

В. П. Квасніков, д.т.н., А. П. Стахова, к.т.н.*Національний авіаційний університет, м. Київ*

СПЕКТРАЛЬНИЙ АНАЛІЗ СИГНАЛУ ВІБРАЦІЇ З ВИКОРИСТАННЯМ ПЕРЕТВОРЕННЯ ФУР'Є

У роботі аналізується актуальне питання своєчасного виявлення та попередження небезпечного стану відповідальних машин та механізмів з використанням вібраційної діагностики, як перспективного методу. Передбачається визначення несправного стану за даними вимірювань вібрації та наступне визначення характеру несправності за даними аналізу сигналів вібрації, з використанням перетворення Фур'є. Пропонується проводити обробку вихідного сигналу з датчика, який надходить на персональний комп'ютер, де за допомогою діагностичної програми на базі MATLAB проводиться спектральний аналіз сигналу вимірюваної вібрації.

Ключові слова : вібрація, перетворення Фур'є, амплітуда, частота, фаза, спектр сигналу.

V. P. Kvasnikov, DSc, A. P. Stakhova, PhD

SPECTRAL ANALYSIS OF VIBRATION SIGNAL USING FOURIER TRANSFORM

The paper analyzes the topical issue of timely detection and prevention of a dangerous state of critical machines and mechanisms using vibration diagnostics as a promising method. It is proposed to use the method of analysis of vibration spectra in order to identify malfunctions, by processing the output signal from the sensor, which is sent to a personal computer, where a spectral analysis of the measured vibration signal is performed using a diagnostic program based on MATLAB. It is proposed to use spectral analysis, which is a traditional method of vibration diagnostics. It is supposed to determine the faulty state according to vibration measurement data and then to determine the nature of the fault according to the vibration signals analysis using the Fourier transform. It is proposed to process the output signal from the vibration sensor to a personal computer, where a spectral analysis of the measured vibration signal is carried out using a diagnostic program based on MATLAB. The use of FFT algorithms is due to a decrease in the number of operations performed, and, consequently, an increase in performance. It is shown that the decomposition of a complex signal in a Fourier series gives the components of the spectrum, which are, in narrow-band analysis, the harmonic components of the complex signal. It has been determined that narrowband spectral analysis allows detecting a larger number of faults or defects and is used for monitoring and in-depth diagnostics of equipment. Knowing the frequencies at which malfunctions of the kinematic pairs of machinery are manifested, the amplitude of the spectrum components can be used to assess their state. It was determined that spectral analysis is widely used in the processing of vibration diagnostics data, being the main and classical method of analysis. To optimize the duration of the test, it is necessary to take into account the relationship between the spectrum bandwidth and the signal accumulation time. The pass-through characteristic reflects the dependence of the signal level on time at a certain frequency, illustrating the process of signal accumulation during narrow-band spectral analysis. The narrower the analysis strip, the longer the measurements take.

Keywords: vibration, Fourier transform, amplitude, frequency, phase, signal spectrum.

DOI 10.32684/2412-5288-2022-2-21-28-33

Вступ

Необхідність підвищення ефективності виробничої діяльності характеризується збільшенням інтенсивності використання технологічних систем та обладнання, зростанням енергетичних потужностей, внаслідок чого відбувається формування негативного впливу на

надійність та безпеку промислового обладнання. Належний своєчасний огляд та ремонт обладнання дозволяє на ранніх стадіях визначати дефекти обладнання для збільшення терміну його експлуатації та підвищення надійності роботи. Завдання визначення несправностей в

механізмах є важливим, але часто громіздким і трудомістким.

Існує багато методів діагностики обладнання, і одним із методів сучасної діагностики є вібраційна діагностика [1-4]. Вібродіагностика в даний час набула широкого застосування, оскільки вібраційні процеси досить повно відображають технічний стан багатьох деталей і механічних вузлів [2-4]. Методи вібродіагностики спрямовані на виявлення та ідентифікацію таких несправностей агрегату, які впливають на його вібрацію.

