

## КОМП'ЮТЕРНІ НАУКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ

УДК 005.53:165.412: 53.082.1:624.2/8

DOI: 10.30977/BUL.2219-5548.2021.95.0.229

МЕТОД, МОДЕЛІ ТА ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ПРИЙНЯТТЯ  
РІШЕНЬ ПРО СТАН ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ В УМОВАХ НЕСТАЦІОНАРНИХ  
ВХІДНИХ ВПЛИВІВПолярус О. В., Лебединський А. В., Чепусенко Є. О.  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет

*Анотація.* У світі спостерігається значне зростання обсягу вимірювальної інформації на складних та великих технічних об'єктах, прикладом яких є мостові споруди. Прийняття рішення щодо стану цих об'єктів в умовах нестаціонарних вхідних впливів є складним завданням. У статті запропоновано здійснювати перехід від одноканальної обробки інформації до багатоканальної. В кожному каналі відбувається обробка однієї з мод Гільберта–Хуанга, на які розкладається кожна реалізація нестаціонарного сигналу. Показано, що найчастіше вистачає трьох перших мод розкладання, які в більшості випадків створюють стаціонарний процес. Якщо якась мода виявляється нестаціонарною, можливе її розкладання по зазначених модах. Кінцеве рішення за статистичними критеріями приймається не за реалізаціями, як це традиційно здійснюється, а за модами Гільберта–Хуанга.

**Ключові слова:** вимірювальна інформація, нестаціонарні вхідні впливи, моди Гільберта–Хуанга, прийняття рішення.

**Вступ**

Основне призначення багатьох інформаційних систем – забезпечення належною інформацією тих систем, що здатні приймати рішення на керування технічним об'єктом (управлінські рішення) або про працездатність такого об'єкта в різних режимах роботи (діагностичні рішення). Для цього в сучасних умовах використовуються інтелектуальні інформаційні технології (ІТ), які, згідно з [1], являють собою прийоми, способи та методи виконання функцій збирання, зберігання, оброблення, передавання та використання знань. Наприклад, в останні роки в окремих країнах світу (Китай, Південна Корея, США, Японія) активно впроваджується в життя концепція “розумних” мостів [2], які мають інтерфейс між фізичною мостовою спорудою (МС) та її цифровим близнюком. Інформація для останнього збирається з великої кількості датчиків, що встановлюють у різних місцях МС, причому такі датчики є, як правило, бездротовими, як це зроблено, зокрема, на нещодавно побудованих мостах в Південній Кореї [2]. Із плином часу достовірність інформації від датчиків знижується внаслідок погіршення контактів між датчиками і мостами та з багатьох інших причин. Звідси з'являється тенденція використання дистанційних методів вимірювання необхідних параметрів МС [3]. Датчики використовуються не тільки для збирання інформації, але і для

обміну інформацією між ними та автомобілями чи іншими транспортними засобами, що перетинають розумний міст. Як наслідок, створюється велика кількість інформації, яку навіть важко обробити за короткий час. Прийняття важливих рішень у таких умовах стає ускладненим. Якщо вхідні процеси, що вимірюються, є нестаціонарними, то тоді прийняття адекватного рішення взагалі є непростю проблемою. При вимірюванні прогинів МС, які виникають під дією випадкового транспортного потоку, майже завжди можна отримати нестаціонарний випадковий процес прогинів. Для вироблення адекватного рішення про стан МС потрібні нестандартні підходи до оброблення реалізацій нестаціонарних процесів і створення відповідних ІТ, що проаналізовано в даній статті.

