

УДК 629.7.03:681.5.03 (045)

В.В. ПАНІН<sup>1</sup>, С.В. ЄНЧЕВ<sup>2</sup>, О.В. САВЧИН<sup>2</sup><sup>1</sup> Київська державна академія водного транспорту ім. П. Сагайдачного, Україна<sup>2</sup> Національний авіаційний університет, Україна

## АЛГОРИТМІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПЕРЕДПОМПАЖНИХ (ПОМПАЖНИХ) ЯВИЩ У КОМПРЕСОРАХ АВІАЦІЙНИХ ГТД

У статті розглядається проблема ідентифікації помпажних явищ в компресорах авіаційних газотурбінних двигунів. Обґрунтовується застосовність методу розпізнавання помпажу за допомогою розкладу імпульсної перехідної функції двигуна в ряд ортонормованих функцій Уолша. В якості діагностичної ознаки помпажу прийняті коефіцієнти розкладання Уолша - Фур'є. Розроблено алгоритм і функціональна схема пристрою ідентифікації помпажу. Формування класів проводиться на основі аналізу великої кількості експериментальних кривих зміни параметрів робочого процесу при помпажі і нормальній роботі двигуна.

**Ключові слова:** помпаж, авіаційний газотурбінний двигун, пристрій ідентифікації, функції Уолша; ортогональний розклад, алгоритм.

### Вступ

Сучасні авіаційні газотурбінні двигуни (ГТД) – це складні теплові машини, які складаються з великої кількості зв'язаних систем і пристроїв, до яких висуваються вимоги отримання екстремальних значень параметрів в заданих умовах експлуатації (мінімальна питома витрата палива на номінальному режимі, максимальна тяга при зльоті тощо).

Ці фактори призводять до постійного ускладнення конструкцій сучасних ГТД, появи нових систем і пристроїв – регульованих направляючих апаратів, клапанів перепуску повітря з компресора, регульованих систем охолодження турбіни тощо. Такі ускладнення конструкції викликають можливість виникнення коливань окремих параметрів, а також можливість впливу коливань в одних системах на роботу інших систем і появу багаточастотних коливань в ГТД. Характерною особливістю всіх цих режимів є наявність періодичних складових.

### 1. Постановка проблеми

Як показують результати досліджень представлених в [1 – 4], помпажні явища в ГТД призводять до втрати тяги, супроводжуються зростанням температури газів перед турбіною і підвищенням рівня вібрацій в результаті великих амплітуд пульсацій тиску і масових витрат по тракту двигуна. Можливість появи цих явищ є серйозною перешкодою на шляху збільшення надійності ГТД зокрема і безпеки польотів загалом. Короткочасна втрата тяги в разі

появи помпажу на одному з двигунів для багатомоторного літака або навіть для одномоторного в разі достатнього для повторного запуску запасів висоти і швидкості не призводить до катастрофічної ситуації [1]. Проте зростання температури в турбіні і збільшення рівня вібрацій може привести до прогару соплових апаратів турбіни і інших полумок [2]. Досвід експлуатації [2-4] показує, що особливо небезпечним для двигуна є неприпустиме зростання температури газів перед турбіною.

Для збільшення запасів стійкості ГТД використовують: регулювання направляючих апаратів компресора, перепускання повітря з окремих ступенів компресора, регульоване дозування подачі палива на режимах запуску, прийомистості дроселювання і т.д. Ці заходи зменшують ймовірність виникнення помпажних явищ, але не можуть служити гарантією їх усунення, оскільки помпаж може бути наслідком відмов в самих системах, призначених для попередження зривів. Окрім цього, збільшення запасів стійкості призводить до значного зниження КПД компресора і, відповідно, економічності ГТД [4]. Тому доцільно допустити невелику виникнення помпажу, але обладнати ГТД аварійними системами антипомпажного захисту і забезпечити максимальну економічність двигунів [6].

Ефективність застосування таких систем суттєво залежить від методу ідентифікації закладеної в її принцип дії. В зв'язку з цим особливий інтерес представляє метод ідентифікації, що використовує ортогональний розклад імпульсних перехідних функцій в ряд по функціях Уолша. У цьому випадку

усувається можливість помилкового спрацювання сигналізаторів помпажу внаслідок різких змін режиму роботи ГТД, а також знизити розмірність простору діагностичних ознак порівняно з діагностуванням на основі відліків досліджуваного процесу [1]. Таким чином, сформулюємо задачу досліджень у вигляді - обґрунтування застосовності методу ідентифікації по функціях Уолша та розробка алгоритмічного забезпечення в системах розпізнавання помпажних і передпомпажних явищ в авіаційних ГТД.

