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

УДК 004.942

doi: 10.32620/aktt.2025.4sup1.23

В. Ф. МИРГОРОД[1], І. М. ГВОЗДЕВА[2]

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

ВИЗНАЧЕННЯ ТРЕНДОВОЇ СКЛАДОВОЇ ЧАСОВОГО РЯДУ ЗАСОБАМИ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ПРИ ТЕХНІЧНІЙ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СКЛАДНИХ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

Пропонується підхід щодо визначення трендової складової часових рядів реєстрації технічного стану при довготривалій експлуатації складних енергетичних об'єктів засобами реального часу. Актуальність вирішення вказаного науково-прикладного завдання зумовлена необхідністю поточного аналізу технічного стану вказаних об'єктів для визначення можливості їх експлуатації за встановленим ресурсом. Виконано аналіз і порівняння методів оцінки трендової складової часових рядів щодо можливості їх реалізації засобами реального часу за допомогою аналітичного обґрунтування та вирішення тестового прикладу й аналізу реальних даних при технічній експлуатації складного енергетичного об'єкта, побудованого на основі газотурбінного двигуна. Встановлено, що пропоновані методи оцінки трендової складової часових рядів засобами реального часу, а саме: розглянуті методи експоненційного згладжування, фільтрації Калмана та метод сингулярного спектрального аналізу суттєво відрізняються за показниками точності та швидкодії. Найбільш досяжну швидкодію мать методи експоненційного згладжування та фільтрації Калмана і відповідні їм рекурсивні алгоритми, що реалізуються у вигляді фільтрів із нескінченною імпульсною характеристикою. Але такі методи обробки часових рядів мають методичну швидкісну похибку. Вперше запропоновано нову модифікацію методу сингулярного спектрального аналізу часових рядів, яка дозволяє побудувати алгоритми реального часу високої точності. Швидкодія такого методу визначення трендової складової часових рядів обмежена тільки розмірністю вікна аналізу. Запропоновано двоетапний підхід щодо аналізу часових рядів реєстрації технічного стану при довготривалій експлуатації складних енергетичних об'єктів. Перший з таких етапів становить саме визначення наявності тренду за допомогою відомих трендових статистик. Наступний етап становить визначення трендової складової відомими та пропонованими методами.

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

Вступ

Проблемні питання підвищення техніко-економічної ефективності експлуатації складних енергетичних об'єктів складаються в поточний час в можливості продовження їх використання за межами призначеного ресурсу на основі оцінки технічного стану засобами інструментального контролю та на основі сучасних інформаційних технологій. Поточна оцінка технічного стану конкретного об'єкту базується на формуванні багатовимірного масиву даних вимірювань та їх наступної обробки за визначеними розробником алгоритмами. Найбільш важливою складовою такої обробки є формування багатовимірних трендів взаємопов'язаних діагностичних параметрів, які дозволяють виконати, як звичайний допусковий контроль, так і трендовий аналіз та прогноз їх розвитку. До методів трендового аналізу та висуваються досить жорсткі вимоги. По-перше, встановлена трендова складова повинна мати похибки, що не перевершують похибки відповідних вимірювальних каналів. По-друге, алгоритми оцінки тренду повинні мати достатню швидкодію для можливості оперативного прийняття рішень.

Тому дослідження та порівняння методів оцінки трендової складової часових рядів щодо можливості їх реалізації засобами реального часу, є актуальним та важливим науково-прикладним завданням.