**Аналіз публікацій**

Найбільш часто аналіз нестаціонарних процесів відбувається на інтервалах, де ці процеси є близькими до стаціонарних [4]. Від інтервалу до інтервалу змінюється розподіл щільності ймовірностей параметра, що вимірюється, а отримати зазначений розподіл можна протягом тривалого часу [5]. Класичний аналіз таких процесів може здійснюватися з використанням стаціонарної гіпотези і двоточкової оцінки кореляції [6], що добре виконується на відносно коротких інтервалах часу [7]. Теорію інформації та ентропію

Шеннона можна застосувати на практиці для нестационарних процесів, якщо відома часова залежність щільності ймовірностей досліджуваного параметра, яку можна отримати тільки на основі багатьох реалізацій [8] або на основі інформації, що міститься в часових вікнах [9]. Ентропія, що обчислюється у рухомому вікні даних, вимагає збіжності статистики [10], а іноді здійснюється розрахунок повного спектра ентропій Рені [11]. Ефекти короточасної кореляції усуваються за допомогою вікна Theiler [12]. Приховану періодичність нестационарного процесу можна визначити методом, що розроблено в [13]. Цей метод доцільно також використовувати в серверах автоматичного масштабування даних. Для побудови моделі прогнозування нестационарного випадкового процесу в [14] запропоновано визначити поведінку компонент часового ряду в декількох фазових просторах, що побудовані з використанням методу сингулярного спектрального аналізу.

Наведені методи є ефективними при аналізі нестационарних процесів на відносно коротких інтервалах часу, зокрема у вікнах обмеженої тривалості. Для прийняття статистичного рішення інформаційною системою потрібно, як правило, використовувати велику кількість реалізацій і вибирати метод аналізу, який добре узгоджується із процесом. Отже, в умовах обробки великого обсягу інформації необхідно мати ефективний метод аналізу нестационарних процесів, що слабо залежить від виду цього процесу. Такий метод запропоновано у статті.

### Мета і постановка завдання

Метою статті є обґрунтування науково-методичних основ створення інформаційної технології для прийняття рішення про стан мостової споруди в умовах використання реалізацій нестационарних випадкових процесів.

### Сутність методу

Критерієм для прийняття рішення про виведення мостової споруди з експлуатації може служити перевищення динамічного прогину МС наперед заданого порогу під дією стандартного навантаження. В загальному випадку зазначений поріг повинен бути функцією просторової координати МС. В [3] авторами розроблено метод дистанційного вимірювання прогинів МС одночасно в багатьох точках. Залежність прогину від часу  $\xi(t)$  в одній точці мосту є, як правило, нестационарним процесом, і реалізації цього процесу можуть містити "стрибки" прогинів,

що перевищують поріг. Виникає складне завдання перетворення нестационарного процесу у стаціонарний і збереження при цьому характерних ознак, за якими приймається безпечне рішення. Як показали дослідження авторів, перетворення Гільберта–Хуанга [15] в моди (компоненти) є прийнятними для неоднорідних випадкових полів та нестационарних випадкових процесів. Вимірювальні аспекти отримання мод Гільберта–Хуанга наведені в [16]. Головною перевагою такого розкладання є універсальність і адаптивність до будь-якого практично важливого процесу, причому ці моди є ортогональними.

Однак слід зазначити, що розкладання реалізації функції  $\xi(t)$  на окремі компоненти може призвести до зникнення стрибків прогинів, а якраз вони є ознаками наявності дефекту мосту. Результати декомпозиції реалізацій прогинів МС на моди Гільберта–Хуанга показані на рис. 1 та 2, які відносяться до різних видів навантаження фізичної моделі мостової споруди, що являла собою залізобетонну плиту довжиною 6 м, встановлену на опорах.

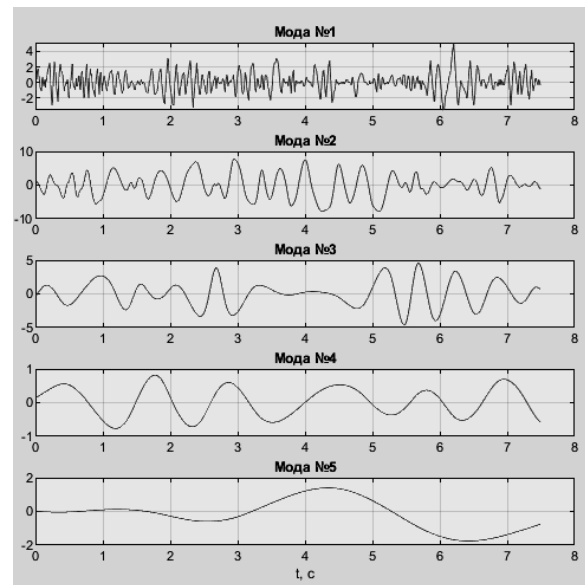


Рис. 1. Приклад декомпозиції однієї з реалізацій прогинів в одній точці МС на моди Гільберта–Хуанга при першому виді динамічного навантаження