## 2. Основна частина

### Властивості ортогональних функцій Уолша.

Розглянемо основні властивості ортогональних функцій Уолша, які використовуватимемо при викладі пропонованого методу ідентифікації. Функції Уолша відносяться до класу кусково-постійних ортогональних функцій [3], який склав основу для створення і розвитку секветного аналізу, тобто дослідження процесів за допомогою несинусоїдальних функцій. Найнаочніше система функцій Уолша виводиться з системи функцій Радемахера. Функція Радемахера  $r_m(t)$  з індексом  $m$  має вид послідовності прямокутних імпульсів і містить  $2^{m-1}$  періодів на інтервалі  $[0,1]$ , приймаючи значення  $+1$  або  $-1$  (рис. 1). Виняток становить функція  $r_0(t)$  яка має вид одиничного імпульсу.

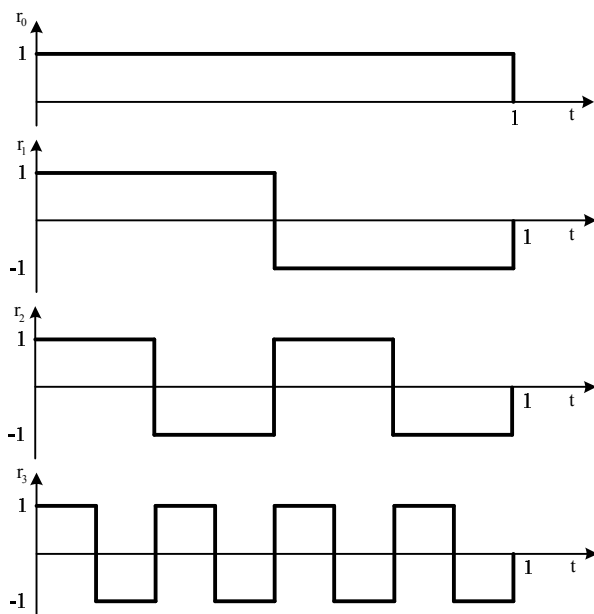


Рис. 1. Система ортонормованих функцій Радемахера

Система функцій Уолша подібна функціям Радемахера і виводиться з них, але є повною системою ортонормованих функцій, тобто будь-яка абсолютно інтегрована на інтервалі  $[0,1]$  функція може бути із

заданою точністю представлена у вигляді зваженої суми скінченного числа функцій Уолша. Між функціями Уолша  $W_i(t)$  і функціями Радемахера  $r_i(t)$ :

$$W_0(t) = r_0(t),$$

$$W_1(t) = r_1(t),$$

$$W_2(t) = (r_2(t))^1 (r_1(t))^0,$$

$$W_3(t) = (r_2(t))^1 (r_1(t))^1,$$

$$W_4(t) = (r_3(t))^1 (r_2(t))^0 (r_1(t))^0,$$

$$W_5(t) = (r_3(t))^1 (r_2(t))^0 (r_1(t))^1,$$

.....

$$W_n(t) = (r_q(t))^\alpha (r_{q-1}(t))^\beta (r_{q-2}(t))^\gamma \dots$$

$$\text{Тут } q = \text{int}(\log_2 n) + 1,$$

де  $\text{int}$  означає взяття найбільшого цілого;

$$2^{q-1}\alpha + 2^{q-2}\beta + 2^{q-3}\gamma + \dots = n,$$

тобто  $\alpha, \beta, \gamma, \dots$  - двійкове розкладання числа  $n$ .

Перші п'ять членів системи ортонормованих функцій Уолша представлені на рис. 2.

