

УДК 629.12.066(076)

## СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ СУДНОВОГО ДВИГУНА ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ

Сіманенков А. Л., аспірант кафедри експлуатації суднового електрообладнання та засобів автоматики Херсонської державної морської академії, e-mail: [syton2007@ukr.net](mailto:syton2007@ukr.net), ORCID: 0000-0003-0797-5276

*Аналіз роботи систем охолодження суднового двигуна внутрішнього згоряння (СДВЗ), за допомогою показника Херста, дозволив встановити зв'язок між підсистемами керування температурою та тиском. За матрицями параметрів температури та тиску у системах охолодження та підготовки палива. У подальшій перспективі це дозволяє використати отримані результати у визначенні необхідного завдання управління агрегатним енергетичним комплексом.*

**Ключові слова:** судновий ДВЗ, температурний режим, кореляційний аналіз, показчик Херста, фрактальний аналіз.

**Вступ.** Одним з основних напрямків підвищення ефективності роботи судна є експлуатація його енергетичної установки (СЕУ) на оптимальних режимах роботи. Мета оптимізації – досягнення екстремального (максимального або мінімального) значення однієї або декількох величин, які називаються критеріями оптимальності.

Під час вибору критеріїв оптимального керування на рівні СЕУ доволі ефективним є застосування принципу послідовної декомпозиції нижнього рівня дворівневої лінійної ієрархічної структури. Сутність методу полягає в тому, що будь-яка складна система може бути виражена у вигляді типових ланок. Кожна ланка у якості вхідного параметру має критерій, а у якості вихідного – мету. При цьому за мету мають – максимальний добуток у економічному, технічному, соціальному або інших аспектах розуміння, а під критерієм розуміють – мінімальне відхилення від мети ланки вищого рівня. Найважливішими параметрами процесу згоряння палива у суднових двигунах внутрішнього згоряння (СДВЗ) є: коефіцієнт надлишку повітря  $\alpha$ , коефіцієнт наповнення  $\eta_n$ , середній індикаторний тиск  $p_i$ . Ці параметри залежать від температури повітря наддуву, тиску повітря, відносної вологості, температури охолоджуючої рідини двигуна та в'язкості палива.

**Аналіз літературних даних та постановка проблеми.** Функціонування систем охолодження суднових дизелів доцільно характеризувати двома групами показників: режимними, такими як температура охолоджуючої рідини, її витрата, перепад температур в контурах охолодження, тиск в системі охолодження, і водно-хімічними, що характеризують фізичні і хімічні властивості охолоджуючої рідини. Вплив фізико-хімічних і теплофізичних властивостей охолоджуючих рідин на ресурсні, економічні та екологічні показники роботи дизелів є вкрай важливим фактором. У зв'язку з цим сучасна концепція регулювання охолодження повинна передбачати як автоматичне регулювання режимних показників, так і регулювання водно-хімічних параметрів охолодження рис. 1 [1, 1].

Переваги, які можуть бути отримані від впровадження систем автоматичного регулювання охолодження в суднових дизельних установках, зводяться до наступного:

- обслуговуючий персонал звільняється від безпосереднього спостереження за режимними і водно-хімічними параметрами в системах дизеля і від праці, пов'язаної з ручним управлінням;
- автоматизоване управління здатне забезпечити роботу суднового дизеля при оптимальних параметрах охолодження.

Таким чином, проблемами автоматичного регулювання температурного стану СДВЗ є завдання підвищення точності і якості процесу регулювання. При цьому слід відзначити, що при синтезі систем потрібно домогтися не просто заданих показників якості, таких як точність, запас стійкості, швидкодія, прийнятний характер перехідних процесів та ін., але й відповідності параметрів системи автоматичного регулювання (САР) охолодженням режиму роботи двигуна [3, 4].

Питання про кількісну оцінку близькості оптимальної системи відповідаючій їй «ідеальній» є нелегким, недостатньо розробленим теоретично. Практично така оцінка може бути проведена шляхом порівняння показників виконаної реальної системи з показниками, отриманими при розрахунку математичної моделі. Однак при цьому неминуче доводиться стикатися з питанням про те, яка кількісна оцінка близькості математичної моделі і реальної системи [5, 6].

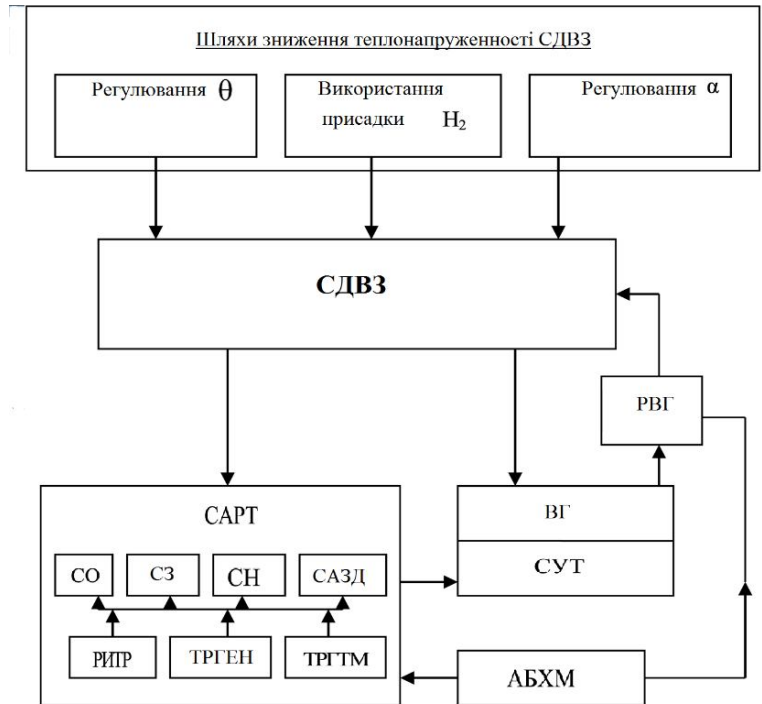


Рисунок 1 – Фактори, що визначають температурний і теплонапружений стан дизеля:  
 $\theta$  – кут випередження впорскування палива;  $H_2$  – водень у вигляді присадки;  $\alpha$  – коефіцієнт надлишку повітря; РВГ – рециркуляція ВГ; ВГ – відпрацьовані гази; СУТ – система утилізації теплоти; АБХМ – абсорбційна холодильна машина; САРТ – система автоматичного регулювання теплового стану СДВЗ; СО – система охолодження; СЗ – система змазки; СН – система наддуву; САЗД – система аварійної зупинки дизеля; РІПР – релейно-імпульсний терморегулятор; ТРГЕН – терморегулятор з електронагрівачем; ТРГТМ – терморегулятор з термоелектричним модулем

У загальному випадку система регулювання охолодження дизеля складається з програматора-задатчика (П) 1, який виробляє задаючий вплив (програму, програмний рух); регулятора (Р) 2 та об'єкта у правління (ОУ) 3 – рис. 2.

