

9. Юрчак О.П. Дослідження та оцінка побудови тренажерів засобами системи Authorware / О.П. Юрчак О.П. // Сучасні технології підготовки персоналу та управління кадрами : зб. наук. пр. – К., 2007. – Спеціальний випуск. – С. 106-111.
10. Самойлов В.Д. Модель коммутационной структуры подстанции / В.Д. Самойлов, О.П. Нетлюх // Электронное моделирование. – К., ИПМЭ им. Г.Е. Пухова НАНУ, 2010. – №1. – С. 77-88.
11. Самойлов В.Д. Сценарные структуры ситуационных тренажеров / В.Д. Самойлов, О.П. Нетлюх // Сучасні технології підготовки персоналу та управління кадрами : зб. наук. пр. – К., 2009. – Вип. 52. – С. 130-139.

Поступила 26.09.2016 р.

УДК 621.19:004.942(043.2)

О. В Дергунов, Ю.В. Куц, д.т.н., Л.М. Щербак, д.т.н., НАУ, Київ

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ ПЕРЕТВОРЕННЯ ГІЛЬБЕРТА-ХУАНГА ДЛЯ АНАЛІЗУ БАГАТОКОМПОНЕНТНИХ ЦИКЛІЧНИХ СИГНАЛІВ

Розглянуто застосування перетворення Гільберта-Хуанга для аналізу багатокомпонентних циклічних сигналів. Розроблене програмно-алгоритмічне забезпечення методу Гільберта-Хуанга може бути використано для широкого кола сигналів в енергетиці та неруйнівному контролі.

Ключові слова: перетворення Гільберта-Хуанга, емпірична модава декомпозиція, аналіз сигналів.

Рассмотрено использование преобразования Гильберта-Хуанга для анализа многокомпонентных циклических сигналов. Разработанное программно-алгоритмическое обеспечение метода Гильберта-Хуанга может быть использовано для широкого круга задач в энергетике и неразрушающем контроле.

Ключевые слова: преобразование Гильберта-Хуанга, эмпирическая модовая декомпозиция, анализ сигналов.

Application of Hilbert-Huang transform to analyze the multi-cyclic signals is presented. The developed software and algorithmic support of Hilbert-Huang method can be used for a wide range of signals in the energy analysis and non-destructive testing.

Keywords: Hilbert-Huang transform, empirical mode decomposition, signal analysis.

Вступ. Циклічні процеси різної фізичної природи (електричні, оптичні, акустичні тощо) породжують відповідні інформаційні циклічні сигнали, характеристики і параметри яких є об'єктами досліджень систем вимірювань

і неруйнівного контролю. Аргументами циклічних сигналів можуть бути час, частота, а також фізико-механічні характеристики та параметри контрольованих матеріалів та об'єктів. Фазові характеристики циклічних сигналів мають функціональну залежність від аргументів значно складнішу за лінійну, яка має місце для гармонічних сигналів [1,2]. Тому для аналізу циклічних сигналів пропонується більш складний математичний апарат у порівнянні з перетворенням Фур'є.

Аналіз публікацій з використання сучасних методів обчислювальної математики, інформаційних технологій опрацювання даних вимірювань дав можливість обґрунтувати перетворення Гільберта-Хуанга [3] для дослідження циклічних сигналів в задачах неруйнівного контролю(НК).

Постановка завдання. Розробити алгоритмічно-програмне забезпечення метода Гільберта-Хуанга для аналізу широкого кола циклічних сигналів НК, включаючи багатокомпонентні циклічні сигнали, у присутності адитивних гауссових завад.

Основні результати. Особливістю перетворення Гільберта-Хуанга (ПГХ) є те, що базис цього перетворення конструюється з експериментальних даних, що дозволяє більш повно врахувати такі особливості досліджуваного сигналу одночасно в часовій і частотній області як циклічні компоненти, тренди, шуми тощо. Це перетворення має ряд важливи властивостей – ортогональність, повнота, локальність, адитивність, хоча й перші дві властивості не мають строгого доведення.

ПГТ складається з двох частин: емпіричної модової декомпозиції та спектрального Гільберт-аналізу [3, 4, 5]. Цей метод є потенційно придатним для аналізу нелінійних та нестационарних даних, особливо для представлення у вигляді частотно-енергетично-часового спектру.