Вібраційна діагностика дозволяє ідентифікувати не тільки дефектний вузол обладнання, але і сам дефект [3]. Застосування систем вібродіагностики дозволяє визначати дефект ще на стадії зародження, уникнувши аварійних зупинок машинного обладнання. Вібраційні процеси, що виникають у процесі функціонування машин і обладнання, високоінформативні, досить повно відображають технічний стан багатьох деталей і вузлів.

Найбільш поширена технологія, що передбачає визначення несправного стану за даними штатних контрольних вимірювань вібрації з наступним визначенням характеру несправності за даними вібраційних досліджень, з подальшим проведенням гармонічного аналізу вібраційних сигналів [5].

У зв'язку з тим, що на низьких частотах сигнал вібрації з датчика можна порівняти з величиною шумів вимірювальної електроніки, особливу увагу слід приділити виділенню корисного сигналу. Для цього використовується вузькосмуговий спектральний аналіз [5]. В основі такого типу аналізу лежить принцип розкладання часової реалізації сигналу в частотний спектр з рівномірним кроком по частоті за допомогою перетворення Фур'є [5].

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Для оцінки параметрів вхідного сигналу використовуються різні методи оцінки стаціонарних, нестаціонарних та нелінійних даних, що базуються на простому припущенні, що будь-які сигнали складаються з різноманітних простих внутрішніх видів коливань та відрізняються апіорними та адаптивними базисами розкладання [6-7]. Для аналізу квазідетермінованих та випадкових дискретних електричних вимірювальних сигналів у багатьох предметних областях проблемою є кінцівка інтервалу вимірювання та приховані періодичні, майже періодичні та ангармонічні сигнали, що потребує застосування поряд з часовою формою також частотної та частотно-часової форм подання [8]. Наприклад,

якщо частоти складових відомі, то для визначення невідомих амплітуд та фаз складного сигналу можна застосувати алгоритм, який використовує дискретне синус-косинусне перетворення Фур'є [9]. У роботі [10] розглянуто цифровий спосіб визначення початкової фази гармонічного сигналу при частоті відліків менше частоти Найквіста. При флуктуаціях параметрів гармонічних складових у роботі [11] отримано оцінки середньої потужності сигналу з флуктуацією фаз складових гармонічних коливань та аналітичні вирази для розподілу зазначеної оцінки.

Метод, що використовує швидке перетворення Фур'є (ШПФ), дозволяє проводити розділення та оцінку параметрів складових вхідного сигналу і дає стійке розкладання сигналу на прості складові за відсутності апіорних відомостей про частоти сумарного сигналу. У роботі [12] описано алгоритм оцінки амплітуди, а роботі [13] наведено складний алгоритм обчислення амплітуд і фаз досліджуваного сигналу з двох складових.

Мета статті – розробити метод аналізу спектрів вібрації з метою ідентифікації несправностей, шляхом аналізу простих періодичних складових вхідного вібраційного сигналу при спектральному аналізі з використанням ШПФ, для подальшої обробки вихідного сигналу з датчика, який надходить на персональний комп'ютер, де за допомогою діагностичної програми на базі MATLAB проводиться спектральний аналіз сигналу вимірної вібрації.

Виклад основного матеріалу

Спостерігаючи за зміною форми досліджуваного сигналу не завжди дозволяє отримати повну інформацію про зміни які несе сигнал. Малі спотворення в формі синусоїдальних коливань відповідають наявності у складі сигналу додаткових гармонічних складових. Вони маскуються потужною гармонікою несучої частоти і можуть бути отримані тільки з використанням спектрального аналізу. Усі методи спектрального аналізу поділяються на дві групи – аналогові та цифрові (обчислювальні).

Аналогові методи зазвичай використовують вузькосмугову фільтрацію сигналу для виділення гармонічних складових. Обчислювальні методи включають оцифрування сигналу та розрахунок спектра з використанням алгоритмів цифрової фільтрації або швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) [5].