Слід зазначити, що постійна складова розкладання Гільберта–Хуанга віднімається від значень прогинів мод  $i$ , як результат, значення цих параметрів можуть бути від'ємними, але для завдання виявлення стрибків прогинів це не має істотного значення. Подібні моди були отримані для різних умов експлуатації МС.

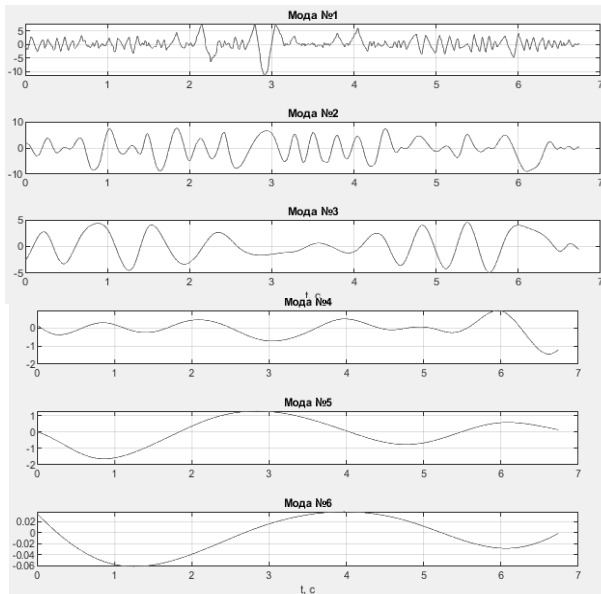


Рис. 2. Приклад декомпозиції однієї з реалізацій прогинів в одній точці МС на моди Гільберта–Хуанга при другому виді динамічного навантаження

Аналіз цих розподілів показує, що характерні особливості для виявлення стрибків прогинів зосереджені в перших модах Гільберта–Хуанга, кількість яких для розглянутих розподілів кольоровості становить приблизно 6. В модах з номером більше трьох стрибки прогинів не виявлені. Стрибки, що викликані дефектом мосту, спостерігаються на обох рисунках у всіх трьох перших модах. Аналогічні стрибки (провали) спостерігаються на всіх 100 реалізаціях прогинів у різних експериментах. Це може бути ознакою для виявлення дефекту мосту.

Однак в першій моді (рис. 1, 2) може існувати не тільки стрибок прогинів, що обумовлений дефектами мосту, але і стрибок, що викликаний іншими причинами. Останній можна ідентифікувати як такий, що збільшує ймовірність хибної тривоги. Позбавлення від хибних стрибків можна реалізувати, наприклад, такими методами: 1) перевіркою наявності стрибків у перших двох чи навіть трьох модах Гільберта–Хуанга в один і той же час; 2) застосування методу усереднення фоновго розподілу прогинів; 3) комплексне використання інших методів виявлення прогинів, що ґрунтуються на різних фізичних принципах.

Отже, запропонований метод рекомендує перехід від одноканальної до багатоканальної системи, причому в кожному каналі здійснюється статистичне оброблення однієї з реалізацій мод Гільберта–Хуанга. Як прави-

ло, для прийняття рішення про стан мостової споруди достатньо трьох мод. Якщо якась із трьох мод виявляється нестационарною, то її повторно можна розкласти на зазначені моди. Моделювання показує, що подвійне розкладання гарантує стаціонарність досліджуванних процесів по модах.

Аналогічний аналіз можна провести для просторового розподілу прогину або випадкового поля прогинів. Якщо МС має дефекти в різних точках, то в першій моді може бути декілька стрибків від таких дефектів.