В таких системах, зазвичай, у якості задатчика використовують конвенційний ПІД контролер, регулятором виступає механічний клапан перерозподілу потоків охолоджуючої рідини з електричним приводом, а ОУ – головний судновий двигун внутрішнього згоряння [7, 8].

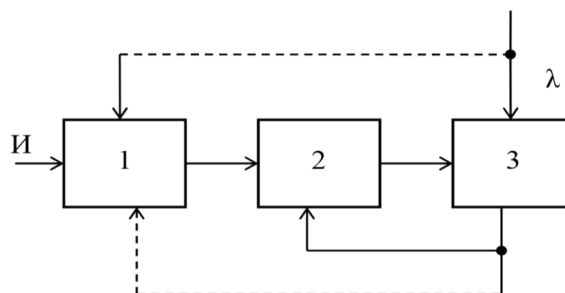


Рисунок 2 – Функціональна схема системи регулювання:  
 1 - програматор; 2 - терморегулятор; 3 - об'єкт управління

На схемі символ  $I$  позначає сукупність зовнішньої інформації, яка надходить на програматор. Завдання синтезу оптимальної системи полягає в тому, щоб для заданого об'єкта синтезувати регулятор і програматор, які, в певному сенсі, найкращим чином вирішують поставлене завдання регулювання. Математично ці завдання можуть бути сформульовані одноманітно і вирішуватися одними і тими ж методами, але в той же час вони мають специфічні особливості, які роблять доцільним на певному етапі їх роздільний розгляд. Ці особливості обумовлюються тим, що рішення першого завдання пов'язано, як правило, з визначенням програмного регулювання, а рішення другого - з визначенням регулювання зі зворотним зв'язком. Таким чином, програмне регулювання - це управління у вигляді функції від часу, а регулювання зі зворотним зв'язком - регулювання у вигляді функції від фазових координат.

Систему автоматичного регулювання температурного стану дизеля можна структурно розглядати як одну контурну, у вигляді умовних зображень ланок і зв'язків між ними. У загальному вигляді система складається з двох укрупнених структурних ланок: об'єкта і регулятора рис. 3.

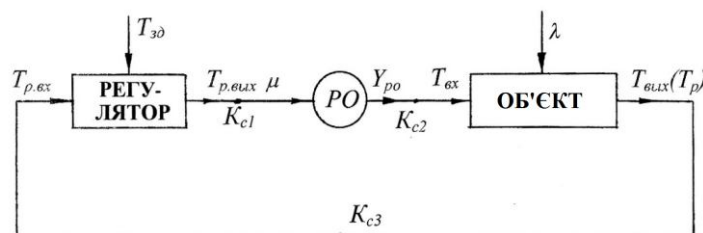


Рисунок 3 – Структурна схема системи автоматичного регулювання температурного стану СДВЗ

Об'єкт з регулятором визначає головний зворотний зв'язок. Видно, що система автоматичного регулювання температури являється замкнутою системою ланок спрямованої дії [9].

Об'єкт характеризується координатами: температурою входу  $T_{вх}$ , температурою виходу  $T_{вих}$  ( $T_p$ ) і координатою навантаження  $\lambda$ , яка служить другою входною координатою в дизелі. Регулятор характеризується температурою входу  $T_{р,вх}$ , температурою виходу  $T_{р,вих}$  і температурою завдання  $T_{зд}$ . На лініях зв'язку вказують передавальні коефіцієнти зв'язків  $K_{c1}$ ,  $K_{c2}$ ,  $K_{c3}$ .

За допомогою спеціальних настроювальних органів завдання, якими обладнуються терморегулятори (ТРГ), можна встановити те чи інше значення температури завдання  $T_{зд}$ . Відповідно до цього параметру визначаються і значення регульованого параметра, яке буде підтримуватися ТРГ. За допомогою збурюючого впливу  $\lambda$  об'єкт змінює заданий режим. Збурюючими впливами прийнято називати впливи, що прагнуть порушити необхідний функціональний зв'язок між заданою дією і регульованою температурою. При цьому під задаючим впливом розуміється вплив на систему, що визначає необхідний закон зміни регульованої температури. Дію ТРГ на об'єкт, внаслідок якого останній повертається в рівноважний режим при забезпеченні необхідного значення параметра, назовемо регулюючим впливом  $\mu$ . ТРГ здійснює вплив на дизель через регулюючий орган (РО), який перетворює зміну одержуваної на виході з ТРГ температури води, що надходить на вхід в дизель.

Вимоги до точності підтримки регульованої температури в статиці і динаміці допускають тут застосування найпростіших конструкцій статичних ТРГ і регулювання тільки по відхиленню регульованої температури. ТРГ, а також дизель з його системою охолодження являються складовими частинами системи регулювання температури охолоджуючої рідини. Відхилення регульованої температури охолоджуючої рідини від заданого значення залежить, з одного боку, від властивостей ТРГ, а з іншого – від властивостей самого дизеля з його системою охолодження. Таким чином, операція регулювання температури дизеля включає п'ять основних етапів:

- вимірювання регульованої температури;

- порівняння вимірюваної величини зі значенням, заданим уставкою;
- обробку цієї різниці (помилки) в ТРГ;
- переробку керуючого сигналу в регулюючий вплив;
- повернення регульованої температури до заданого значення регулюючим впливом.