З найчастіше використовуваних засобів вимірювань, реалізованих з використанням

обчислювальної техніки, можна назвати аналізатори форми, спектральні аналізатори і аналізатори спектра обвідної. Функції аналізатора форми полягають у вимірюванні амплітуд та фаз окремих складових сигналу та у порівняльному аналізі форми окремих ділянок сигналу, початок та закінчення яких визначається кутом повороту валу.

Цифрові аналізатори виробляються під певну групу близьких за принципом обробки сигналів технологій, і лише деякі з них розраховані на використання всіх відомих технологій.

Як правило, у всіх видах аналізаторів передбачено вузькосмуговий спектральний аналіз сигналів і дуже рідко – спектральний аналіз обвідної смугового сигналу, необхідний для використання інформаційної технології за методом обвідної. Причина полягає в тому, що для такого виду аналізу при обмежених обсягах пам'яті в аналізаторі доводиться замість одного процесора, як це має місце в персональному комп'ютері, мати два паралельні процесори. Один із них, сигнальний, служить для попередньої обробки високочастотних сигналів у реальному часі.

До аналізаторів спектра також можна підключати інші вимірювальні прилади для більш детальної діагностики, тим самим досягаючи мінімуму витрат на моніторинг і діагностику великої кількості віддаленого один від одного обладнання.

На рис. 1 зображено приклад підключення вібродіагностичного обладнання. При цьому кількість блоків для вимірювань та аналізу сигналів у стаціонарних системах зазвичай визначається числом точок контролю та гранично допустимим інтервалом між вимірюваннями. Зазвичай, кількість датчиків в одному блоці може становити від одного до кількох десятків. У функції блока вимірювань входить аналіз вібрації або шуму, а також інших фізичних величин за програмою, що задається діагностичним центром. Алгоритми програми автоматично змінюються в залежності від результатів вимірювань та проведення діагностування, тобто від стану об'єкта контролю. Іноді функції блока вимірювань входить і порівняння результатів вимірювань та аналізу з порогоми, що задають межі допустимої зміни діагностичних параметрів. Якщо ж допустимий час між періодичними вимірюваннями досить великий, у системі може використовуватися один блок, до якого датчики підключаються через електронні пристрої комутації сигналів. Блок вимірювань при цьому

може конструктивно поєднуватися в один корпус з діагностичним центром.

Перспектива розвитку стаціонарних систем моніторингу пов'язана також із розвитком можливостей мікрокомп'ютерів. Результатом цього розвитку може стати розділення функцій між блоками вимірювань та діагностичним центром. Блок вимірювань може взяти на себе функції моніторингу, що звертається до діагностичного центру лише при появі дефектів з метою їхньої ідентифікації. За таких умов, одна система для діагностики може працювати з великою кількістю блоків, що проводять вимірювання в різних точках, контролюючи стан устаткування.

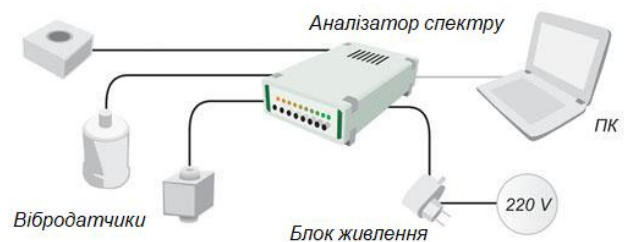


Рисунок 1 – Схема підключення вібродіагностичного обладнання

Основними діагностичними ознаками появи дефектів у системах моніторингу та діагностики є наступні:

- зростання амплітуди окремих складових у спектрі вібрації;
- зростання ефективного значення групи складових спектра вібрації у вибраній смузі частот;
- поява модуляції окремих гармонійних складових вібрації гармонійним або низькочастотним випадковим процесом;
- поява модуляції випадкових складових вібрації у вибраній смузі частот гармонійним або низькочастотним випадковим процесом;
- зміна форми періодичних коливань об'єкта, що супроводжується зміною співвідношення амплітуд складових в гармонійному ряді.

Для виявлення, ідентифікації виду та величини дефекту результати кількісної оцінки діагностичних параметрів порівнюються з еталонами бездефектних машин та їх вузлів, з еталонами різних дефектів.