1. Формулювання проблеми

Технічна експлуатація складних енергетичних об'єктів, зокрема, побудованих на основі газотурбінних двигунів (ГТД), на протязі їх життьового циклу за фактичним станом потребує вирішення низки науково-прикладних завдань аналізу взаємопов'язаної сукупності параметрів діагностування. Визначення трендової складової параметрів діагностування має

Creative Commons Attribution NonCommercial 4.0 International

непересічне значення щодо встановлення можливості подальшої експлуатації об'єктів за технічним станом. До методів оцінки трендової складової часових рядів загалом висуваються суперечливі вимоги та існує протиріччя між вимогами точності та швидкодії. По-перше, це вимога точності, тобто оцінка трендової складової повинна мати мінімальну середньоквадратичну похибку відносно дійсного тренду. По-друге, це вимога швидкодії, тобто алгоритми визначення оцінки трендової складової повинні мати змогу отримувати таку оцінку за найменшу кількість ітерацій.

Таким чином дослідження та обґрунтування методів і алгоритмів обчислювальної реалізації оцінки трендової складової часових рядів дозволяє обрати відповідне рішення щодо реалізації в бортових та наземних системах діагностики.

Дослідженню часових рядів та розробці методів їх аналізу присвячено низка фундаментальних робіт [1–6]. Математичні моделі процесів зміни параметрів зміни технічного стану складних об'єкті/у вигляді часових рядів є предметом низки прикладних досліджень [7-9]. В [7–10] розглянуто вирішення завдання оцінки параметрів статистик тренду та випадковості шляхом статистичного моделювання.

Метою пропонованого дослідження є вирішення вказаного протиріччя шляхом аналізу та порівняння методів оцінки трендової складової часових рядів щодо можливості їх реалізації засобами реального часу на тестовому прикладі лінійного тренду та даних експлуатації.

2. Вирішення проблеми

2.1. Об'єкт, предмет та методика дослідження

Об'єктом досліджень є процеси перетворення енергії, що відбуваються при технічній експлуатація складних енергетичних об'єктів, зокрема, побудованих на основі газотурбінних двигунів (ГТД), на протязі їх життєвого циклу, що відображаються у взаємопов'язаній зміні множини їх контрольованих параметрів, які подаються часовими рядами. Предметом досліджень є статистичні моделі породження даних (СМПД), методи та алгоритми оцінки трендової складової, їх аналіз та порівняння за критеріями точності та швидкодії.

Слід зауважити, що оцінка трендової складової наперед потребує розгляду питання, що тренд взагалі існує, тому попереднім етапом аналізу часових рядів даних експлуатації повинно бути застосування методів трендового контролю, заснованих на відомих трендових статистиках [1–6] з відомою їх ефективністю [7–12].

2.2. Аналіз та порівняння методів оцінки трендової складової часових рядів

- **Оцінка трендової складової часових рядів методом експоненційного згладжування**

Метод експоненційного згладжування є одним із вивчених та практично застосовуваних методів обробки часових рядів ще з початку впровадження відповідних програмно-апаратних засобів оцінки стану об'єктів за даними експлуатації.

Алгоритмічну основу методу становить використання рекурсивної залежності:

$$y_k = y_{k-1} + \alpha\left(x_k - y_{k-1}\right),$$

де x_k – відліки вихідного часового ряду,

y_k – відліки оцінки часового ряду,

α – параметр налаштування.

Переваги такого методу становлять: універсальність застосування, найбільш можлива швидкодія, мінімум параметрів налаштування (власне лише один такий параметр), рекурсивність алгоритму.

Недоліки щодо вирішення поставленого прикладного завдання становлять: наявність так званої швидкісної помилки відносно найбільш простого лінійного тренду; наявність випадкової складової значного рівня в оцінці.

Зміна параметру налаштування в методі експоненційного згладжування має деякий компроміс. Збільшення такого параметру дозволяє зменшити швидкісну помилку, але збільшує вплив випадкової складової. Зменшення такого параметру дозволяє зменшити вплив випадкової складової, але збільшує швидкісну помилку. Тому існує деяке оптимальне рішення, але воно залежить від темпу тренду та дисперсії випадкової складової, які, загалом, не є наперед відомими.