Емпірична модова декомпозиція. Основою виділення циклічних компонент є етап ПГХ який дістав назву «Емпірична модова декомпозиція» (empirical mode decomposition, EMD). Його сутність полягає в адаптивному алгоритмі представлення нестационарних даних у вигляді суми власних модових функцій (intrinsic mode functions). Власну модову функцію розглядають як циклічну, що має нульовий середній рівень та характеризується наступною властивістю: кількість нуль-переходів такої функції дорівнює кількості екстремумів або відрізняється не більше як на одиницю.

Нижче наведено поетапний опис реалізації методики виділення циклічних компонент створеної на основі методу емпіричної модової декомпозиції. Схематичне зображення послідовності операцій EMD наведена на рис.1.

Вхідними даними є реалізація сигналу НК $U[j]$, $j=1\dots J$, де J – обсяг вибірки. До вибірки $U[j]$ застосовують метод виділення циклічних компонент (власних модових функцій). Розкладання виконують наступним чином.

1. Знаходять першу власну модову функцію – першу циклічну функцію яка має найбільшу частоту серед інших компонент розкладу.

1.1. Для досліджуваної вибірки $U[j]$ знаходять локальні екстремуми – максимуми і мінімуми, та проводять їх інтерполяцію кубічними сплайнами. Отримані криві – це верхня та нижня обвідні вибірки. Для отриманих в такий спосіб обвідних знаходять криву середнього $m^{(1)}[j]$. Різниця між $U[j]$ і кривою $m^{(1)}[j]$ – це прообраз першої власної модової функції:

$$h^{(1)}[j] = U[j] - m^{(1)}[j]. \quad (1)$$

Операцію 1.1 далі застосовують до $h^{(1)}[j]$ і т.д. тобто отримують послідовність інших прообразів власних модових функцій.

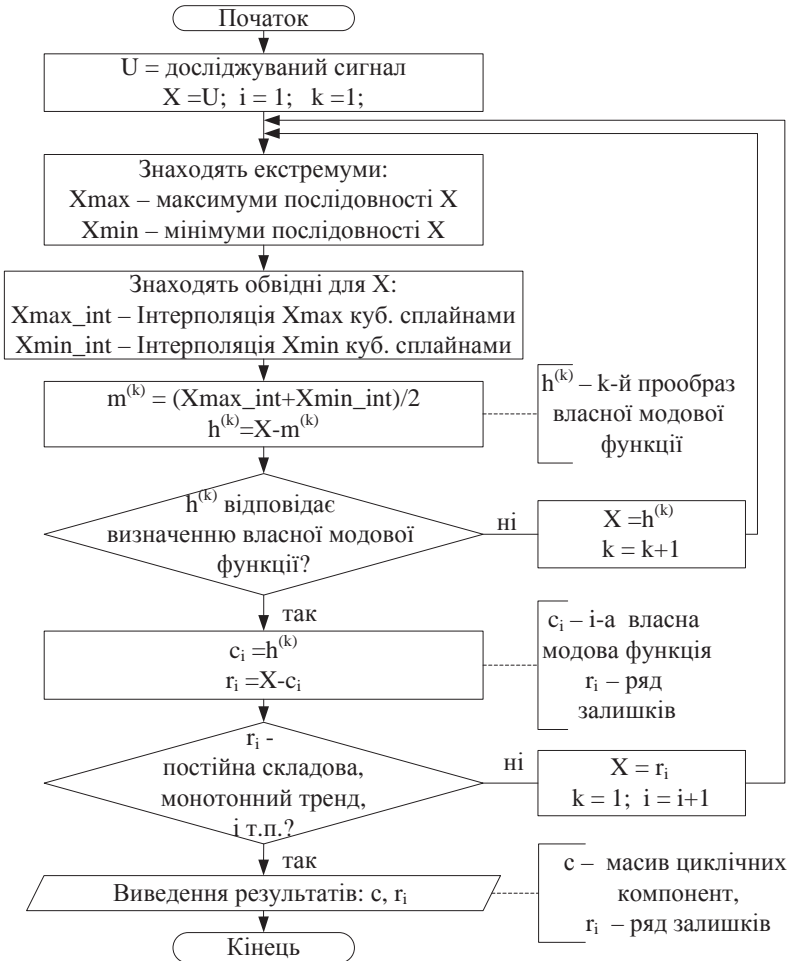


Рис. 1. Узагальнена структура алгоритму, що реалізує EMD метод виділення циклічних компонент з досліджуваної послідовності

1.2. Операцію 1.1 виконують k разів до моменту, коли прообраз $h^{(k)}[j]$ відповідатиме визначенню власної модової функції, що дозволяє прийняти його за першу власну модову функцію $c_1[j]$:

$$c_1[j] = h^{(k)}[j]. \quad (2)$$

В прийнятому позначенні $c_i[j]$ – i -та власна модова функція, а $h^{(k)}[j]$ – позначення прообразу власної модової функції на k -му кроці її обчислення.