Завдання вивчення як шкідливої, так і корисної вібрації об'єднані загальним теоретичним апаратом, застосуванням однакових методів технічного розрахунку та однаковою апаратурою, що застосовується для проведення

контролю, вимірювання та аналізу вібраційних сигналів.

Механічні коливання можна розглядати у часовій області, у якій найважливішою є залежність амплітуд від часу (часовий розвиток). Ця залежність може бути детермінованою, тобто така, що піддається опису математичними виразами, або стохастичною, тобто такою, що допускає опис лише статистичними функціями.

Фізичними характеристиками механічних коливань частотної області є розподіл їх амплітуд по частоті, тобто, їхній частотний спектр. Характеристики коливань в цих двох областях пов'язані між собою перетворенням Фур'є.

Форма і частотний склад вібраційних процесів визначається характером збуджуючих сил і передачею цих збуджень до того місця, де розташовується первинний вимірювальний перетворювач. У більшості випадків форма сигналу має вигляд складних коливань, які містять детерміновану і випадкову складові вібраційного процесу. Як форма, так і спектральний склад сигналу залежать від вимірюваного параметра вібрацій. На практиці вимірюють переміщення, швидкість чи прискорення.

За допомогою середовища програмування MATLAB запропоновано проводити моніторинг і аналіз вібраційних параметрів та збереження результатів вібраційних досліджень. Середовище MATLAB [14, 15] дозволяє використовувати спектральний аналіз сигналу вимірюваної вібрації. Такий аналіз застосовують з метою виявлення складових в частотній області. Адекватною сферою його використання є дослідження різного виду стаціонарних сигналів, що складаються з суми складових з постійним періодом. Зазначений метод базується на прямому перетворенні Фур'є [5].

Специфіка проведення аналізу сигналу на основі перетворення Фур'є простежується при аналізі сигналів з постійним періодом (наприклад, гармонійного). Для цього дійсний сигнал [5]:

$$\begin{aligned} x(t) &= A_1 \cos(\omega t + \varphi_1) = \\ &= a_1 \cos(\omega_1 t) + b_1 \sin(\omega_1 t) \end{aligned} \quad (1)$$

з періодом T розкладають в ряд Фур'є по кратних частотах. Цей ряд може бути представлений в тригонометричній формі [5]:

$$\begin{aligned} x(t) &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n) = \\ &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega_1 t) + b_n \sin(n\omega_1 t)] \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) dt, \quad (3)$$

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \cos(n\omega_1 t) dt,$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) \sin(n\omega_1 t) dt,$$

де a_n, b_n – коефіцієнти.

У комплексній формі:

$$x(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n^* e^{jn\omega_1 t}, \quad (4)$$

$$A_n^* = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-jn\omega_1 t} dt, \quad (5)$$

де A_n^* – комплексний коефіцієнт.

Для неперіодичного сигналу ряд Фур'є замінюється інтегралом Фур'є [5]:

$$x(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S^*(\omega) e^{j\omega t} d\omega, \quad (6)$$

$$S^*(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t) e^{-j\omega t} dt. \quad (7)$$

Вираз (6) називається оберненим інтегральним перетворенням Фур'є, вираз (7) – перетворенням Фур'є. У цих перетвореннях замість амплітуди використовується поняття спектральної складової $S^*(\omega)$ сигналу.

В даний час широко використовуються різні дискретні алгоритми, що реалізують Фур'є-перетворення. Провівши дискретизацію $x(t)$ і виконавши відповідні заміни ($\omega = 2\pi n/N$, де N – кількість відліків на досліджуваному проміжку часу $(0; T)$), вирази (6) і (7) можна записати у наступному вигляді:

$$S_n^* = \sum_{i=0}^{N-1} x_i e^{-j \frac{2\pi}{N} ni}; \quad (8)$$

$$x_i = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N S_n^* e^{j \frac{2\pi}{N} ni}. \quad (9)$$