- **Оцінка трендової складової часових рядів методом фільтрації Калмана**

Оцінка детермінованої складової даних вимірювань є класичним завданням сукупності методів фільтрації, що базуються на підходах, запропонованих Калманом [13].

Суттєвою ознакою таких методів є формування відповідної СМПД , яка становить основу для побудови відповідного спостерігача стану.

Для вирішення тестового завдання у вигляді лінійного тренду із випадковими збуреннями розглянута наступна СМПД:

$$\left.\begin{aligned} \frac{\partial x}{\partial t} &= a, \\ y &= x + \xi \end{aligned}\right\},$$

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

де a – темп зміни тренду часового ряду,

ξ – випадкова складова.

Переваги методу: оцінка трендової складової часових рядів методом фільтрації Калмана становлять висока точність оцінки, можливість знаходження оптимальних параметрів налаштування відповідно нерівності Крамера-Рао, універсальність застосування, наявність розвиненої теорії та множини програмних продуктів.

Недоліки щодо вирішення поставленого прикладного завдання становлять: складність врахування параметрів СМПД за вихідними даними, складність реалізації алгоритмів оцінки трендової складової у порівнянні з- методом експоненційного згладжування.

Для порівняння методів оцінки трендової складової часового ряду використано тестовий приклад, який ілюструють рис. 1 та рис. 2. На рис.1 представлено часовий ряд з очевидним трендом, а рис. 2 ілюструє результати застосування розглянутих методів оперативної оцінки трендової складової.

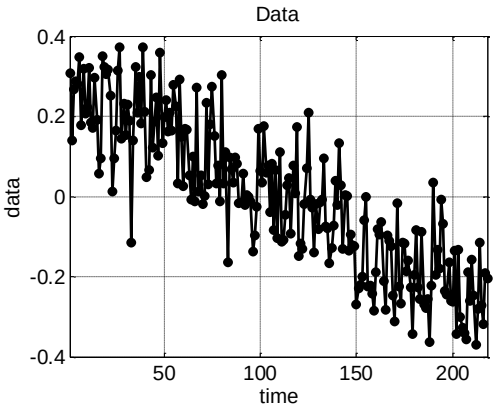

Рис. 1. Часовий ряд

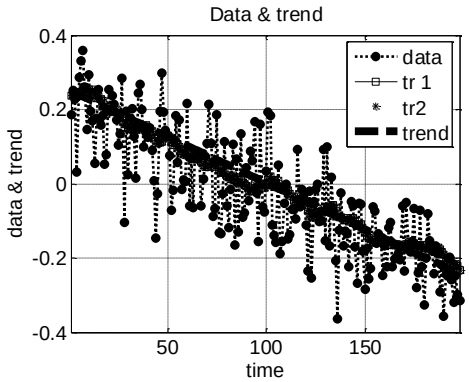

Рис. 2. Оцінка трендової складової часового ряду методами експоненційного згладжування та фільтрації Калмана

На рис. 2 позначені: tr 1 – оцінка методом експоненційного згладжування, tr 2 – оцінка методом фільтрації Калмана.

Результати статистичного моделювання відповідають теоретичним обґрунтуванням.

- **Оцінка трендової складової часових рядів методом SSA**

Найбільш універсальним та досконалим методом оцінки трендової складової часового ряду є ортогональне його розкладання на компоненти, що упорядковані за потужності. Ортогональне розкладання дозволяє виконати прогнозну оцінку розвитку тренду. Теоретичну основу такого підходу становить метод головних компонент, а прикладні питання вирішення вказаного завдання позначаються в літературі як метод сингулярного спектрального аналізу (SSA) [14]. Модифікації вказаного методу відомі як “гусениця” та “caterpillar” [15].

Авторами в [7,8,9] встановлено, що вказаний метод при наявності тренду статистично еквівалентний визначенню трендової складової за допомогою алгоритму ковзного середнього. Ознакою такого спрощення є переважне значення першого власного значення матриці автокореляції часового ряду на визначеному вікні аналізу.