В існуючих системах автоматичного регулювання температурного стану СДВЗ на всіх режимах роботи дизеля алгоритм функціонування містить припис про підтримання постійного значення регульованої температури охолоджуючої рідини, який є системою стабілізації. Використовуючи крім системи стабілізації, електричні елементи у виконавчому регулюючому пристрої ТРГ, передбачається створити систему програмного регулювання, яка містить алгоритм функціонування системи автоматичного регулювання температури (САРТ), тобто припис про зміну регульованої температури відповідно до заздалегідь заданої функції. Необхідна зміна регульованої температури по навантаженню дизеля забезпечується в цій системі за строго певною програмою. На вхід об'єкта надходить регулюючий вплив  $\mu$  від ТРГ. Якщо таких впливів декілька:  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$ , то їх можна об'єднати в вектор  $\underline{\mu}$  з координатами  $\mu_j$  ( $j = 1, \dots, n$ );  $\mu = (\mu_1, \dots, \mu_n)$ .

На вхід ТРГ подається задаючий вплив  $t_{зд}$ , що представляє собою інструкцію про те, якою має бути вихідна температура (регульована температура)  $T_{вих}$  ( $T_p$ ) охолоджуючої рідини. Ця інструкція повинна конкретизувати мету регулювання. Інструкція може являти собою деяку кількість  $n$  величин  $T \cdot 1, \dots, T \cdot n$ , які вважатимемо координатами вектора  $T \cdot$ :  $\vec{T} \cdot$  ( $T \cdot 1, \dots, T \cdot n$ ). Наприклад, можна прийняти, щоб в ідеальному випадку задовольнялися умови  $T_i = T \cdot i$  ( $i = 1, \dots, n$ ), де  $T \cdot i$  - задані функції часу.

Відхилення величини вихідної (регульованої) температури  $T_{вих}$  ( $T_p$ ) від встановлених значень може статися з наступних причин:

- неправильне, неточне або запізніле використання ТРГ інформації про характеристики об'єкта і про цілі регулювання, цей недолік, в принципі, може бути виправлений удосконаленням закону дії (алгоритму) ТРГ.
- обмеження ресурсів регулювання, тобто неможливість за тих чи інших причин подавати на об'єкт такі регулюючі дії  $\underline{\mu}$ , які можуть забезпечити необхідну поведінку  $\underline{\mu}$  об'єкта. (В умовах експлуатації дизелів ресурси управління завжди обмежені, і цю обставину необхідно враховувати).
- деякий заздалегідь непередбачений і не контрольований збурюючий вплив  $\lambda$ , що впливає на його вихідну величину, наприклад, різка зміна температури охолоджуючої заборотної води, що надходить на об'єкт.

**Метою дослідження** є виявлення прихованих закономірностей між основними параметрами роботи СДВЗ.

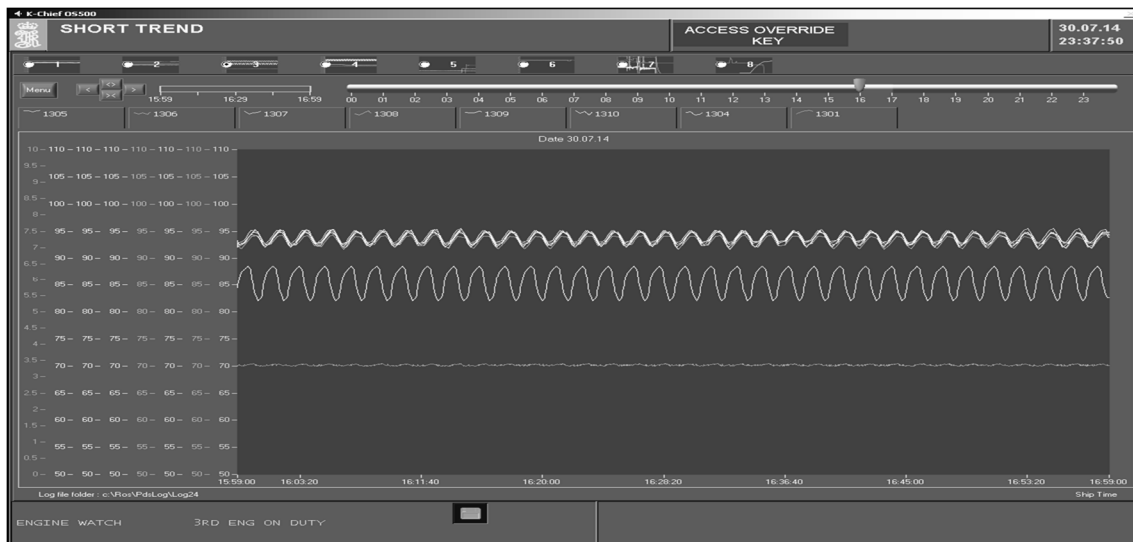
За основні параметри роботи СДВЗ прийнято: тиск і температуру охолоджуючої рідини СДВЗ та тиск і температуру палива у паливній магістралі високого тиску СДВЗ.

Для аналізу використовувалися дані зібрані на протязі 24 годин сталого режиму роботи СДВЗ, типу Wärtsilä – Sulzer 6 RT-flex 50b [10], (морський перехід) з інтервалом у 9 хвилин.