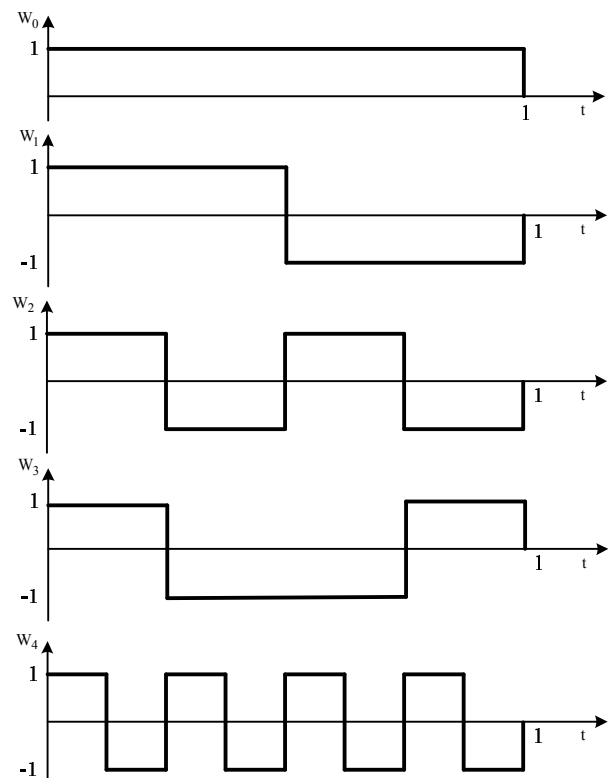


Рис. 2. Система ортонормованих функцій Уолша

**Метод ідентифікації по ортогональних функціях Уолша.** Цей метод є методом пасивної ідентифікації. Тут імпульсна перехідна функція (ІПФ)  $\omega(\tau)$  ГТД представляється у вигляді:

$$\omega(\tau) = \sum_{i=0}^n a_i W_i(\tau), \quad \tau \in [0; T], \quad (1)$$

де  $T$  – інтервал визначення функцій Уолша.

Інтервал визначення функцій Уолша  $T$  вибирається великим або рівним ефективній тривалості ІПФ. Вихідний сигнал  $y^*(t)$  розрахований по моделі (1), визначається виразом згортки

$$y^*(t) = \sum_{i=0}^n a_i \int_0^T W_i(\tau) x(t-\tau) d\tau.$$

Визначимо середньоквадратичну похибку  $\varepsilon^2$  розузгодження вимірюваного  $y(t)$  і модельного  $y^*(t)$  сигналів:

$$\begin{aligned} \varepsilon^2 &= \frac{1}{L} \int_0^L [y(t) - y^*(t)]^2 dt = \\ &= \frac{1}{L} \int_0^L \left[ y(t) - \sum_{i=0}^n a_i \int_0^T W_i(\tau) x(t-\tau) d\tau \right]^2 dt, \end{aligned} \quad (2)$$

де  $L$  – тривалість інтервалу спостереження.

Визначимо коефіцієнти розкладу  $a_i$  з умови мінімуму виразу (2):

$$\frac{\partial \varepsilon^2}{\partial a_j} = 0 \quad j = \overline{0, n}. \quad (3)$$

Диференціюючи (2) і підставляючи в (3) одержимо систему лінійних рівнянь для визначення  $a_i$ :

$$\sum_{i=0}^n a_i \int_0^L K_j(t) K_i(t) dt = \int_0^L y(t) K_j(t) dt, \quad j = \overline{0, n}; \quad (4)$$

$$K_i(t) = \int_0^T W_i(\tau) x(t-\tau) d\tau;$$

$$K_j(t) = \int_0^T W_j(\theta) x(t-\theta) d\theta.$$

Для дискретних значень  $x(t)$  і  $y(t)$  вимірюваних з частотою дискретизації  $\Delta$  систему рівнянь (4) можна привести до виду [1]:

$$\sum_{i=0}^n a_i c_{ij} = b_j, \quad j = \overline{0, n}. \quad (5)$$

Коефіцієнти  $c_{ij}$  і  $b_j$  обчислюються за формулами ( $j = \overline{0, n}$ ):

$$\begin{aligned} b_j &= \Delta \sum_{k=1}^{L/\Delta} y^*(k\Delta) K_j(k\Delta); \\ c_{ij} &= \Delta \sum_{k=1}^{L/\Delta} K_i(k\Delta) K_j(k\Delta); \quad i = \overline{0, n}; \end{aligned} \quad (6)$$

$$K_j(k\Delta) = \Delta \sum_{s=1}^{T/\Delta} W_j(s\Delta) x(k\Delta - s\Delta); \quad k = \overline{1, L/\Delta}.$$

Період дискретизації  $\Delta$  згідно теореми Котельникова визначається граничною частотою пропускання ГТД, тобто  $\Delta = 1/f_{\text{ГР}}$ . На практиці  $f_{\text{ГР}}$  часто невідома. В цьому випадку величину  $\Delta$  можна орієнтовно оцінити як [1]

$$\Delta = \frac{T_{\min}}{(5 \dots 10)},$$

де  $T_{\min}$  – очікувана мінімальна постійна часу об'єкту.

