ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

УДК 004.942

doi: 10.32620/aktt.2025.4sup2.21

В. Ф. МИРГОРОД[1], І. М. ГВОЗДЕВА[2]

[1] ***АТ «Елемент», Одеса, Україна***
[2] ***Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, Україна***

ОЦІНКА ПАРАМЕТРІВ ПЕРІОДИЧНОЇ СКЛАДОВОЇ ЧАСОВОГО РЯДУ ДАНИХ СТЕНДОВИХ ВИПРОБУВАНЬ І ТЕХНІЧНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ МЕТОДОМ СИНГУЛЯРНОГО СПЕКТРАЛЬНОГО АНАЛІЗУ

Пропонується підхід щодо визначення циклічної складової часових рядів реєстрації технічного стану при довготривалій експлуатації складних енергетичних об'єктів та їх стендових випробувань засобами реального часу. Актуальність вирішення вказаного науково-прикладного завдання зумовлена необхідністю поточного аналізу технічного стану зазначених об'єктів для встановлення можливості їх експлуатації за встановленим ресурсом із *урахуванням циклічної (періодичної, сезонної) складової, вплив якої є важливим чинником щодо встановлення фактичного технічного стану досліджуваних об'єктів. Виконано аналіз і порівняння методів оцінки циклічної складової часових рядів щодо можливості їх реалізації засобами реального часу за допомогою аналітичного обґрунтування та вирішення тестового прикладу й аналізу реальних даних при стендових випробуваннях складного енергетичного об'єкта, побудованого на основі газотурбінного двигуна. Запропоновано та підтверджено гіпотезу про те, що при рівності власних значень матриці автокореляції часового ряду, що відповідає наявності періодичної складової в його ортогональному розкладі, саме розмірність вікна аналізу відповідає періоду зазначеної складової. Встановлено, що відомий метод оцінки циклічної складової даних вимірювань, а саме метод сингулярного спектрального аналізу забезпечує теоретично найменшу середньоквадратичну похибку оцінки, але має значну алгоритмічну складність обчислювальної реалізації. Запропоновано метод оцінки циклічної складової даних вимірювань реального часу шляхом нерекурсивної цифрової фільтрації на основі квадратурного фільтра зі зваженими коефіцієнтами за визначеною залежністю. Уперше запропоновано нову модифікацію методу сингулярного спектрального аналізу часових рядів для оцінки циклічної складової, яка дозволяє побудувати алгоритми реального часу високої точності.*

Ключові слова: *технічний стан; математичне моделювання; складні енергетичні об'єкти; газотурбінний двигун; часові ряди; статистична модель; оцінка циклічної складової.*

Вступ

Проблемні питання встановлення поточного технічного стану складних енергетичних об'єктів потребують аналізу даних реєстрації значного обсягу первинної інформації та їх наступного опрацювання в масштабі часу, близького до реального. Такі дані мають вигляд багатовимірних масивів взаємопов'язаних параметрів експлуатації складних енергетичних об'єктів, що формують часові ряди. Аналіз таких часових рядів потребує встановлення їх складових, їх взаємозв'язку, та впливу на можливості подальшої експлуатації складних енергетичних об'єктів за технічним станом. Однією із важливих складових таких часових рядів є циклічна періодична, сезонна) складова, вплив якої є важливим чинником щодо встановлення фактичного технічного стану досліджуваних об'єктів. До методів встановлення циклічної складової мають місце вимоги щодо похибок, що не перевершують похибки відповідних вимірювальних каналів, а також, алгоритми оцінки циклічної складової повинні мати достатню швидкодію для можливості реалізації в реальному часі.

Тому дослідження та порівняння методів оцінки циклічної складової часових рядів даних експлуатації складних енергетичних об'єктів щодо можливості їх реалізації засобами реального часу, є актуальним та важливим науково-прикладним завданням.