Наведена вище система рівнянь вимагає виконання N^2 обчислювальних операцій. В силу того, що коефіцієнти у виразі (9) є сполученими, з'являється можливість розбиття вихідної матриці на матриці з кількістю елементів, що не перевищує $\log_2 N$, кожна з яких містить 2 ненульових числа. Подібне перетворення носить назву «швидке перетворення Фур'є». Подібний математичний апарат дозволяє проводити більш глибокі дослідження сигналів вібрації обладнання, проводити локалізацію сигналу в частотній області, що дозволяє представити сигнал у вигляді окремих адитивних складових. Дані складові мають характерні особливості для кожного окремого дефекту, що дозволяє не тільки інтегрально оцінити технічний стан обладнання, але й з певним ступенем достовірності ідентифікувати вид дефекту досліджуваного обладнання.

Було проведено імітаційне комп'ютерне моделювання, моделювався результуючий сигнал, що був утворений накладанням одиничних сигналів. На рис. 2 наведено результат моделювання результуючого сигналу.

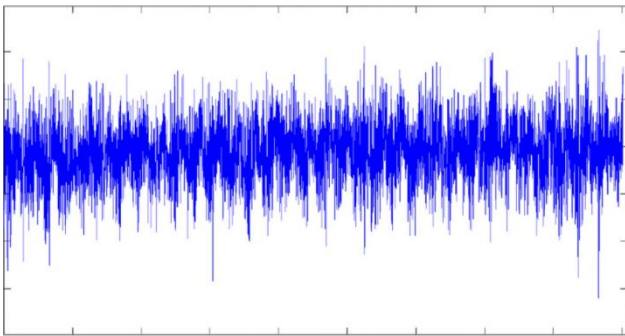


Рисунок 2 – Моделювання результуючого Сигналу

На рис. 3 наведено амплітудний спектр змодельованого результуючого сигналу.

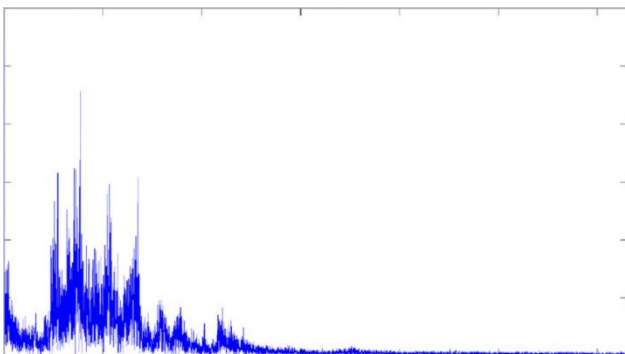


Рисунок 3 – Спектр змодельованого результуючого сигналу

Висновки

Вирішуючи завдання ідентифікації дефектів машинного обладнання в роботі було запропоновано використовувати аналіз сигналів вібрації з використанням перетворення Фур'є. Запропоновано проводити обробку вихідного сигналу з датчика, який надходить на персональний комп'ютер, де за допомогою діагностичної програми на базі MATLAB проводиться спектральний аналіз сигналу вимірної вібрації.

Проведення моделювання результуючого сигналу дозволяє отримати експериментальні дані щодо можливості ідентифікації різного виду несправностей на основі результатів спектрального аналізу. Розкладання складного сигналу в ряд Фур'є дає складові спектру, що представляють собою при вузькосмуговому аналізі гармонічні складові сигналу. Допущена думка, що вузькосмуговий спектральний аналіз дозволяє виявити більшу кількість несправностей або дефектів та використовується для моніторингу та глибокої діагностики обладнання. Знаючи частоти, на яких виявляються несправності кінематичних пар механізмів, за амплітудою складових спектра можна оцінити їх стан.

Список використаних джерел

1. Boreanaz G., Celiberti L., and Falasca V. (2007, January). In-plant fast diagnostics of vibration-acoustic quality of cars. In SAE 2007 Noise and Vibration Conference and Exhibition (No. 2007-01-2211).
2. Malla C., Panigrahi I. Review of condition monitoring of rolling element bearing using vibration analysis and other techniques. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2019, 7(4), pp. 407-414.
3. Tandon N., Choudhury A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the detection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*. 1999, 32(8), pp. 469-480.
4. Aherwar A. An investigation on gearbox fault detection using vibration analysis techniques: A review. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2012, 10(2), pp. 169-183.
5. Amick H., Bui S. K. Review of several methods for processing vibration data. *Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology*. 1992, 1619, pp. 253-264.
6. Mallat S. (2009). A wavelet tour of signal processing: the sparse way. AP Professional, Third Edition, London.