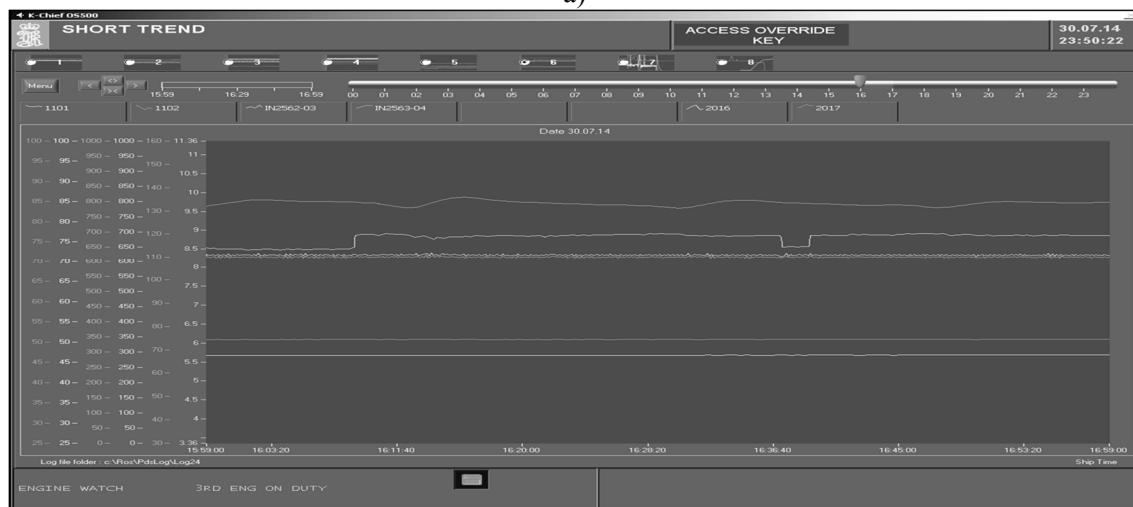
**Методи дослідження та критерії оцінювання кореляційних залежностей робочих параметрів агрегатного комплексу.** При підвищенні температури охолоджуючої рідини ефективна потужність СДВЗ підвищується, у той час як питома витрата палива  $g_e = G_e / N_e$  зменшується. Значне зменшення питомої витрати палива має місце при рості температури охолоджуючої рідини до 85–95 °С (для середньо-оборотних двигунів). У абсолютних значеннях зменшення витрати палива на кожні 10 °С підвищення температури охолоджуючої рідини виражається величиною від 2 до 7 г/кВт/год (у інтервалах температур від 40 до 80 °С). Слід відзначити, що в цей час не здійснюють впливу не конструктивні особливості дизеля, не якість палива.

На рис. 4 представлені криві зміни значення температури охолоджуючої рідини СДВЗ по окремих циліндрах, а також дані про зміну значення температури та тиску палива. Дані дають змогу побачити неефективність роботи конвенційного ПД регулятора, за рахунок незатухаючих коливань.

Зняття параметрів виконувалося за допомогою системи контролю та моніторингу основних параметрів роботи СДВЗ типу KONGSBERG ACC20. Дані з вказаної моніторингової системи були отримані за допомогою вбудованої функції «Shorttrend», яка дає змогу обслуговуючому персоналу отримувати інформацію про стан основних параметрів роботи СДВЗ у вигляді трендів. Вимірювання проводилися під час сталого режиму роботи (морський перехід) на протязі 24 годин з інтервалом у 9 хвилин.



а)



б)

Рисунок 4 – Криві зміни значення:

а - температури охолоджуючої рідини СДВЗ по окремих циліндрах; б - тиску і температури палива СДВЗ

**Визначення закону розподілення та прихованих періодичностей у статистичних даних.** При визначенні закону розподілення виникає задача згладжування статистичних даних за допомогою простих аналітичних залежностей для їх наведення в більш компактному вигляді. Для цього застосовується відновлений статистичний ряд, за даними якого можна провести аналіз розподілу випадкової величини кількості відхилень параметру. Використовуючи дані статистичного ряду побудовано гістограми щільності розподілу даних для вказаних вище параметрів та визначено типи розподілу за критерієм узгодження Пірсона [11, 9].

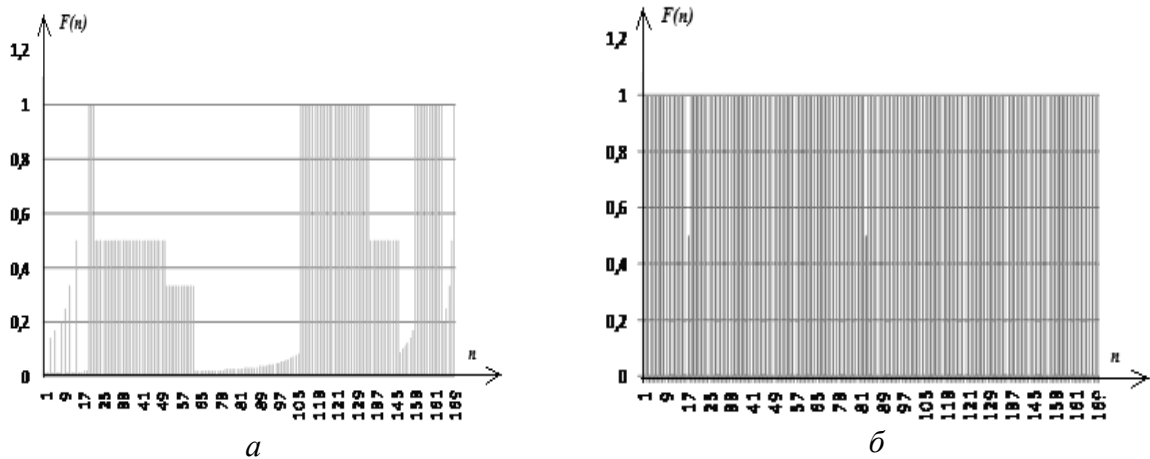


Рисунок 5 – Гістограма зміни:

*a* - тиску охолоджуючої рідини; *б* - температури охолоджуючої рідини

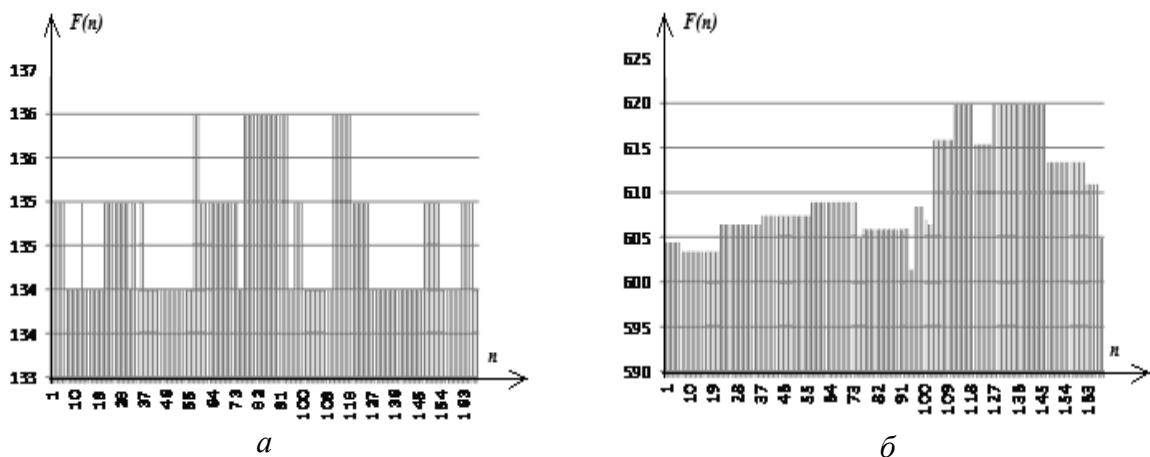


Рисунок 5 – Гістограма зміни:

*a* - температури палива; *б* - тиску палива

Відповідність певному закону розподілення статистичних даних про відхилення дозволяє використовувати їх для подальшого аналізу. Для виявлення прихованих періодичностей у статистичних даних відхилення параметрів використовуємо кореляційний аналіз.

**Дослідження кореляційно функції об'єкта.** Для доведення зв'язку між даними за відхиленнями різних параметрів дослідимо кореляційну функцію, що відноситься до різних часових моментів  $t$  і знаходиться за формулою:

$$K_{xy}(t, t') = M \left[ \overset{\circ}{x}(t) \overset{\circ}{y}(t') \right], \quad (1)$$

де  $\overset{\circ}{x}(t)$ ,  $\overset{\circ}{y}(t')$  – центровані випадкові величини окремих часових процесів.

Для розрахунку кореляційних функцій вважаємо, що процеси стаціонарні та коливання відбуваються відносно деякого середнього значення [12]. Статистичні характеристики випадкових функцій наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Статистичні характеристики випадкових функцій

Вид розрахунку	Температура охолоджуючої рідини	Тиск охолоджуючої рідини	Температура палива	Тиск палива
Математичне очікування	93,56	3,4	134,7	613,9
Дисперсія	0,16	15814	0,561	40,36
Середньоквадратичне відхилення	62,23	1,371	68,22	292,43

На основі отриманих результатів розрахунку коефіцієнтів кореляції між часовими рядами даних за табл. 2 можна зробити висновок, що найбільш взаємозалежними є температура та тиск палива: коефіцієнт кореляції  $R_{43}(t) = 0,39$ , а також температура палива та тиск охолоджуючої рідини: коефіцієнт кореляції  $R_{43}(t) = 0,37$ . Результати розрахунків кореляційних функцій представлено на рис. 7.

Таблиця 2 – Матриця коефіцієнтів кореляції

Параметр	Температура охолоджуючої рідини	Тиск охолоджуючої рідини	Температура палива	Тиск палива
Температура охолоджуючої рідини	1,00	0,103	0,11	0,3
Тиск охолоджуючої рідини	0,103	1,00	0,22	0,37
Температура палива	0,11	0,22	1,00	0,39
Тиск палива	0,3	0,37	0,39	1,00

Зображення коефіцієнтів нормованої кореляції для досліджуваного статистичного ряду спостережень свідчить про розподілення кореляційних властивостей за місяцями. Аналіз графіків дозволяє виявити періодичність коливань даних.

Апроксимуємо данні за допомогою ряду Фур'є наступного виду:

$$\phi(t) = A_0 + A_1 \cos(\omega t + \alpha_1) + A_2 \cos(2\omega t + \alpha_2) + A_3 \cos(3\omega t + \alpha_3) + \dots = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega t + \alpha_n); \quad (2)$$

де  $\omega = 2\pi/T$  – основна частота.

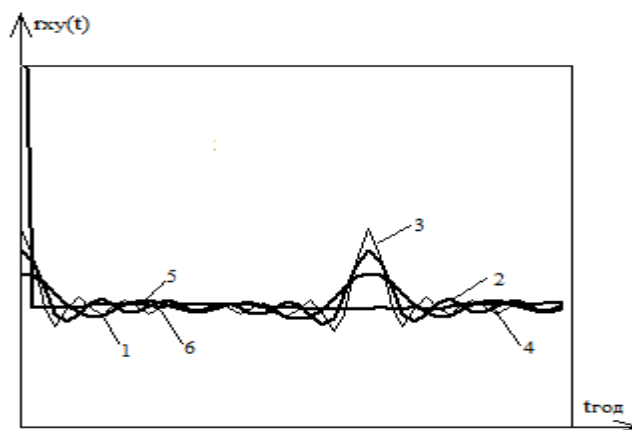


Рисунок 7 – Коефіцієнти нормованої кореляції для значень параметрів: температура охолоджуючої рідини (1), тиск охолоджуючої рідини (2), температура палива (3) та тиск палива (4) 1 – для 1 і 2 параметрів; 2 – для 1 і 3 параметрів; 3 – для 1 і 4 параметрів; 4 – для 2 і 3 параметрів; 5 – для 2 і 4 параметрів; 6 – для 3 і 4 параметрів

В результаті розкладання ряду на окремі коливання отримуємо графік рис. 8 для значення параметрів температури та тиску палива.

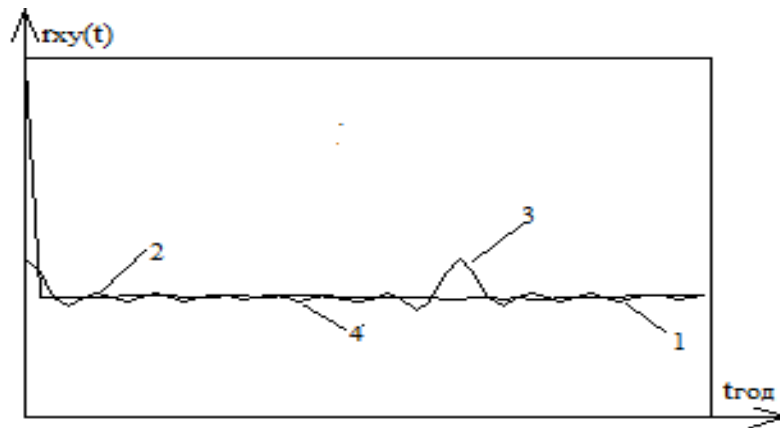


Рисунок 8 – Апроксимація графіку нормованої кореляції для значення параметрів температури та тиску палива:

1 – вихідні дані кореляції; 2 – за 3-ма гармоніками; 3 – за 5-ма гармоніками; 4 – за 7-ма гармоніками

В результаті розрахунків апроксимуюча функція приймає вигляд:

$$\begin{aligned}
 P_r(t) = & 0,035 - 0,018 \cos(\omega_1 t + 2,963) - 0,022 \cos(\omega_2 t + 3,073) - \\
 & - 0,022 \cos(\omega_3 t + 3,056) - 0,024 \cos(\omega_4 t + 3,097) - \\
 & - 0,022 \cos(\omega_5 t + 3,072) - 0,024 \cos(\omega_6 t + 3,167) - 0,022 \cos(\omega_7 t + 3,113),
 \end{aligned} \quad (3)$$

де  $\omega_i = 2\pi i / T = i\omega_1$ ,  $T = 24 \text{ год}$ ,  $i = 1..n-1$ .

В результаті перевірки значимості коефіцієнтів за критерієм Ст'юдента вираз (3) приймає наступний вигляд:

$$\begin{aligned}
 P_r(t) = & 0,035 - 0,022 \cos(\omega_2 t + 3,073) - 0,022 \cos(\omega_3 t + 3,056) - 0,024 \cos(\omega_4 t + 3,097) - \\
 & - 0,022 \cos(\omega_5 t + 3,072) - 0,024 \cos(\omega_6 t + 3,167) - 0,022 \cos(\omega_7 t + 3,113).
 \end{aligned} \quad (4)$$

Перевірка адекватності моделі (4) за критерієм Фішера підтверджує її відповідність об'єкту.

На відміну від традиційних методів статистичного аналізу випадкових величин, нові методи засновані на дослідженні фрактальної природи процесів та вейвлет-перетворенні поряд з глобальними характеристиками стохастичних процесів дозволяють розкрити особливості їх локальної структури. Відомо [6], що для застосування фрактального аналізу необхідно довести, що задані часові ряди даних про відхилення володіють основними фрактальними властивостями: само-подібністю та дробовою розмірністю.

Загальне визначення само-подібності стохастичного процесу базується на прямому масштабуванні безперервної змінної часу. Само-подібність процесів виникнення відхилень параметрів роботи СДВЗ може бути визначена за допомогою параметру Херста [13].

Для випадку стохастичного процесу, визначеного в дискретні моменти часу, стохастичний процес  $X(t)$  визначається як  $\{x_t, t = 0, 1, 2, \dots\}$ . Для стаціонарних часових серій  $x$  знайдемо  $m$ -агреговані часові серії  $x^{(m)} = \{x_k^{(m)}, k = 0, 1, 2, \dots\}$ , складаючи початкові часові серії по сусідніх блоках розміром  $m$ , що не перекриваються, за виразом:

$$x_k^{(m)} = \frac{1}{m} \sum_{i=km-(m-1)}^{km} x_i. \quad (5)$$

Агреговані часові серії являють собою метод стиснення шкали часу. Якщо статистичні характеристики процесу (середнє значення, дисперсія) зберігаються при



стисненні, тоді можна стверджувати про самоподібність процесу. Таким чином процес  $x$  являється в точності самоподібним з параметром  $\beta$  ( $0 < \beta < 1$ ), який пов'язаний з параметром Херста як  $H = 1 - (\beta/2)$ , якщо для всіх  $m = 1, 2, \dots$  існує дисперсія:

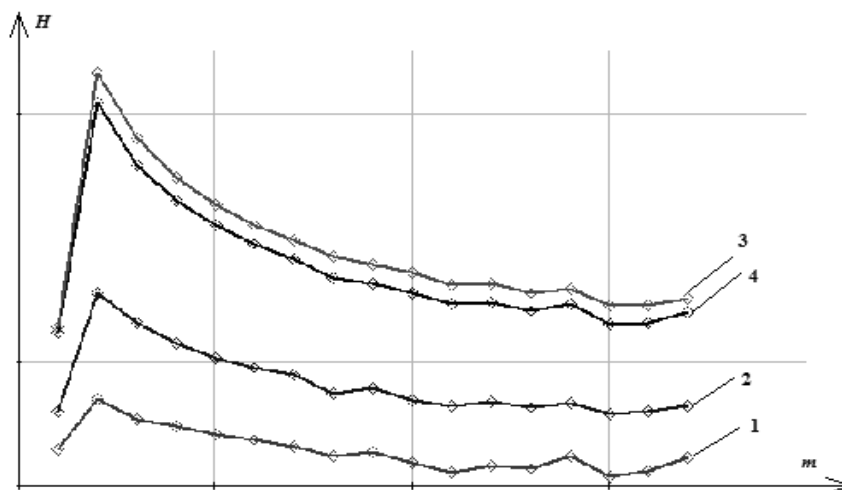
$$D(x^{(m)}) = \frac{D(x)}{m^\beta}. \quad (6)$$

Якщо прологарифмувати цей вираз, то отримаємо:  $\log[D(x^{(m)})] = \log[D(x)] - \beta \log(m)$ .

Звідки:

$$\beta = \frac{\log[D(x)/D(x^{(m)})]}{\log(m)}. \quad (7)$$

При аналізі самоподібності часових рядів відхилення кожного параметру з кількістю статистичних точок  $n$  для агрегованих за часом серій  $x^{(m)}$  знайдено параметр Херста  $H$ , параметр  $\beta$ , дисперсію не агрегованого процесу  $D(x)$  та дисперсію для процесів різної агрегації  $D(x^{(m)})$ . Майже в усіх випадках параметр Херста  $H$  знаходиться в межах від 0,5 до 1, що свідчить про наявність довгострокової залежності та фрактальних властивостей. На рис. 9 зображено графік залежності параметра Херста  $H$  від ступеня агрегації  $m$ .



Рисунк 9 – Графік залежності параметра Херста  $H$  від ступеню агрегації  $m$  для параметрів: 1 – температура охолоджуючої рідини; 2 – тиск охолоджуючої рідини; 3 – температура палива; 4 – тиск палива

Таким чином, подальший аналіз на основі фрактальних властивостей можливий лише з використанням моделей з більшим ступенем агрегації.