1. Формулювання проблеми

Розподіл часових рядів на складові, які вважаються важливими для подальшого аналізу, є класичним завданням аналізу багатовимірних часових рядів. Визначне значення має вирішення вказаного науково-прикладного завдання щодо технічної експлуатації складних енергетичних об'єктів, зокрема, побудованих на основі газотурбінних двигунів (ГТД). Визна-

Creative Commons Attribution
NonCommercial 4.0 International

чення циклічної складової параметрів діагностування має непересічне значення щодо її врахування при встановлення можливості подальшої експлуатації вказаних об'єктів за технічним станом.

Існує також низка науково-прикладних завдань, в яких визначення параметрів циклічної складової даних вимірювань становить важливе значення. Зокрема, при проведенні стендових випробувань мають місце коливання в системі автоматичного керування, що зумовлено властивостями гідромехінічної частини паливної автоматики ГТД. Навіть якщо такі періодичні відхилення регульованих параметрів є припустимими, визначення середнього становить складну задачу за невідомої частоти коливань. Іншим прикладом є встановлення нерівномірності температурного поля в камері згоряння ГТД. Суперечливість вимог щодо методів і алгоритмів встановлення циклічної складової в даних вимірювань продукує протиріччя між необхідністю отримання мінімальних похибок її оцінки та обчислювальною складністю таких алгоритмів.

Таким чином, дослідження та обґрунтування методів і алгоритмів обчислювальної реалізації методів оцінки циклічної складової даних вимірювань технічного стану складних енергетичних об'єктів в довготривалій експлуатації та даних стендових випробувань щодо можливості їх реалізації засобами реального часу дає можливість удосконалити бортові та наземні системи контролю, виміру параметрів і діагностики.

Визначними роботами щодо проблематики дослідження властивостей часових рядів є праці [1–6]. Роботи авторів [7 - 9] присвячені побудові математичних моделей процесів зміни технічного стану ГТД у вигляді часових рядів. Метод SSA аналізу часових рядів розглянуто в [10].

Метою пропонованого дослідження є вирішення вказаного протиріччя шляхом аналізу і порівняння методів оцінки параметрів циклічної складової даних вимірювань, можливості їх реалізації засобами реального часу на тестовому прикладі та даних стендових випробувань.

2. Вирішення проблеми

2.1. Загальна характеристика завдань дослідження

Проблемні питання визначення наявності та оцінки параметрів періодичної складової в даних вимірювань є класичним питанням спектрального аналізу [11]. Широке застосування вказаних методів в різноманітних галузях науки і техніки є загальновідомим. Тому слід вказати на суттєві особливості вирішення вказаного завдання щодо аналізу часових рядів, зокрема, що стосується життєвого циклу силових і енергетичних установок на базі ГТД. Головною особливістю є принципова відмінність мети аналізу, оскільки досліджувані часові ряди мають тренд і, таким чином, є нестаціонарними. Тому класичні методи оцінки параметрів періодичної складової в даних вимірювань в умовах нестаціонарності досліджуваних процесів мають значні обмеження.

Щодо експлуатації силових і енергетичних установок на базі ГТД, циклічна складова характерна для таких установок наземного застосування за умови впливу зовнішніх природних факторів. Тому для її дослідження необхідно попередньо встановити вигляд та відокремити трендову складову [7 - 9].

З огляду на вказані особливості, в наступному автори спираються на метод головних компонент, та його модифікацію, відому як метод SSA [10], який не має обмежень, які характеризують класичний спектральний аналіз.

2.2. Аналіз та порівняння методів оцінки циклічної складової даних вимірювань

- Оцінка циклічної складової часових рядів методом SSA на тестовому прикладі

Алгоритм обчислювальної реалізації методу SSA стосовно даних експлуатації силових і енергетичних установок на базі ГТД детально розглянуто в [7]. За вказаним алгоритмом попередньо розглянуто вирішення ілюстративного тестового прикладу визначення параметрів періодичної складової часового ряду, який представлений на рис. 1. Часовий ряд має періодичну складову із незначним впливом випадкової компоненти.