Вибір оптимальних вирішальних правил визначається перш за все доступною апіорною і апостеріорною інформацією. Доступною апостеріорною інформацією вважатимемо коефіцієнти розкладу ІПФ, що тільки ідентифікуються в ряд по функціях Уолша  $\{a_j\}$ . У реальних системах автоматичного керування ГТД доступна й інша інформація, яка залежить від конкретної системи. Позначимо необхідну у будь-якому випадку апіорну інформацію через алфавіт ситуацій  $\{D_i\}$ . Розглянемо різні варіанти розпізнавання ситуації в ГТД залежно від об'єму апіорної інформації.

Проаналізуємо випадок, коли відомі лише напрями зміни величин коефіцієнтів розкладання ІПФ при переході від нормальної роботи до помпажу. Тоді можливо застосування достатньо простої процедури діагностування, заснованої на аналізі знаку відхилення контрольованого параметра від номінального значення. При цьому для підвищення надійності діагностування доцільно виділяти інтервали  $(a_j^0 - \varepsilon_j, a_j^0 + \varepsilon_j)$  для кожного коефіцієнта розкладання  $a_j$  з номінальним значенням  $a_j^0$  і похибкою визначення  $\varepsilon_j$ .

Закодуємо випадок  $a_j \in (a_j^0 - \varepsilon_j, a_j^0 + \varepsilon_j)$  величиною 0, випадок  $a_j < a_j^0 - \varepsilon_j$  величиною -1, а випадок  $a_j > a_j^0 + \varepsilon_j$  величиною +1.

Інформація про поведінку коефіцієнтів розкладання в різних ситуаціях зводиться в таблицю ситуацій, в якій стовпці відповідають всім можливим ситуаціям, а рядки – всім коефіцієнтам розкладання. У відповідних клітках за приведеним правилом проставляються 0 +1 або -1. У разі, коли відомі значення коефіцієнтів розкладу у всіх ситуаціях, кожен діагностований стан системи можна представити у вигляді  $(n+1)$ -мірного вектора  $A$  з компонентами  $\{a_{j0}, a_{j1}, \dots, a_{jn}\}$ .

Задача класифікації ситуації  $\{D_i\}$  в цьому випа-

дку формулюється таким чином: потрібно віднести сукупність коефіцієнтів розкладання, що пред'являється, до однієї з заздалегідь встановлених ситуацій.

У разі, коли є достатня статистична інформація: апіорна ймовірність ситуацій  $P(D_i)$  умовна густина значень ознак  $f(a_j/D_i)$  причому ці розподіли одномодальні, доцільно застосування статистичних методів розпізнавання, наприклад статистичного методу мінімального ризику [1]

**Алгоритм і пристрій ідентифікації помпажу.** Приймаючи, в якості діагностичної ознаки помпажу коефіцієнти розкладу в ряд по функціях Уолша досліджуваного процесу на фіксованому інтервалі можна сформулювати алгоритм ідентифікації у вигляді:

1. Вводиться виміряне значення процесу  $u_j^*$ .
2. За цим значенням і  $(2^n-1)$  попереднім значенням процесу обчислюються поточні значення коефіцієнтів розкладу по виразу (5).
3. Розпізнавання помпажу здійснюється шляхом порівняння поточних коефіцієнтів розкладу з еталонними.

Ситуація вважається виявленою, якщо модуль різниці між поточними значеннями коефіцієнтів розкладання і відповідними еталонними значеннями не перевершує заданої величини – порогу розпізнавання, визначуваного на етапі формування ознак по розкиду коефіцієнтів розкладання для різних реалізацій процесів в одній ситуації і погрішностям ідентифікації.