Як впливає з рис. 1 та 2 та інших подібних рисунків, отриманих авторами під час моделювання, найбільш ефективним критерієм для виявлення дефекту МС є діапазон  $\Delta u$  значень прогинів уздовж вертикальної координати розподілу  $\xi(t)$  в першій та другій модах перетворення Гільберта–Хуанга. Оскільки значення параметрів прогинів у першій моді можуть бути від'ємними, діапазон  $\Delta u$  визначається максимальним значенням різниці між позитивним і від'ємним значеннями прогину реалізації випадкового процесу. Закони розподілу  $\Delta u$  для фону (рис. 2) для перших трьох мод, що отримані по 100 реалізаціях прогинів, показані на рис. 3. З рис. 3 випливає, що дисперсія флуктуацій параметрів прогинів для третьої моди значно більша, ніж для першої та другої, що приводить до висновку про доцільність використання першої і другої мод Гільберта–Хуанга для виявлення дефектів МС.

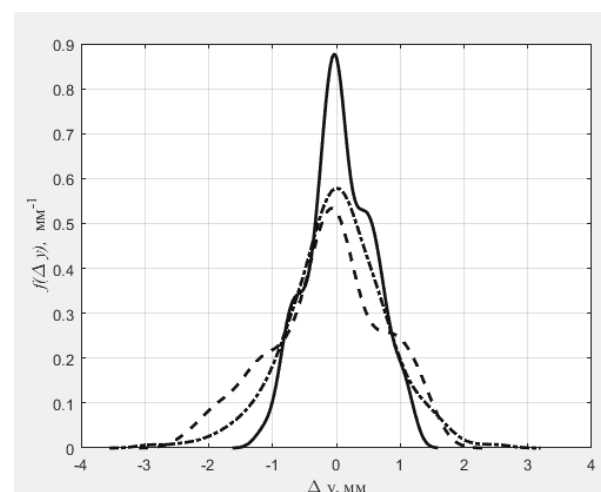


Рис. 3. Графік розподілу щільності ймовірності прогинів у вибраній точці мостової споруди для першої (суцільна лінія), другої (штрихова лінія) та третьої (штрихпунктирна лінія) мод

Критерієм виявлення дефекту МС може бути обраний поріг, перевищення якого стрибком означає позитивний результат. Такі висновки можна зробити лише у статистичному сенсі. Якщо процес випадкового прогину має велику дисперсію, то навіть при великому порозі можна вважати, що дефект МС по прогину може бути переплутаний із флуктуацією. Це випадок помилкового або хибного виявлення дефекту. Пороговий рівень істотно впливає на ймовірність правильного виявлення дефекту та хибної тривоги, і ці характеристики можуть відрізнятися для різних мостових споруд. Перевищення порогу прогину за статистичним критерієм Граббса [17] та рівнем значущості 0,01 означає наявність стрибка або дефекту МС.

Для визначення ймовірності виявлення дефекту  $D$  та хибної тривоги  $F$  встановлюється поріг стрибка  $\Delta y_0$  для прийняття рішення. У цьому випадку бажано використовувати формули, що є загальноприйнятими в математичній статистиці, а також у радіолокації [18]:

$$D = \int_{\Delta y_0}^{\infty} W_{c\phi}(\Delta y) d\Delta y, \quad (1)$$

$$F = \int_{\Delta y_0}^{\infty} W_{\phi}(\Delta y) d\Delta y, \quad (2)$$

де  $W_{\phi}(\Delta y)$  – закон розподілу прогинів за відсутності стрибків (фон), а  $W_{c\phi}(\Delta y)$  – закон розподілу прогинів разом зі стрибками (стрибки плюс фон).