2. Знаходять ряд залишків як різницю між сигнальною вибіркою і модовою функцією:

$$r_1[j] = U[j] - c_1[j]. \quad (3)$$

3. Циклічно виконують процедури 1.1 та 1.2 використовуючи отриманий ряд $r_1[j]$ в якості вхідних даних замість $U[j]$.

4. Ітераційний процес зупиняють коли ряд залишків може бути описаний однією з наступних математичних моделей: постійною складовою, монотонною зростаючою або спадною функцією (монотонним трендом), функцією з одним екстремумом.

В результаті досліджуваній сигнал представляється сумою власних модових функцій (циклічних компонент) та кінцевим залишком

$$U[j] = \sum_{i=1}^{n-1} c_i[j] + r_n[j] \quad (4)$$

5. Відображають компоненти $c_i[j]$ у вигляді графіків та числових значень.

Отримані циклічні компоненти не можна вважати первинними компонентами з яких складається сигнал, особливо у випадках дослідження сигналів з різними типами модуляції чи сигналів отриманих при дослідженні нестационарних процесів чи динамічних режимів розвитку процесів. Такі компоненти є проміжним етапом перетворення, вони окремо не відображають всієї інформації про досліджуваний процес. Саме тому розглядати етапи ПГХ як два окремих та незалежних методи некоректно. Основним завданням ЕМД є виділення з досліджуваної послідовності циклічних компонент, які представляються такими функціями, до яких можна застосувати перетворення Гільберта (ПГ), а вже отримана з ПГ інформація зводиться в цілісний спектр який більш повно відображає досліджуваний процес в цілому і допускає певну фізичну інтерпретацію.

Спектральний Гільберт-аналіз. Отримані циклічні компоненти задовольняють необхідні умови для застосування до них ПГ та подальшого дослідження $U[j]$ в частотно-часовій області. Таке аналіз є сутністю другого етапу ПГХ та називається Гільберт-аналізом [6]. Останній виконується в два етапа: дослідження окремих циклічних компонент, та знаходження спектра Гільберта.

1 етап – дослідження окремих компонент. Алгоритм дослідження окремих компонент є простим та зводиться до таких кроків:

1. До кожної з отриманих циклічних компонент застосовують дискретне

перетворення Гільберта та отримують їх відповідні гільберт-образи

$$\hat{c}_i[j] = \mathbf{Hd}(c_i[j]), \quad (5)$$

де \mathbf{Hd} – оператор дискретного перетворення Гільберта.

2. За послідовностями $c_i[j]$ та $\hat{c}_i[j]$ обчислюють амплітудну та дробову частину дискретної фазової характеристик кожної циклічної компоненти

$$C_i[j] = \sqrt{c_i^2[j] + \hat{c}_i^2[j]}, \quad (6)$$

$$\varphi_{c_i}[j] = \arctg\left(\frac{\hat{c}_i[j]}{c_i[j]}\right) + \frac{\pi}{2} \{2 - \text{sign}(\hat{c}_i[j]) \cdot (1 + \text{sign}(c_i[j]))\}, \quad (7)$$

де $\text{sign}[\]$ – знакова функція.

3. Отримані дробові частини дискретних фазових характеристик $\varphi_{c_i}[j]$ розгортають оператором $\mathbf{K}(\varphi_{c_i}[j])$. Останній визначає стрибки послідовності $\varphi_{c_i}[j]$ між її суміжними значеннями, що перевищують задану граничну величину, наприклад π , і зміщує наступні значення $\varphi_{c_i}[j]$ на 2π . Результатом цієї операції є дискретні фазові характеристики компонент $c_i[j]$

$$\Phi_{c_i}[j] = \mathbf{K}(\varphi_{c_i}[j]). \quad (8)$$

4. З отриманих дискретних фазових характеристик знаходять дискретні частотні характеристики кожної з компонент

$$\mathcal{C}_{c_i}[j] = \frac{\Phi_{c_i}[j] - \Phi_{c_i}[j-1]}{2\pi T_d}, \quad (9)$$

де T_d – період дискретизації досліджуваного сигналу.

