 607 с.  
 [2] Очеретяный Ю.А. Техническая эксплуатация судовых холодильных установок и систем кондиционирования // Учебное пособие для курсантов и студентов высших морских учебных заведений 2014. - Одеса: Изд. ОНМА, 204 с.  
 [3] Очеретяный Ю.А., Живица В.И., Белый В.Н., Онищенко О.А., Вайнфельд Э.Й. Концепция системы компьютерного мониторинга и технической диагностики рефрижераторной установки судна // Судовые энергетические установки: науч. -техн. сб. - 2011. - Вып. 28. Одесса: ОНМА - С. 5 - 11.



- [4] Очеретяный Ю.А. Определение изменений теплотехнических характеристик судовых холодильных установок в процессе эксплуатации // Холодильная техника и технология. – 2013. – Вып. 2 (142). – С. 15-19.
- [5] Очеретяный Ю.А. Определение отклонений функционирования судовой холодильной установки в процессе эксплуатации // Холодильная техника и технология. – 2013. – Вып. 3 (143). – С. 10-14.
- [6] Очеретяный Ю.А., Живица В.И., Онищенко О.А., Вайнфельд Э.Й., Тюхай Д.С. Разработка системы измерения энергетических показателей компрессионной холодильной установки // Харчова наука і технологія. – 2011. – Вып. 4(17). – С. 107 - 109.
- [7] Очеретяный Ю.А. Определение термодинамических показателей судовой холодильной установки в процессе эксплуатации // Проблеми техніки. - 2013. – Вып. 2. – С. 119 - 125.

### References

- [1] Zagoruiko V. A., Golikov A. A. Ship refrigeration equipment. Kiev: Naukova Dumka, 2000. 607p.
- [2] Ocheretyanyu Y. Technical operation of ship refrigeration units and air conditioning systems. Textbook for cadets and students of higher marine educational institutions, 2014. Odessa: ONMA Publishing House, 204 p.
- [3] Ocheretyanyu Y. A., Zhivitsa V. I., Belyi V. N., Onishchenko O. A., Weinfeld E. Y. The concept of a system for computer monitoring and technical diagnostics of a refrigerator installation of a ship. Ship power plants, 2011. Issue. 28. Pp. 5-11.
- [4] Ocheretyanyu Y. Determination of changes in the thermal characteristics of ship refrigeration units during operation. Refrigeration Engineering and technology. 2013. No. 2(142). Pp. 15-19.
- [5] Ocheretyanyu Y. Determination of deviations of functioning of a ship refrigeration unit during operation. Refrigeration Engineering and technology. 2013. No. 3(143). Pp. 10-14.
- [6] Ocheretyanyu Y. A., Zhivitsa V. I., Onishchenko O. A., Weinfeld E. I., Tyukhai D. S. Development of a system for measuring the energy performance of a compression refrigeration unit. Food science and technology. 2011. No. 4(17). Pp. 107-109.
- [7] Ocheretyanyu Y. Determination of thermodynamic indicators of a ship refrigeration unit during operation. Problems of technology. 2013. No. 2. Pp. 119-125.

УДК [621.867.3:622.612]:658.5

## САР ИНВАРИАНТНАЯ К КОНТРОЛИРУЕМЫМ ВОЗМУЩЕНИЯМ С ПРОГНОЗИРОВАНИЕМ СИГНАЛА КОРРЕКЦИИ ПО КУБИЧЕСКОМУ СПЛАЙНУ

М. Т. Степанов<sup>1</sup>, В. А. Хобин<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Одеська національна академія харчових технологій, Одеса, Україна

ORCID: <sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1297-5537>, <sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0238-8371>

e-mail: <sup>1</sup> [stepanov197818@gmail.com](mailto:stepanov197818@gmail.com); <sup>2</sup> [khobin@onaft.edu.ua](mailto:khobin@onaft.edu.ua)

Copyright © 2020 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: <https://doi.org/10.15673/atbp.v12i1.1705>

**Аннотация.** В статье рассматривается система автоматического регулирования, реализующая комбинированный принцип управления инвариантная относительно контролируемых возмущений. В математических моделях корректирующих связей систем автоматического регулирования инвариантных к контролируемым возмущениям часто присутствуют физически не реализуемые звенья чистого опережения. В инженерной практике для прогнозирования сигнала коррекции на время вперед такие звенья приближенно заменяют форсирующими звеньями. В качестве альтернативы такому подходу предлагается вести прогнозирование сигнала коррекции на основе кубического сплайна. Проведенный анализ показывает, что отдельные участки траектории движения сигнала могут быть представлены непрерывными, многократно дифференцируемыми функциями (например, кубическим сплайном).