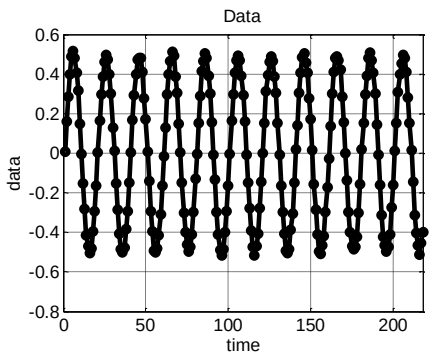

Рис. 1. Часовий ряд

Для розглянутого тестового прикладу на рис. 2 та рис. 3 представлені розподіл власних значень матриці автокореляції на вікні в 20 відліків та розподіл перших векторів матриці сингулярного розкладання відповідно методу головних компонент. Розподіл на рис. 3, отриманий методом головних компонент, безпосередньо вказує на можливість отримання оці-

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

нки періодичної компоненти часового ряду за допомогою нерекурсивного фільтру із зваженими коефіцієнтами, тобто в реальному часі.

Результат застосування методу SSA оцінки періодичної складової часового ряду для тестового прикладу представлено на рис. 5.

Як це і очікувалось, найбільш досяжну точність оцінки періодичної складової часового ряду у сенсі мінімального значення середньоквадратичної похибки забезпечує метод SSA. Коефіцієнт взаємокореляції даних вимірювань із оцінкою методом SSA становить 0,99,

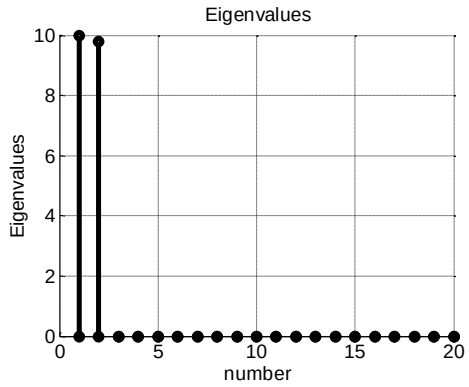

Рис. 3. Розподіл власних значень матриці автокореляції

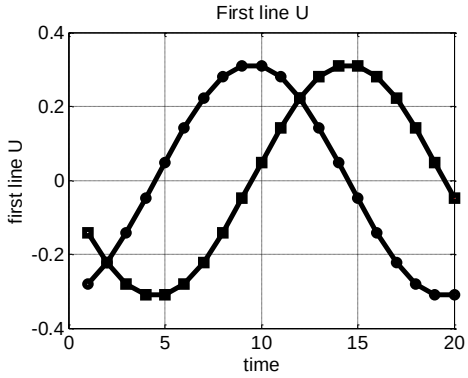

Рис. 4. Розподіл перших векторів матриці розкладання

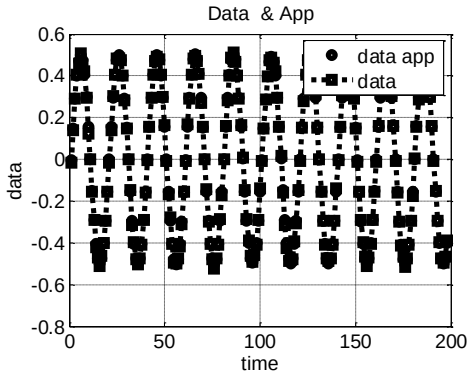

Рис. 5. Оцінка періодичної складової часового ряду

На рис. 5 позначені: data – вихідні дані, data app – оцінка методом головних компонент.

- **Оцінка циклічної складової даних вимірювань для практичного завдання**

Для верифікації отриманих результатів розглянуто досить складне завдання аналізу даних вимірювань просторово-часового розподілу температурного поля в камері згоряння ГТД малої потужності. На рис. 6 представлено дані вимірювань відхилень температури в камері згоряння від номінального значення. Рис. 7 ілюструє результат застосування розглянутих алгоритмів оцінки циклічної складової.