5. Виводять отримані дискретні характеристики $\Phi_{c_i}[j]$, $C_i[j]$, $\mathcal{C}_{c_i}[j]$ у графічній та табличній формах.

2 етап – визначення спектра Гільберта. Отримана в результаті попередніх етапів інформація представлена значною кількістю графіків і числових таблиць, є складною для сприйняття та інтерпретації в такому вигляді. Для отримання цілісного представлення результатів дослідження та покращення їх сприйняття необхідно звести усі отримані характеристики в один графічний об'єкт – спектр Гільберта [3]. Спектр Гільберта $\mathbf{G}(t[j], \mathcal{C}_{c_i}[j], C_i[j])$ – це тривимірний графік, що відображає розподіл значень амплітудної характеристики за частотою та часом. Спектр Гільберта є зручним способом спільного відображення амплітудних та частотних характеристик компонент нестационарних процесів для одночасного їх аналізу в часовій та частотній областях. Він дозволяє прослідкувати зміну амплітуди певної частоти спектру сигналу в часі. Як математичний об'єкт

спектр Гільберта представляє собою матрицю \mathbf{G} розмірності $Fr \times J$, де Fr – кількість рядків матриці що дорівнює розмаху частот (різниця максимального та мінімального значення $\mathcal{C}_i[j]$ для будь-яких значень i), J – кількість стовбців матриці, що дорівнює обсягу реалізації досліджуваного сигналу. Алгоритм розрахунку матриці \mathbf{G} полягає в ітераційній процедурі, яка представлена блок-схемою на рис. 2.

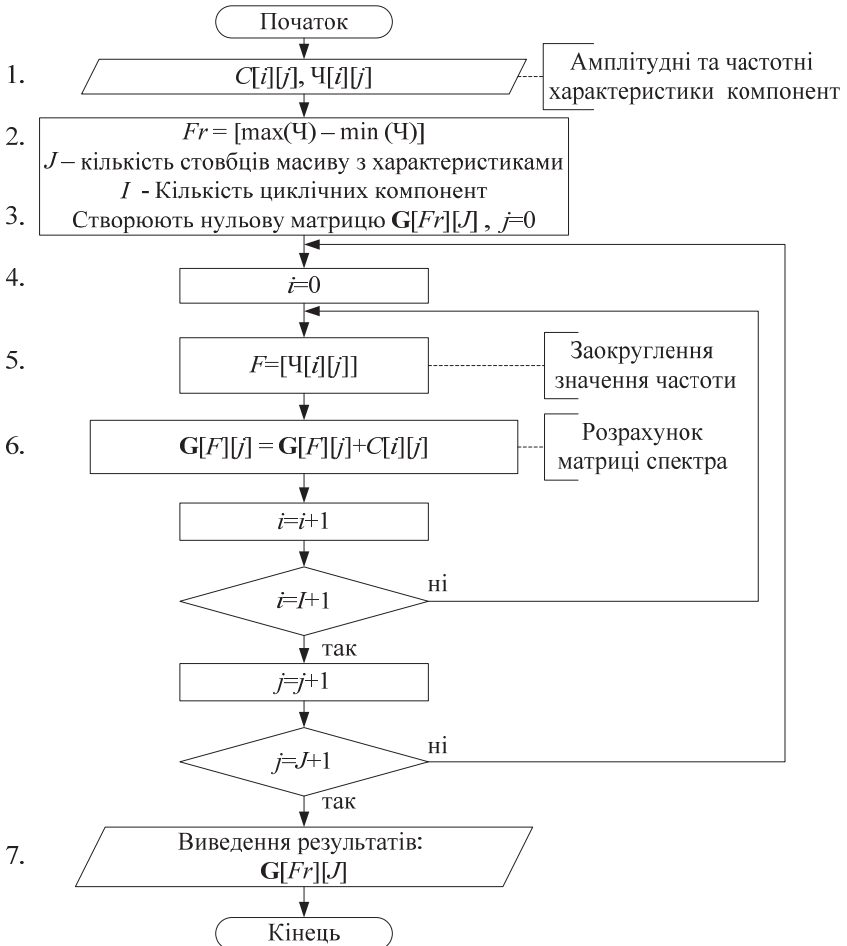


Рис. 2. Узагальнений алгоритм визначення спектра Гільберта

Цей алгоритм передбачає:

1. Використання масивів амплітудних та частотних характеристик усіх циклічних компонент в якості вхідних даних.