**Результати дослідження впливу обраних характеристичних параметрів на ефективність роботи агрегатного комплексу.** З метою виявлення зв'язку між агрегованими даними за допомогою кореляційного аналізу дослідимо отримані функції, де розрахунок виконують аналогічно наведеному вище для статистичних даних. Коефіцієнти кореляції представлено в табл. 3.

Таблиця 3 – Матриця коефіцієнтів кореляції агрегованих даних 5-го ступеню

<i>Параметр</i>	<i>Температура охолоджуючої рідини</i>	<i>Тиск охолоджуючої рідини</i>	<i>Температура палива</i>	<i>Тиск палива</i>
Температура охолоджуючої рідини	1,00	0,2	0,21	0,49
Тиск охолоджуючої рідини	0,2	1,00	0,38	0,52
Температура палива	0,21	0,38	1,00	0,73
Тиск палива	0,49	0,52	0,73	1,00

**Обговорення результатів дослідження прихованих закономірностей між основними характеристичними параметрами роботи СДВЗ у складі агрегатного комплексу.** При дослідженні вибірок статистичних даних роботи підсистем регулювання температури та тиску охолоджуючої рідини, а також температури та тиску палива у системі підготовки палива СДВЗ, найбільш зручним методом визначено застосування відновленого статистичного ряду.

Використання критерію узгодженості Пірсона дозволило провести розподіл статистичних вибірок про відхилення параметрів, що досліджуються, за обраним законом. Подальший кореляційний аналіз показав взаємозалежність між тиском і температурою охолоджуючої рідини та тиском і температурою палива. Що є цілком суб'єктивним твердженням, адже як показано авторами у [1], підсистеми автоматичного регулювання охолодження СДВЗ діють шляхом перерозподілу потоків охолоджуючої рідини або через теплообмінник або в обхід останнього, і таким чином паралельно до температури змінюють тиск рідини у магістралі. Говорячи про підсистеми підготовки палива, однозначно встановлено [1] співвідношення між температурою та тиском у замкнутому контурі циркуляції палива.

Під час оцінювання коефіцієнтів нормованої кореляції, засвідчено розподіл кореляційних властивостей за місцями, що дозволило виявити періодичність коливань параметрів у контурах досліджуваних підсистем автоматичного регулювання. Розклад ряду на окремі коливання та перевірка моделі за критерієм Фішера підтверджує її відповідність реальному об'єкту. З чого можна визначити твердження про ідентичність розробленої моделі та її прихованих зв'язків між параметрами, до дійсного об'єкту.

Використовуючи нові методи статистичного аналізу при дослідженні фрактальної природи процесів, що вивчаються, було розкрито особливості фрактальної структури вибірок статистичних даних об'єкту дослідження. З метою виявлення зв'язку між агрегованими даними за допомогою кореляційного аналізу було встановлено, що основні параметри роботи СДВЗ мають значне відхилення своїх значень від встановлених, що в свою чергу вказує на недоліки підсистем автоматичного регулювання температури та тиску охолоджуючої рідини та палива, а саме:

- недостатня швидкодія систем автоматичного регулювання;
- недоліки прийнятих математичних моделей вказаних систем;
- незлагодженість між підсистемами регулювання та системою дистанційного автоматичного управління ДАУ СДВЗ.

**Висновки.** Під час аналізу факторів, що впливають на тепловий режим СДВЗ, виявлено групу головних факторів, які визначають температурний та тепло-напружений стан СДВЗ.

Показчик Херста підтверджує само-подібність процесів теплообміну та вказує на наявність фрактальних властивостей. Більш високий ступінь агрегації систем дозволяє провести послідовний аналіз фрактальних властивостей.

Для вирішення задачі керування у автоматичних системах управління охолодженням (АСУ) повинна бути сформована більш доцільна модель керування, що дозволить забезпечити найоптимальніший закон керування.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Carlton J. S. Marine propellers and propulsion. / J. S. Carlton. First edition. – Elsevier Ltd Waltham, USA, 1994. – 518 p.
2. Фомин А. Я. Судовые двигатели внутреннего сгорания : учебник / А. Я. Фомин, А. И. Горбань, В. В. Добровольский. – Л. : Судостроение, 1989. – 344 с.
3. Гацуц А. Г. Повышение эффективности работы судовых энергетических установок путем обеспечения оптимального температурного режима. [Текст] / А. Г. Гацуц, А. Р. Мыська, А. О. Дранкова // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2015. – № 3/201. – С. 71–74.
4. Тимофеев В. Н. Температурный режим двигателей внутреннего сгорания и его регулирование / В. Н. Тимофеев. – Чебоксары : Изд-во Чуваш. ун-та, 2008. – 358 с.
5. Безюков О. К., Совершенствование конструкции систем охлаждения судовых двигателей. / О. К. Безюков, В. А. Жуков, М. А. Тарасов // Развитие транспорта в регионах России: проблемы и перспективы : материалы Всерос. науч.-практ. конф. – Киров, 2007. – С. 67–70.
6. Roberts, G. N. Advances in unmanned marine vehicles. / G. N. Roberts, R. Sutton. – MGP Books Ltd, Bodmin Cornwall, 2006. – 461 p.
7. Patel R. Mukund. Shipboard propulsion, power electronics and ocean energy / Mukund S. Patel. – FL: CRC Press / Taylor & Francis, Boca Raton, 2012. – 352p.
8. Morris, A. S. Measurement and instrumentation principles. / Allan S. Morris. – Butterworth-Heinemann, Woburn, 2001. – 491 p.
9. Michalsky L. Temperature measurement. / L. Michalsky, K. Eckersdorf, J. Kucharski, J. McGhee. Includes bibliographic references and index. – John Wiley&Sons Ltd., Chichester, 1991. – 496 p.
10. RT-flex. Operation & Practical Training Course [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <http://dieselturbo.man.eu>.
11. Мойсюк Б. Н. Идентификация и оптимизация сложных объектов методами активного эксперимента : учебное пособие по курсу «Экспериментально-статистические методы оптимизации и исследований» / Б. Н. Мойсюк. – Моск. энерг. ин-т, 1988. – 333 с.
12. Потапов А. А. Методы классической и современной теории автоматического управления. В 5 томах. Том 5. Новейшие методы обработки изображений. / А. А. Потапов, Ю. В. Гуляев, С. А. Никитов. – М. : Физматлит, 2008. – 496 с. .
13. Рожков С. О. Ідентифікація параметрів текстильних виробництв методами аналізу часових рядів. [Текст] / С. О. Рожков, Г. В. Рудакова // Вісн. Нац. ун-ту «Львів. політехніка». – 2011. – № 719. – С. 126–132.