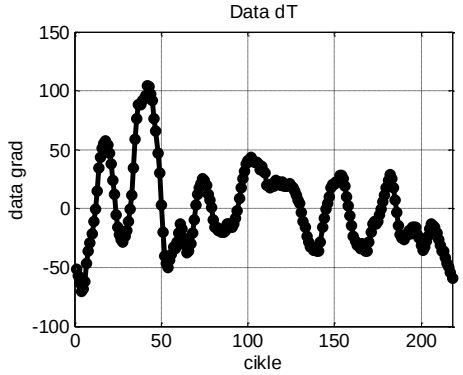

Рис. 6. Ряд вимірів відхилень температури в камері згоряння від номінального значення

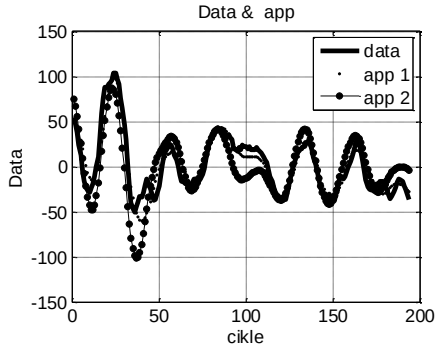

Рис. 7. Оцінка циклічної складової вимірів відхилень температури в камері згоряння від номінального значення

На рис. 7 позначені: data – вихідні дані, app1 – оцінка методом головних компонент, app2 – оцінка нерекурсивним фільтром у реальному часі.

Коефіцієнти взаємокореляції даних вимірювань із оцінкою методом SSA становить 0,96, а із оцінкою методом цифрової фільтрації 0,76. Вікно аналізу становило 24 відліка, що забезпечувало наближену рівність перших власних значень матриці автокореляції і власне встановлює безпосередньо період коливань.

Аналіз результатів застосування відомих методів та пропонованого методу оцінки циклічної скла-

дової даних вимірювань вказує на те, що метод головних компонент має найкращі показники точності щодо встановлення такої складової у сенсі мінімальної середньоквадратичної похибки, але його алгоритмічна складність обмежує застосування в системах, що потребують рішень в реальному часі. Навпаки, пропонований метод нерекурсивної цифрової фільтрації даних вимірювань із квадратурним фільтром, який має зважені коефіцієнти гармонічного розподілу, дозволяє отримати оцінку циклічної складової даних вимірювань з достатньою точністю та у реальному часі.

Висновки

Мета дослідження у вигляді аналізу і порівняння методів оцінки параметрів циклічної складової даних вимірювань, можливості їх реалізації засобами реального часу на тестовому прикладі та за даними стендових випробувань досягнута аналітичним обґрунтуванням та вирішенням тестового прикладу і аналізу реальних даних при стендових випробуваннях ГТД.

Встановлено, що пропоновані методи оцінки циклічної складової часових рядів засобами реального часу, а саме: розглянуті методи сингулярного спектрального аналізу та цифрової фільтрації, суттєво відрізняються за показниками точності та швидкодії.

Найбільш досяжну точність забезпечує метод сингулярного спектрального аналізу, але його алгоритмічна складність обмежує можливості застосування.

Пропонований метод оцінки циклічної складової часових рядів засобами реального часу, а саме: цифрової фільтрації у вигляді нерекурсивного фільтру із зваженими коефіцієнтами, надає можливий компроміс між вимогами точності та швидкодії.

Перспективи подальших досліджень становлять застосування вайвлет-технологій щодо оцінки квазіперіодичної складової часових рядів засобами реального часу.

Внесок авторів: формулювання проблеми – **В. Ф. Миргород, І. М. Гвоздева**; огляд та аналіз інформаційних джерел – **І. М. Гвоздева**; розробка методики – **В. Ф. Миргород, І. М. Гвоздева**; аналіз результатів досліджень – **В. Ф. Миргород, І. М. Гвоздева.**

Конфлікт інтересів

Автори заявляють, що немає конфлікту інтересів щодо цього дослідження, фінансового, особистого, авторського чи іншого, який міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в цій статті.