2. Визначення розмаху частот Fr для всіх вхідних компонент.
3. Створення масиву – нульової матриці \mathbf{G} розміром $Fr \times J$.
4. Організацію ітераційного процесу заповнення масиву \mathbf{G} .
5. Визначення частоти i -ї компоненти в j -й момент часу шляхом заокруглення значення частотної характеристики з масиву $\mathcal{C}_i[j]$.

6. Заповнення комірки масиву \mathbf{G} з координатами $[F][j]$ шляхом додавання до існуючого значення комірки $\mathbf{G}[F][j]$ значення амплітудної характеристики i -ї компоненти в j -й момент часу.

7. Виведення результату – масиву \mathbf{G} .

В результаті реалізації алгоритму отримують матрицю \mathbf{G} , номер рядка в якій відповідає частоті, номер стовпця – моменту часу, а елемент матриці – це відповідна амплітуда сигналу на певній частоті в певний момент часу. Зазвичай амплітуду на спектрограмі відображають кольором.

Для ілюстрації можливостей застосування метода перетворення Гільберта-Хуанга та розробленого алгоритму його реалізації проведені модельні дослідження на прикладі аналізу сигналів різних типів.

Приклад 1. Тестовий сигнал у вигляді полігармонічного сигналу виду:

$$U1[j] = A_1 \cdot \sin(2\pi \cdot f_1 \cdot t[j]) + A_2 \cdot \sin(2\pi \cdot f_2 \cdot t[j]), \quad (10)$$

де $t[j]$ – елемент часового вектору: $t[j]=j \cdot T_d, j=0..10000, A_1=A_2=1\text{В}, f_1=10\text{Гц}, f_2=20\text{Гц}$.

Після застосування методу ПГХ тестовий сигнал було розкладено на 8 циклічних компонент, 2 з яких мають частоти 10 та 20 Гц відповідно, а інші мають допоміжний характер і нехтовно малу амплітуду ($\approx 10^{-3}$ В). В результаті Гільберт-аналізу отримано спектр Гільберта сигналу, який представлено на рис. 3.

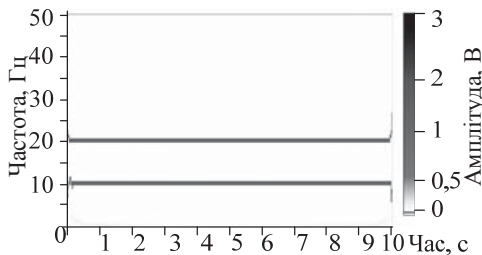


Рис. 3. Спектр Гільберта тестового сигналу $U1[j]$

На спектрограмі (рис. 3) по осі ординат розташовані значення частот компонент сигналу, по осі абсцис – час, а миттєві значення амплітуди компонент відображаються інтенсивністю чорного (або палітрою кольорів).

Як очікувалось складовим з частотами 10 та 20 Гц на спектрограмі відповідають прямі лінії, що свідчить про їх незмінність в часі.

Приклад 2. Суміш сигналу (10) з прикладу 1 та гауссівського шуму з нульовим математичним сподіванням та дисперсією σ^2 . За відношення

сигнал/шум для кожної компоненти прийнято $\eta = A_i^2 / \sigma^2 = 1$, A_i – амплітуда i -тої компоненти сигналу. В результаті Гільберт-аналізу суміші отримано спектр Гільберта фрагмент якого представлений на рис. 4.

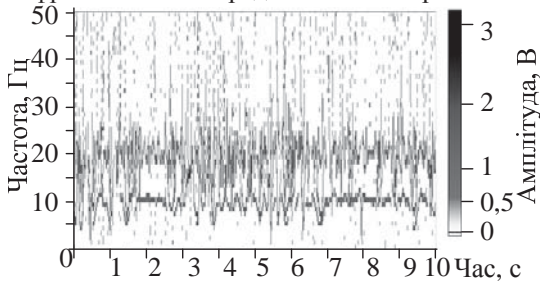


Рис. 4. Фрагмент спектра Гільберта суміші тестового сигналу $U1[j]$ та гауссового шуму

На відміну від попереднього випадку, в спектрі суміші наявна значна кількість низькоамплітудних компонент, викликаних шумовою компонентою. Інформація про корисний сигнал спотворена, проте ідентифікувати наявність двох компонент частотою 10 та 20 Гц ще можливо. Зі спектрограми також випливає, що низькоамплітудні компоненти розподілені у всьому частотному діапазоні аналізу.