Алгоритм ковзного середнього є алгоритмом реального часу і дозволяє визначити оцінку трендової складової на протязі вікна аналізу. Такий алгоритм близький до відомих алгоритмів обробки часових рядів за допомогою вікон згортки [16], але є теоретично обґрунтованим. За обчислювальною реалізацією такий алгоритм представляється нерекурсивним цифровим фільтром з рівномірним амплітудним розподілом.

Переваги методу оцінка трендової складової часових рядів методом SSA у пропонованій модифікації становлять: найбільш можлива досяжна точність оцінки, універсальність застосування, наявність розвиненої теорії та множини програмних продуктів.

Недоліки щодо вирішення поставленого прикладного завдання становлять: необхідність попереднього етапу встановлення наявності тренду відомими статистиками, протяжність у вигляді розмірності вікна аналізу оцінки трендової складової.

Для розглянутого тестового прикладу на рис. 3 та рис. 4 представлені розподіл власних значень матриці автокореляції на вікні в 20 відліків та розподіл першого вектору матриці діагоналізації відповідно методу головних компонент. Розподіл на рис. 4 отримано методом головних компонент, а його вигляд безпосередньо вказує на можливість отримання оцінки трендової компоненти часового ряду за

допомогою нерекурсивного фільтру ковзного середнього, тобто в реальному часі.

Загальне співставлення результатів застосування розглянутих методів оцінки трендової складової часового ряду для тестового прикладу представлено на рис. 5.

Як це і очікувалось, найбільш досяжну точність оцінки трендової складової часового ряду забезпечує метод SSA у пропонованій модифікації реального часу. Рекурсивні алгоритми мають гірші показники щодо точності, але найкращі за швидкодією.

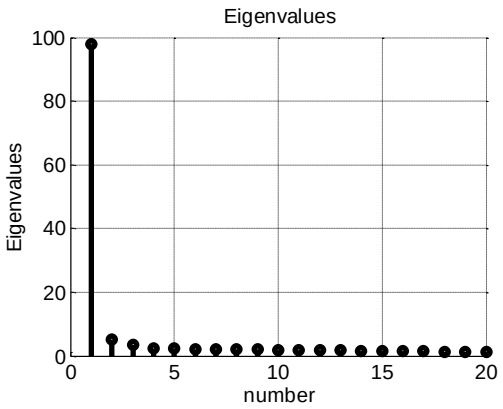

Рис. 3. Розподіл власних значень матриці автокореляції.

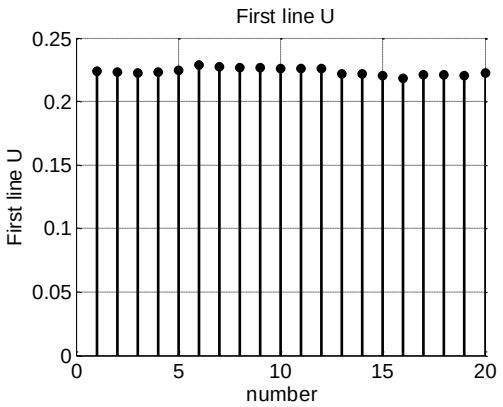

Рис. 4. Розподіл першого вектору матриці діагоналізації

Для верифікації отриманих результатів розглянуто аналіз даних довготривалої експлуатації складного енергетичного об'єкту у вигляді силової установки літака на базі двовального ГТД [7]. На рис. 6 представлено часовий ряд відхилень приведеної температури газів за турбіною високого тиску від номінального значення. Рис. 7 ілюструє результат застосування розглянутих алгоритмів оцінки трендової складової.