Криві ймовірності виявлення дефекту МС за різних значень ймовірності хибної тривоги  $F$  показані на рис. 4. Уздовж горизонтальної координати відкладається відношення  $q$  середнього значення прогинів (стрибки прогину плюс фон)  $\Delta y_0$  до середнього значення модуля фону. Модуль потрібний для мод Гільберта–Хуанга, що мають від’ємні значення. Суцільна лінія відповідає  $F = 0,01$ , пунктирна лінія –  $F = 0,05$  і штрих-пунктирна лінія –  $F = 0,1$ . Вибравши пороговий рівень  $\Delta y_0$  для конкретного типу фону, можна забезпечити необхідні значення ймовірності виявлення дефекту МС  $D$  та хибної тривоги  $F$ . Тому проблема налаштування адаптивного порогу  $\Delta y_0$  є важливою та актуальною.

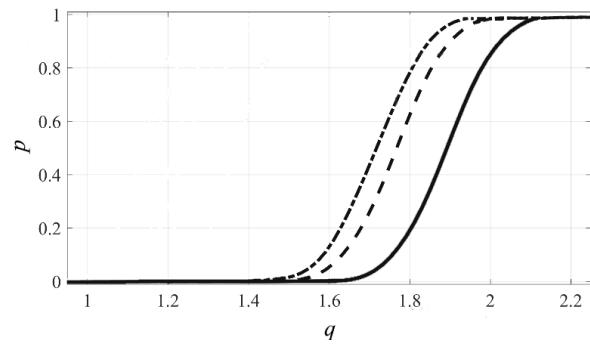


Рис. 4. Криві ймовірності виявлення дефекту МС за різних значень ймовірності хибної тривоги  $F$ :  $F = 0,01$  – суцільна лінія;  $F = 0,05$  – пунктирна лінія;  $F = 0,1$  – штрих-пунктирна лінія

З рис. 4 випливає, що для отримання однакових значень ймовірності виявлення дефектів потрібні невисокі відношення  $q$  середнього значення прогинів (стрибки плюс фон) до того ж значення від фону. В залежності від типу мосту воно складає приблизно 1,1 ... 1,8. Незважаючи на те, що отримані криві виявлення стосуються чітко визначених ситуацій, їх узагальнення дає практичні рекомендації. Дійсно, для кожного фону криві виявлення дефектів будуть різними, однак застосування запропонованого способу збільшує ймовірність виявлення дефектів, принаймні у багатьох випадках.

Головною перевагою запропонованого способу є можливість забезпечення заданого рівня ймовірності виявлення дефекту МС за фіксованого рівня ймовірності хибної тривоги при прийомі нестационарних сигналів. Якщо прогин в одній точці значно відрізняється від фонових значень, ймовірність виявлення такого дефекту наближається до одиниці. За відсутності відмінностей між прогинами, що зумовлені дефектом та типовими значеннями прогинів, ймовірність виявлення дефекту є близькою до нуля. У цьому випадку повинні використовуватись методи виявлення дефектів, що ґрунтуються на інших фізичних принципах. Таким чином, у більшості випадків досягається необхідна ефективність запропонованого способу, тобто задано ймовірність виявлення дефекту МС за фіксованою ймовірністю хибної тривоги. Аналогічний підхід був використаний нами при виявленні орієнтирів для автономних мобільних роботів [19].

Для даної інформаційної технології було побудовано графічний інтерфейс користувача (рис. 5), який реалізує наступні задачі:

1. Розкладає вибраний користувачем початковий сигнал на моди і виводить перші три моди на екран.
2. Оцінює стаціонарність перших трьох мод.

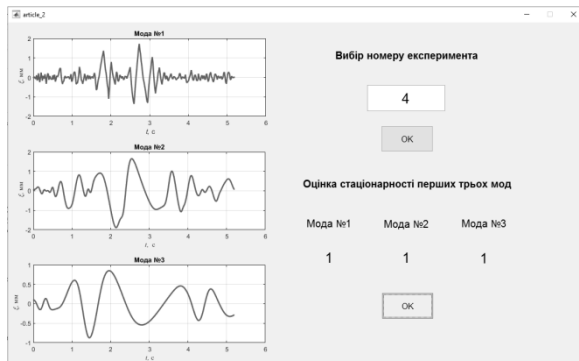


Рис. 5. Графічний інтерфейс користувача для оцінки стаціонарності перших трьох мод нестационарного процесу