Фінансування

Дослідження проводилося без фінансової підтримки.

Наявність даних

Дані будуть надані за обґрунтованим запитом.

Використання штучного інтелекту

Автори підтверджують, що вони не використовували технології штучного інтелекту при створенні даної роботи.

Подяка

Автори висловлюють подяку д-ру техн. наук, проф. Єпіфанову С.В.

Усі автори прочитали та погодилися з опублікованою версією рукопису.

Література

1. Kendall, M. The advanced theory of statistics [Text] / M. Kendall, & A. Stuart // Hafner, New York, 1979. - Vol. 2. - 748 p.

2. Anderson, O. D. Time series analysis and forecasting [Text] / O. D. Anderson // Butterworths, London. - 1976. - 182 p.

3. Box, G. E. P. Time series analysis: Forecasting and control [Text] / G. E. P. Box, & G. M. Jenkins // - Holden Day, San Francisco, 1976. - 575 p.

4. Montgomery, D. C. Forecasting and time series analysis [Text] / D. C. Montgomery, L. A. Johnson, & J. S. Gardiner // McGraw-Hill, New York, 1990. - 300 p.

5. Shumway, R. H. Applied statistical time series analysis [Text] / R. H. Shumway // Prentice Hall, New York, 1988. - 384 p.

6. Wei, W. W. Time series analysis: Univariate and multivariate methods [Text] / W. Wei // Addison-Wesley, New York, 1989. - 640 p.

7. Hvozdeva, I. The Method of Trend Analysis of Parameters Time Series of Gas-turbine Engine State [Text] / I. Hvozdeva, V. Myrhorod, & Y. Derenh // AMiTaNS'17, AIP Conf. Proc. Vol. 1895, edited by M. D. Todorov (American Institute of Physics, Melville, NY, 2017). - P. 030002-1-030002-9. doi: 10.1063/1.5007361.

8. Myrhorod, V. Some Interval and Trend Statistics with Non-Gaussian Initial Data Distribution [Text] / V. Myrhorod, & I. Hvozdeva, V. Demirov // AMiTaNS'18, AIP Conf. Proc. Vol. 2025, edited by M. D. Todorov (American Institute of Physics, Melville, NY, 2018). - P. 040011-1-040011-12, doi: 10.1063/1.5064895.

9. Myrhorod, V. Two-dimensional trend analysis of time series of complex technical objects diagnostic parameters [Text] / V. Myrhorod, I. Hvozdeva, & Y. Derenh // 11th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences - AMiTaNS'19, AIP Conference Proceedings, 2019. - Vol. 2164, № 1. - P. 040011-1-040011-12. doi: 10.1063/1.5130815.

10. Van Loan, Ch. F. Generalizing the singular value decomposition [Text] / Ch. F. Van Loan // SIAM J. Numer., Anal. - 1976. - № 13. – P. 76–83.

ISSN 1814-4225 (print)
ISSN 2663-2012 (online)

11. Marple, S. L. Digital Spectral Analysis: With Application [Text] / S. L. Marple // Prentice-Hall, N. Y., - 1987. – 232 p.

References

1. Anderson, O. D. *Time series analysis and forecasting*. Butterworths, London, 1976. 182 p.

2. Kendall, M., & Stuart, A. *The advanced theory of statistics*. Hafner, New York, 1979, vol. 2. 748 p.

3. Box, G. E. P., & Jenkins, G. M. *Time series analysis: Forecasting and control*. Holden Day, San Francisco, 1976. 575 p.

4. Montgomery, D. C., Johnson, L. A., & Gardiner, J. S. *Forecasting and time series analysis. McGraw-Hill*, New York, 1990. 300 p.

5. Shumway, R. H. *Applied statistical time series analysis*. Prentice Hall, New York, 1988. 384 p.

6. Wei, W. W. *Time series analysis: Univariate and multivariate methods*. Addison-Wesley, New York, 1989. 640 p.

7. Hvozdeva, I., Myrhorod, V., & Derenh, Y. The Method of Trend Analysis of Parameters Time Series of Gas-turbine Engine State. *In AMiTaNS'17, AIP Conf. Proc*. Vol. 1895, edited by M. D. Todorov (American Institute of Physics, Melville, NY, 2017), pp. 030002-1-030002-9, doi: 10.1063/1.5007361.