На рис. 3 показана функціональна схема пристрою ідентифікації помпажу, який реалізує приведений алгоритм.

Для обчислення функцій Уолша  $W_i(t)$  у момент часу  $t \in [0, 1]$  можна скористатися виразом [5]:

$$W_i(t) = \begin{cases} +1, & \text{если } S_{i1} \oplus S_{i2} \oplus \dots \oplus S_{ik} = 0, \\ -1, & \text{если } S_{i1} \oplus S_{i2} \oplus \dots \oplus S_{ik} = 1, \end{cases}$$

де  $S_{it}$  – розряди, в яких при двійковому розкладі і та  $t$  одночасно знаходяться одиниці; знак  $\oplus$  означає складання по модулю 2.

Процедура обчислення коефіцієнтів Уолша – Фур'є досить просто реалізується на елементах цифрової техніки [5].

Тут обчислюються коефіцієнти розкладання  $a_i$  знакопостійного сигналу

$$f^*(t) = f(t) + C \geq 0,$$

де  $C = \text{const}$ , які для  $i \neq 0$  є коефіцієнтами Уолша – Фур'є сигналу (функції)  $f(t)$ .

Визначення перехідної функції за відомої моделі не викликає ускладнень і за попереднім вира-

зом будується простий та ефективний алгоритм визначення коефіцієнтів розкладу  $a_i^*(P)$  при заданому векторі параметрів моделі  $P$ . Параметри моделі, що відповідають ПФ з коефіцієнтами розкладу  $a_i$ , визначаються з умови мінімізації квадратичного функціоналу:

$$Q(P) = \sum_{i=0}^n [a_i - a_i(P)]^2.$$

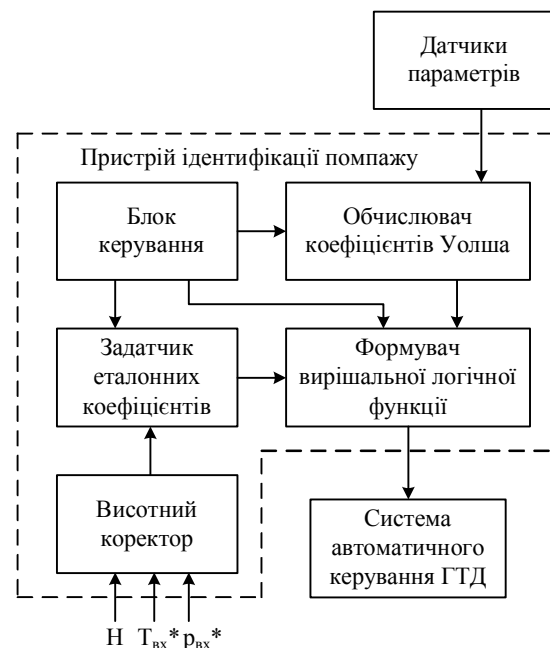


Рис. 3. Пристрій ідентифікації помпажу

Для визначення мінімального значення  $Q(P)$  можна скористатися одним з прямих методів пошуку екстремуму. Початкове наближення  $P^0$  можна отримати за допомогою методів естимації за ПФ, відновленої по заданим коефіцієнтам розкладу  $a_i$ . Ітераційний цикл пошуку мінімуму розпочинається із систематичного пошуку по  $r$  ортогональним напрямкам ( $r$  – розмірність вектора  $P$ ) почерговою зміною компоненти  $P_i$  вектора на величину пробного кроку  $\pm h$ . Який в процесі пошуку може зменшуватися. Якщо під час ітерації отримано покращення функціоналу  $Q(P)$ , то визначається напрямком спуску у вигляді вектора-градієнта  $G$ , величина компонентів  $q_i$  якого береться пропорційною ступеню покращення функціоналу у відповідних напрямках.

## Висновок

В результаті проведених досліджень показана можливість застосування методу ідентифікації заснованого на ортогональному розкладанні імпульсної перехідної функції в ряд по функціях Уолша.

Розроблений алгоритм і схема пристрою ідентифікації помпажу, в якому як діагностична ознака прийняті коефіцієнти розкладу по функціях Уолша. Формування класів проводиться на основі аналізу великої кількості експериментальних кривих зміни параметрів робочого процесу при помпажу і нормальній роботі двигуна.