### REFERENCES

1. Carlton, J. S. (1994). Marine propellers and propulsion. Elsevier Ltd, Waltham, USA, 518. First edition. ISBN 978-0-08-097123-0.
2. Fomin, A. Ya., Gorbanj, A. Ya., Dobrovolskiy, V. V. (1989). Sudovihe dvigateli vnutrennego sgoraniya. L.: Sudostroenie, 344.
3. Gacuc, A. G., Mihsjka, A. R., Drankova, A. O. (2015). Povihszenie ehffektivnosti rabotih sudovihkh ehnergeticheskikh ustanovok putem obespecheniya optimaljnogo temperaturnogo rezhima. Elektromekhanichni ta energozberigayuchi sistemi, 3/201, 71-74.
4. Timofeev, V. N. (2008). Temperaturnihyj rezhim dvigateleyj vnutrennego sgoraniya i ego regulirovanie. Cheboksarij: Izd-vo Chuvash. un-ta, 358.

5. Bezyukov, O. K., Zhukov, V. A., Tarasov, M. A. (2007). Sovershenstvovanie konstrukcii sistem okhlazhdeniya sudovihkh dvigateleyj. Razvitie transporta v regionakh Rossii: problemih i perspektivih; materialih Vseros. nauch.-prakt. konf. — Kirov, 67–70.
6. Roberts, G. N., Sutton R. (2006). Advances in unmanned marine vehicles. MGP Books Ltd, Bodmin Cornwall, 461. ISBN 978-0-86341-450-3.
7. Patel, R. Mukund (2012). Shipboard propulsion, power electronics and ocean energy. FL: CRC Press / Taylor & Francis, Boca Raton, 352p. ISBN 978-1-4398-8850-6.
8. Morris, A. S. (2001). Measurement and instrumentation principles. Butterworth-Heinmann, Woburn, 491. ISBN 075-06-50818.
9. Michalsky, L., Eckersdorf, K., Kucharski, J., McGhee, J. (1991). Temperature measurement. John Wiley&Sons Ltd., Chichester, 496. Includes bibliographic references and index. ISBN 047-1-86779-9.
10. RT-flex. Operation & Practical Training Course. <http://dieselturbo.man.eu>.
11. Moyjsyuk, B. N. (1988). Uchebnoe posobie po kursu «Ehksperimentaljno-statisticheskie metodih optimizacii i issledovaniyj». Identifikaciya i optimizaciya slozhnihkh objhektov metodami aktivnogo ehksperimenta. Mosk. ehnerg. in-t, 333.
12. Potapov, A. A., Gulyaev, Yu. V., Nikitov, S. A. (2008). Metodih klassicheskoyj i sovremennoj teorii avtomaticheskogo upravleniya. V 5 tomakh. Tom 5. Novejshie metodih obrabotki izobrazheniyj. M.: Fizmatlit, 496.
13. Rozhkov, S. O., Rudakova, G. V. (2011). Identifikaciya parametriv tekstilnihkh virobnictv metodami analizu chasovikh ryadiv. Visn. Nac. un-tu «Ljviv. politehnika», 719, 126-132. Bibliogr.: 6 nazv. ukr.

**Симаненков А. Л. СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТЕПЛОВЫХ РЕЖИМОВ СУДОВОГО ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

*Статья рассматривает анализ статистических выборок данных основных характеристических параметров работы судового двигателя внутреннего сгорания (СДВС), с целью выделения параметра или группы параметров, оказывающих наибольшее влияние на эффективность работы агрегатного комплекса, а так же выявление скрытых закономерностей между ними.*

*Используя восстановленный статистический ряд и критерий согласования Пирсона, по выбранным законам разделения, позволило структурировать данные для дальнейшего корреляционного анализа. С помощью коэффициентов нормированной корреляции определена периодичность колебательности данных характеристических параметров. После разложения данных в ряд Фурье получена аппроксимирующая функция. Что позволило, используя фрактальную природу данных процессов и вейвлет-преобразования, определить сходство стохастических процессов изменения данных. Показатель Хэрста подтверждает схожесть процессов теплообмена и наличие фрактальных свойств.*

*В результате проведенные исследования указывают на актуальность изучения процессов теплообмена в подсистемах СДВС. А так же, будут использованы в ходе разработки более эффективной модели управления тепловыми режимами агрегатного комплекса.*

**Ключевые слова:** СДВС, температурный режим, корреляционный анализ, показатель Хэрста, фрактальный анализ.

**Simanenkov A. L. SHIP INTERNAL COMBUSTION ENGINE THERMAL CONDITIONS STATISTICAL ANALYSIS**

*The article deals with the analysis of statistical sampling of the data of the main characteristic parameters of the operation of the internal combustion engine (SCDV), in order to isolate the parameter or group of parameters that have the greatest impact on the efficiency of the aggregate complex, as well as to reveal the hidden regularities between them.*

*Using the reconstructed statistical series and Pearson's matching criterion, according to the selected separation laws, it was possible to structure the data for further correlation analysis. Using the normalized correlation coefficients, the periodicity of the oscillation of these characteristic parameters is determined. After the expansion of the data into a Fourier series, an approximating function is obtained. This made it possible, using the fractal nature of these processes and wavelet transforms, to determine the similarity of stochastic data modification processes. The Hurst index confirms the similarity of heat exchange processes and the presence of fractal properties.*

*As a result, the studies indicate the relevance of the study of heat transfer processes in the subsystems of the ADS. And also, will be used in the course of developing a more efficient model for managing the thermal conditions of the aggregate complex.*

**Keywords:** *SADV, temperature regime, correlation analysis, Hurst index, fractal analysis.*

© Сіманенков А. Л.

Статтю прийнято  
до редакції 18.09.17