8. Myrhorod, V., Hvozdeva, I., & Demirov, V. Some Interval and Trend Statistics with Non-Gaussian Initial Data Distribution. *In AMiTaNS'18, AIP Conf. Proc*. Vol. 2025, edited by M. D. Todorov (American Institute of Physics, Melville, NY, 2018), pp. 040011-1-040011-12, doi: 10.1063/1.5064895

9. Myrhorod, V., Hvozdeva, I., & Derenh, Y. Two-dimensional trend analysis of time series of complex technical objects diagnostic parameters. *11th International Conference for Promoting the Application of Mathematics in Technical and Natural Sciences - AMiTaNS'19*, AIP Conference Proceedings, 2019, vol. 2164, no. 1, pp. 040011-1-040011-12. doi: 10.1063/1.5130815.

10. Van Loan, & Ch. F. Generalizing the singular value decomposition. *SIAM J. Numer., Anal.*, 1976, no. 13, pp. 76–83

11. Marple, S. L. *Digital Spectral Analysis: With Application*. Prentice-Hall, N.Y., 1987. 232 p.

Надійшла до редакції 24.06.2025, розглянута на редколегії 18.08.2025

ESTIMATION OF PARAMETERS OF THE PERIODIC COMPONENT OF THE TIME SERIES OF DATA OF BENCH TESTS AND TECHNICAL OPERATION OF COMPLEX ENERGY FACILITIES BY THE METHOD OF SINGULAR SPECTRAL ANALYSIS

Volodymyr Myrhorod, Iryna Hvozdeva

This study proposes an approach to determine the cyclic component of the time series of technical condition registration during the long-term operation of complex energy facilities and their bench tests by real-time means. The relevance of solving the specified scientific and applied problem is due to the need for current analysis of the technical condition of the specified facilities to establish the possibility of their operation according to the established resource, taking into account the cyclic (periodic, seasonal) component, the influence of which is an important factor in establishing the actual technical condition of the studied facilities. An analysis and comparison of methods for assessing the cyclic component of time series in terms of the possibility of their implementation by real-time means was performed using analytical justification and solving a test case, and analyzing real data during bench tests of a complex energy facility built based on a gas turbine engine. The hypothesis is proposed and confirmed that the dimension of the analysis window corresponds to the period of the specified component if the eigenvalues of the autocorrelation matrix of a time series are equal, which corresponds to the presence of a periodic component in its orthogonal distribution.The known method of estimating the cyclic component of measurement data, namely, the method of singular spectral analysis, provides the theoretically smallest mean square error of estimation, but has a significant computational complexity. We propose a method for estimating the cyclic component of real-time measurement data by non-recursive digital filtering based on a quadrature filter with weighted coefficients according to a certain dependence. A new modification of the method of singular spectral analysis of time series for estimating the cyclic component is proposed for the first time, allowing the development of high-precision real-time algorithms.

Keywords: technical condition; mathematical modeling; complex energy facilities; gas turbine engine; time series; statistical model; estimation of the cyclical component.

Миргород Володимир Федорович – д-р техн. наук, старш. наук. співроб. АТ «Елемент», Одеса, Україна.

Гвоздева Ірина Маратівна – д-р техн. проф., зав. каф. НУ «Одеська морська академія», Одеса, Україна.

Volodymyr Myrhorod – Doctor of Science, JSC "Element", Odesa, Ukraine,
e-mail: v.f.mirgorod@gmail.com, ORCID: 0000- 0001- 8361-1672.

Iryna Hvozdeva – Doctor of Science, Professor at the National University "Odesa Maritime Academy", Odesa, Ukraine, e-mail: onopchenko.im@gmail.com, ORCID: 0000- 0001- 5797- 0559.