У лівій частині інтерфейсу розміщуються графіки перших трьох мод, на які було розділено реалізацію початкового нестационарного процесу. У даному випадку в якості параметра, що досліджувався, було вибрано прогин мосту. У правій частині інтерфейсу знаходиться поле для введення користувачем номеру експерименту, статистичні дані яких було отримано раніше. Нижче можна побачити три поля отримання інформації щодо стаціонарності отриманих мод. У даному випадку при натисканні другої кнопки «ОК» на екран виводяться булеві змінні для трьох мод. Значення «1» інформує користувача про наявність стаціонарності вибраної моди, а значення «0» інформує користувача про нестационарність вибраної моди.

### Висновки

Існує багато методів обробки вимірювальної інформації про параметри технічних об'єктів, що описуються нестационарними процесами. Всі вони мають свої обмеження і потребують творчого підходу до їх вибору. У статті приведено метод, що має менше обмежень, ніж відомі методи, і зводиться до розкладання реалізацій нестационарного процесу на моди Гільберта–Хуанга. Для процесів, що виникали у процесі експериментальних досліджень фізичної моделі мостової споруди, кількість мод становила близько шести, переважна більшість з яких задовольняла критеріям стаціонарності. Хоча деякі перші моди і залишались нестационарними, повторне застосування до них перетворення

Гільберта–Хуанга робила їх стаціонарними. Отже, основним недоліком методу є збільшення числа каналів оброблення інформації, але виключення нестационарності процесу дає можливість застосування багатьох відомих методів без обмежень у кожному каналі. Прийняття рішення щодо стану технічного об'єкта здійснюється на основі відомих статистичних критеріїв по перших трьох модах Гільберта–Хуанга, тобто з використанням тільки трьох каналів.

### Література

1. ДСТУ 2481-94. Інтелектуальні інформаційні технології. Терміни та визначення.
2. Catherine A. Cardno. Smart Bridges, Evolved. - The Magazine of the American Society of Civil Engineers, 2020, <https://www.asce.org/cemagazine/smart-bridges/>
3. Poliarus O. V., Poliakov Ye. O., Lebedynskiy A. V., Ivanov V. K., Paschenko R. E. Measurement of the Bridge Surface Deflections Using Near-Field Amplitude of Secondary Radiators System. - Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. (USA) - Volume 2, Issue 6, Page No 217-224, 2017.
4. Carlos Granero-Belinchón, Stéphane G. Roux and Nicolas B. Garnier. Information Theory for Non-Stationary Processes with Stationary Increments. - Entropy, 2019, 21, 1223; doi:10.3390/e21121223, pp. 1–21.
5. Boashash, B., Azemi, G., O'Toole, J. Time-frequency processing of nonstationary signals. IEEE Signal Processine Magazine, 2013, 30, pp. 108–119.
6. Yang, K.; Shahabi, C. On the stationarity of multivariate time series for correlation-based data analysis. - In Proceedings of the Fifth IEEE International Conference on Data Mining (ICDM'05), Houston, TX, USA, 27–30 November 2005.
7. Ibe, O. 11-Levy processes. In Markov Processes for Stochastic Modeling, 2nd ed.; Elsevier: London, UK, 2013, pp. 329–347.
8. Gómez Herrero, G.; Wu, W.; Rutanen, K.; Soriano, M.C.; Pipa, G.; Vicente, R. Assessing coupling dynamics from an ensemble of time series. Entropy, 2015, 17, 1958–1970.
9. Vu, V.Q.; Yu, B.; Kass, R.E. Information in the Non-Stationary Case. Neural Comput. 2009, 21, 688–703.
10. Erik M. Bollt and Joseph D. Skufca, Stephen J. McGregor. Control entropy: A complexity measure for nonstationary signals. - mathematical biosciences and engineering, Volume 6, Number 1, January 2009, pp. 1–25.
11. H. Kantz and T. Schreiber. Nonlinear Time Series Analysis. - Cambridge University Press, Cambridge, 2004.