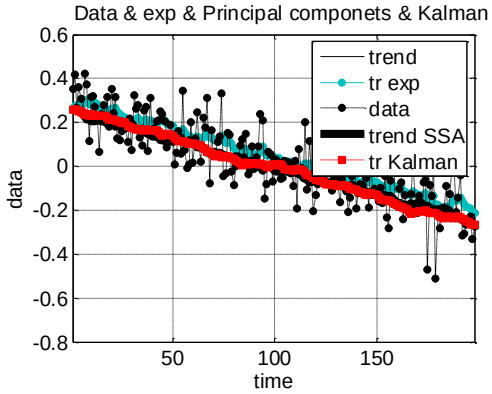

Рис. 5. Оцінка трендової складової часового ряду

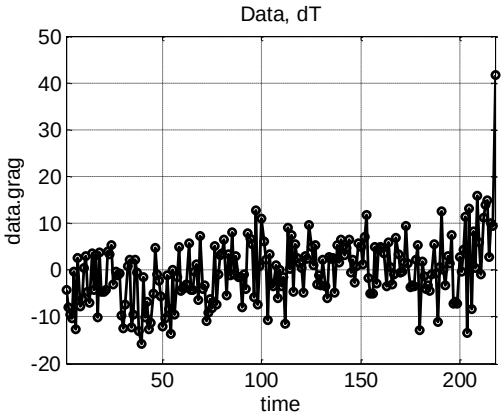

Рис. 6. Часовий ряд відхилень приведеної температури газів за турбіною високого тиску від номінального значення

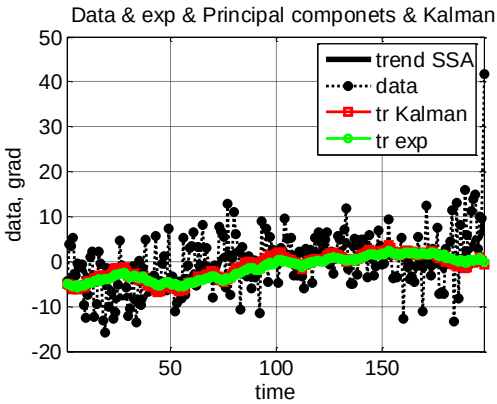

Рис. 5. Оцінка трендової складової часового ряду відхилень приведеної температури газів за турбіною високого тиску від номінального значення

Аналіз даних реальної експлуатації досліджуваного об'єкту вказує на те, що розглянуті методи оцінки трендової складової часового ряду мають достатні показники точності щодо встановлення такої складової, тобто методичні похибки не перевищують

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

вимоги до метрологічних характеристик вимірювальних каналів.

Але тільки метод SSA зміг би вказати, при його застосуванні в бортовій системі контролю та діагностики, ще за декілька польотних циклів злам тренду та можливий розвиток аварійної ситуації, а саме: помпаж двигуна.

Висновки

Мета дослідження у вигляді аналізу та порівняння методів оцінки трендової складової часових рядів щодо можливості їх реалізації засобами реального часу досягнута аналітичним обґрунтуванням та вирішенням тестового прикладу і аналізу реальних даних при технічній експлуатація складного енергетичного об'єкту, побудованого на основі газотурбінного двигуна.

Встановлено, що пропоновані методи оцінки трендової складової часових рядів засобами реального часу, а саме: розглянуті методи експоненційного згладжування, фільтрації Калмана, та метод сингулярного спектрального аналізу у пропонованій авторами модифікації суттєво відрізняються за показниками точності та швидкодії.

Найбільш досяжною швидкодією володіють методи експоненційного згладжування та фільтрації Калмана і відповідні їм рекурсивні алгоритми, що реалізуються у вигляді фільтрів з нескінченною імпульсною характеристикою. Але такі методи обробки часових рядів мають методичну швидкісну похибку. Така похибка може бути частково врахована при застосуванні методу фільтрації Калмана при наявності адекватної СМПД.