### Література

1. Автоматический контроль и диагностика систем управления силовыми установками летательных аппаратов [Текст] / В.И. Васильев [и др.]. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с.
2. Волянська, Л.Г. Методи і засоби підвищення газодинамічної стійкості компресорів газотурбінних двигунів [Текст]: моногр. / Л.Г. Волянська, В.В. Панін, С. Гаюон. – К.: НАУ, 2005. – 200 с.
3. Многоуровневое управление динамическими объектами [Текст]: моногр. / В. И. Васильев [и др.]. – М.: Наука, 1987. – 309 с.
4. Панін, В.В. Аналіз методів побудови систем протипомпажного захисту авіаційних газотурбінних двигунів [Текст] / В.В. Панін, С.В. Єнчев // Інтелектуальні системи прийняття рішень і проблеми обчислювального інтелекту. ISDMCI'2010. – Херсон, 2010. – Т.2. – С. 502-505.
5. Панін, В.В. Использование ортогональных разложений в задачах идентификации помпажных явлений в компрессорах авиационных газотурбинных двигателей [Текст] / В.В. Панин, С. В. Енчев, Л.Г. Волянская // Авиационно-космическая техника и технология. – 2010. – № 8(75). – С. 112-116.
6. Панін, В.В. Метод ідентифікації помпажа в компресорах авіаційних газотурбінних двигателів з застосуванням функцій Уолша [Текст] / В.В. Панін, С.В. Єнчев, О.В. Попфалуши // Матеріали МНТК «АВІА-2011». – Т.ІІ. – К.: НАУ. – 2011. – С. 16.42-16.45.

Поступила в редакцию 31.05.2013, рассмотрена на редколлегии 17.06.2013

**Рецензент:** д-р техн. наук, проф., декан механіко-енергетичного факультету О.В. Самков, Національний авіаційний університет, Київ.

### АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СИСТЕМЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ПРЕДПОМПАЖНЫХ (ПОМПАЖНЫХ) ЯВЛЕНИЙ В КОМПРЕССОРАХ АВИАЦИОННЫХ ГТД

**В.В. Панин, С.В. Енчев, О.В. Савчин**

В статье рассматривается проблема идентификации помпажных явлений в компрессорах авиационных газотурбинных двигателей. Обосновывается применимость метода распознавания помпажа с помощью разложения импульсной переходной функции двигателя в ряд ортонормированных функций Уолша. В качестве диагностического признака помпажа приняты коэффициенты разложения Уолша – Фурье. Разработаны алгоритм и функциональная схема устройства идентификации помпажа. Формирование классов проводится на основе анализа большого количества экспериментальных кривых изменения параметров рабочего процесса при помпаже и нормальной работе двигателя.

**Ключевые слова:** помпаж, авиационный газотурбинный двигатель, устройство идентификации, функции Уолша, ортогональное разложение, алгоритм.

### ALGORITHMIC MAINTENANCE OF A SYSTEM OF IDENTIFICATION PRESURGE (OF SURGE) PHENOMENA IN COMPRESSORS AVIATION GTE

**V.V. Panin, S.V. Enchev, O.V. Savchin**

The problem of identification of surge phenomena in compressors of aviation gas turbine engines. Substantiates the applicability of the method for detecting surge by expanding the impulse response functions of the engine in a series of orthonormal functions Walsh. As a diagnostic sign of surging taken coefficients Walsh - Fourier series. The algorithm and a functional diagram of an identification device surge. Formation of classes is based on the analysis of a large number of experimental curves of workflow options for surging and normal operation of the engine.

**Keywords:** surge, aviation gas turbine engine, the device identification, function Walsh, orthogonal decomposition, algorithm.

**Панін Владислав Вадимович** – д-р техн. наук, проф., ректор Київської державної академії водного транспорту імені гетьмана П. Сагайдачного, Київ, Україна, e-mail: academy@maritime.kiev.ua.

**Єнчев Сергій Васильович** – канд. техн. наук, доц., доц. каф. автоматизації та енергоменеджменту Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: esw@ukr.net.

**Савчин Ольга Вікторівна** – аспірант кафедри автоматизації та енергоменеджменту Аерокосмічного інституту Національного авіаційного університету, Київ, Україна, e-mail: olga.v.popfalushi@gmail.com.