12. J. Theiler. Efficient algorithm for estimating the correlation dimension from a set of discrete points. - *Physical Review A*, 36 (1987), 4456–4462.
13. S.A. Zhmylev. Nonstationary processes period estimation in cloud systems. – *Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 475–481 (in Russian). doi: 10.17586/2226-1494-2019-19-3-475-481
14. Чистякова А. А., Б. В. Шамша А. А. Информационная технология прогнозирования нестационарных временных рядов с использованием сингулярного спектрального анализа. – *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. ISSN 1729-3774 2/4 (68) 2014.
15. N. Huang and S. Shen. Hilbert–Huang Transform and Its Applications. - *Interdisciplinary Mathematical Sciences*, 2014.
16. O. Poliarus, S. Ianushkevych, A. Koval, A. Lebedynskiy, Y. Medvedovska and Y. Poliakov. Influence of Measurements Uncertainty on Uncertainty of Gilbert-Huang Transform Modes. - *Proceedings of 2019 IEEE 8th International Conference on Advanced Optoelectronics and Lasers, CAOL 2019, Sozopol, Bulgaria, 6-8 September, 2019, pp. 644...647*. doi: 10.1109/caol46282.2019.9019512.
17. H. Kriegel, P. Kroger, E. Schubert and A. Zimek. Outlier Detection in Arbitrarily Oriented Subspaces. - *2012 IEEE 12th International Conference on Data Mining*, 2012.
18. Теоретические основы радиолокации / под ред. Ширмана Я. Д. – М.: Сов. радио, 1970. – 560 с.
19. O. Poliarus, Y. Poliakov and A. Lebedynskiy. Detection of landmarks by autonomous mobile robots using camera-based sensors in outdoor environments. - *IEEE Sensors Journal*, 2021, vol. 21, issue 10, pp. 11443-11450, doi: 10.1109/JSEN.2020.3010883.

**Полярус О. В.**, д.т.н., професор,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків, тел. (057)707-36-58,  
[poliarus.kharkov@ukr.net](mailto:poliarus.kharkov@ukr.net)

**Лебединський А. В.**, асистент,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків, тел. (057)707-36-58,  
[poliarus.kharkov@ukr.net](mailto:poliarus.kharkov@ukr.net)

**Чепусенко Є. О.**, аспірант,  
Харківський національний автомобільно-дорожній університет, вул. Ярослава Мудрого, 25, 61002, м. Харків, тел. (057)707-36-58,  
[eugeny.chepusenko@yandex.ua](mailto:eugeny.chepusenko@yandex.ua)

**Method, models and information technology of decision making about the state of technical objects under non-stationary input influences**

*Abstract.* There is a significant increase in the amount of measuring information at complex and large technical objects, such as bridges. Decision making about these objects states under non-stationary input influences is a difficult task. The article proposes to make the transition from single-channel information processing to multi-channel one. Each channel processes one of the Hilbert-Huang modes, into which each realization of the nonstationary signal decomposes. It is shown that the first three modes of decomposition are often enough, which in most cases create a stationary process. If a mode is non-stationary, it is possible to decompose it into these modes. The final decision according to statistical criteria is made not on realizations as it is traditionally carried out, but on Hilbert-Huang modes.

**Key words:** measuring information, non-stationary input influences, Hilbert-Huang modes, decision making.

**Poliarus O. V.**, Dr. of Eng. Science, Prof., Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudroho, Kharkiv, 61002, Ukraine, +380577073658, [poliarus.kharkov@ukr.net](mailto:poliarus.kharkov@ukr.net)

**Lebedynskiy A. V.**, assistant, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudroho, Kharkiv, 61002, Ukraine, +380577073658, [poliarus.kharkov@ukr.net](mailto:poliarus.kharkov@ukr.net)

**Chepusenko Y. A.**, graduate student, Kharkiv National Automobile and Highway University, 25 Yaroslava Mudroho, Kharkiv, 61002, Ukraine, +380577073658, [eugeny.chepusenko@yandex.ua](mailto:eugeny.chepusenko@yandex.ua)