Найбільш досяжну точність забезпечує метод сингулярного спектрального аналізу у пропонованій авторами модифікації, але його швидкодія обмежена розмірністю вікна аналізу часового ряду. Не слід чекати, що така розмірність може бути менш, ніж 20 відліків, оскільки застосовувані статистики наявності тренду, як відомо, нормалізуються саме при перевищенні вказаного значення.

Перспективи подальших досліджень становлять застосування нейромережевих технологій щодо оцінки трендової 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. Stuar // 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. Wald, A. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation [Text] / A. Wald, & J. Wolfowitz // AMS. -1943, Vol. 14. - P. 378-388.

11. Bartels, R. The rank version of von Neumann's ratio test for randomness [Text] / R. Bartels // JASA. - 1982. - Vol. 77, № 377. - P. 40-46.

12. Korn, G. A. Mathematical Handbook [Text] / G. A. Korn, & T. M. Korn. – McGraw-Hill Book, - 1968. - 832 p.

13. Dorf, R. C. Modern Control Systems [Text] / R.C. Dorf, & R.H. Bishop. – Prentice Hall., 2004. – 832 p.

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

15. Danilova, D. L. The main components of the time series: the method of "Caterpillar" [Text] (in Russian) / D. L. Danilova, & A. A. Zhiglyavskii .– C.-P. Univ, 1997.

16. 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. Wald, A., &Wolfowitz, J. An exact test for randomness in the non-parametric case based on serial correlation. *AMS*, 1943, vol. 14, pp. 378-388.

11. Bartels, R. The rank version of von Neumann's ratio test for randomness. *JASA*, 1982, vol. 77, no. 377. pp. 40-46.

12. Korn, G. A., & Korn, T. M. *Mathematical Handbook.* McGraw-Hill Book, 1968. 832 p.

13. Dorf, R. C., & Bishop., R. H. *Modern Control Systems.* Prentice Hall, 2004. 832 p.

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

15. Ed. Danilova, D. L., & Zhiglyavskii, A. A. *The main components of the time series: the method of "Caterpillar*, C.-P. Univ, 1997.

16. 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

TREND COMPONENT DETERMINATION OF A TIME SERIES BY REAL-TIME MEANS IN THE TECHNICAL OPERATION OF COMPLEX ENERGY FACILITIES

Volodymyr Myrhorod, Iryna Hvozdeva

This study proposes an approach to determine the trend component of the time series of technical condition registration during the long-term operation of complex energy facilities by real-time means. The relevance of solving

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

the specified scientific and applied problem is due to the need for a current analysis of the technical condition of the specified facilities to establish the possibility of their operation according to the established resource. An analysis and comparison of methods for assessing the trend component of time series regarding the possibility of their implementation by real-time means is conducted using analytical justification and solution of a test case, and analysis of real data during technical operation of a complex energy facility built on the basis of a gas turbine engine.

The proposed methods for estimating the trend component of time series by real-time means, namely, the considered methods of exponential smoothing, Kalman filtering, and singular spectral analysis, differ significantly in terms of accuracy and speed. The methods of exponential smoothing and Kalman filtering and the corresponding recursive algorithms, which are implemented in the form of filters with an infinite impulse characteristic, provide the most achievable speed. However, such processing time series methods have a methodological speed error. For the first time, a new modification of the singular spectral analysis method for time series is proposed, enabling the development of high-precision, real-time algorithms. The speed of such a method for determining the trend component of the time series is limited only by the dimension of the analysis window. This study proposes a two-stage approach to the analysis of time series of technical condition registration during long-term operation of complex energy facilities. The first of these stages involves determining a trend using known trend statistics. The next stage is to determine the trend component using known and proposed methods.

Keywords: technical condition; mathematical modeling; complex energy facilities; gas turbine engine; time series; statistical model; trend assessment.

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

Гвоздева Ірина Маратівна – д-р техн. наук, 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, Head of the Department, National University "Odessa Maritime Academy", Odesa, Ukraine,
e-mail: onopchenko.im@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5797-0559.