Висновки

У статті проаналізовано метод перетворення Гільберта-Хуанга, який може бути рекомендований як інструмент первинного аналізу і дослідження нестационарних сигналів неруйнівного контролю в умовах значної апріорної невизначеності одночасно в часовій та частотній областях.

Розроблене алгоритмічно-програмне забезпечення методу перетворення Гільберта-Хуанга може бути використано для виявлення та виділення циклічних компонент досліджуваних сигналів, первинного аналізу нестационарних сигналів неруйнівного контролю, наприклад сигналів віброакустичної діагностики технічних об'єктів. Крім цього реалізація цього методу аналізу дозволить виявляти наявність радіоімпульсів на фоні завад, аналізувати параметри фазової, амплітудної та частотної модуляції в суміші сигналу та шуму за відношення сигнал/шум близькому до одиниці, розділяти інформаційну і шумову складові в аналізованих сигналах.

Досліджений метод аналізу не може бути рекомендований для прецизійного визначення параметрів стаціонарних сигналів з апріорно відомими моделями, проте він є незамінним під час первинного досліджень процесів, для обґрунтування моделі сигналів та планування наступних етапів їх дослідження.

1. *Вакман В.Е.* Об определении понятия амплитуды, фазы и мгновенной частоты сигнала. // Радиотехника и электроника. – 1972. – Т.17, №5. – С.972–978.

2. Куц Ю.В., Щербак Л.М. Статистична фазометрія. Наукова монографія. – Тернопіль: ТДТУ ім. І. Пулюя, 2009. – 384 с.
3. Norden E. Huang. Hilbert-Huang transform and its Applications// World Scientific Publishing Co. Pte.Ltd, 2005 – 324p.
4. Patrick Flandrin. On Empirical mode decomposition and its algorithms// IEEE-EURASIP Workshop on Nonlinear Signal and Image Processing NSIP-03, Grado (I), 2003 – p. 8-87.
5. Dergunov O. V., Empirical mode decomposition in signal analysis / Dergunov O. V., Trots V. M., Kuts Y. V., Shcherbak L. M. // Aviation in the XXI-st century 2010, (Kyiv, 21-23 September 2010) [etc.]. – К.: НАУ, 2010. – P. 12.21 – 12.26.
6. Al. Dergunov. Hilbert-Huang transform in signal analysis / O. Bliznuk., Al. Dergunov, Y. Kuts., A. Shekero., S. Shengur // «Defectoscopy'11»: proc. XXVI International conference: – Sofia: 2011. – P. 25-27.
7. Держунов О.В. Перспективи використання перетворення Гільберта-хуанга в задачах неруйнівного контролю / О.В. Держунов, Ю.В. Куц // Неруйнівний контроль та технічна діагностика: 7-а Національна НТК, 20-23 листопада 2012 р.: тези доп. – Київ, 2012.– С. 243 – 245

Поступила 29.09.2016 р.

УДК 519:2+512.643

В.А. Готович, О.Б. Назаревич, к.т.н., Г.В. Шимчук, ТДТУ, м. Тернопіль
Т.Л. Щербак, к.т.н., НАУ, м. Київ

СТАТИСТИЧНИЙ АНАЛІЗ ПРОЦЕСУ ГАЗОСПОЖИВАННЯ МІСТА НА РІЧНОМУ ІНТЕРВАЛІ СПОСТЕРЕЖЕННЯ

Abstract. Reasonable mathematical model of the city gas consumption at the annual observation range in the form of piece-periodic random process. On the basis of the method "Caterpillar-SSA» conducted a statistical analysis of a number of annual gas consumption of the city and the allocation of its main components: the annual trend, periodic components and the implementation of a random process.

Вступ. В Україні, як і в інших країнах світу науково-технічні проблеми використання енергоносіїв в умовах економічної кризи на сьогодні набули особливої актуальності. Це знайшло своє відображення у значній кількості публікацій, де наведені результати досліджень проблем газоспоживання, в тому числі [1-3].

Але в більшості робіт розглядається загальний підхід статистичного аналізу процесу газоспоживання, які в певній мірі не адоптовані до конкретних задач досліджень, а саме не вказується часовий інтервал спостережень (вимірювань) значень процесу газоспоживання, похибки вимірювань, об'єм спожитого газу та інші.

В даній роботі наведені результати конкретного випадку стастичного