7. J. MAX et J.L. LACOUME, Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques, 5e édition, Masson 1996.

8. Пономарев В. А., Пономарева О. В. Тенденции развития дискретных косвенных измерений параметров электрических сигналов. *Метрология*. 2017. № 1. С. 20-32.

9. Казанцев Ю. И., Музалевский В. Е., Пруголо А. В. Метрологическое обеспечение измерений коэффициента гармоник низкочастотных радиотехнических сигналов. *Измерительная техника*. 2013. № 8. С. 45-49.

10. Лазо Ю. Н., Турыгин В. С. Цифровой способ определения начальной фазы гармонического сигнала при частоте отсчетов меньше частоты Найквиста. *Измерительная техника*. 2019. № 7. С. 64-57.

11. Засыпкин Ю. А., Розина О. Ю. Оценка средней мощности сигнала с флуктуацией фаз составляющих гармонических колебаний при апертурной неопределенности аналого-цифрового преобразователя. *Измерительная техника*. 2018. № 10. С. 50-56.

12. Ленков С. В. Измерение амплитуд гармоник периодического сигнала с помощью алгоритма быстрого преобразования Фурье. *Измерительная техника*. 2006. № 2. С. 51-53.

13. Ленков С. В., Молин С. М. Измерение амплитуды, частоты и фазы периодических составляющих коротких реализаций суммарного сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье. *Измерительная техника*. 2009. № 10. С. 23-30.

14. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.

15. Лазарев Ю. Ф. Математическое моделирование физических процессов и технических систем в MATLAB. К.: 2004. 474 с.

References

1. Boreanaz G., Celiberti L., and Falasca V. (2007, January). In-plant fast diagnostics of vibration-acoustic quality of cars. In SAE 2007 Noise and Vibration Conference and Exhibition (No. 2007-01-2211).

2. Malla C., Panigrahi I. Review of condition monitoring of rolling element bearing using vibration analysis and other techniques. *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. 2019, 7(4), pp. 407-414.

3. Tandon N., Choudhury A. A review of vibration and acoustic measurement methods for the de-

tection of defects in rolling element bearings. *Tribology international*. 1999, 32(8), pp. 469-480.

4. Aherwar A. An investigation on gearbox fault detection using vibration analysis techniques: A review. *Australian Journal of Mechanical Engineering*. 2012, 10(2), pp. 169-183.

5. Amick H., Bui S. K. Review of several methods for processing vibration data. *Vibration Control in Microelectronics, Optics, and Metrology*. 1992, 1619, pp. 253-264.

6. Mallat S. (2009). A wavelet tour of signal processing: the sparse way. AP Professional, Third Edition, London.

7. Max J. et Lacoume J. L. Méthodes et techniques de traitement du signal et application aux mesures physiques, 5e édition, Masson 1996.

8. Ponomarev V. A., Ponomareva O. V. Tendencii razvitiya diskretnyx kosvennyx izmerenij parametrov e'lektricheskix signalov. *Metrologiya*. 2017. № 1. С. 20-32.

9. Kazancev Yu. I., Muzalevskij V. E., Pruglo A. V. Metrologicheskoe obespechenie izmerenij koefficienta garmonik nizkochastotnyx radiotekhnicheskix signalov. *Izmeritel'naya texnika*. 2013. № 8. С. 45-49.

10. Lazo Yu. N., Turygin V. S. Cifrovoy sposob opredeleniya nachal'noj fazy garmonicheskogo signala pri chastote otschetov men'she chastoty Najkvista. *Izmeritel'naya texnika*. 2019. № 7. С. 64-57.

11. Zasyppkin Yu. A., Rozina O. Yu. Ocenka srednej moshhnosti signala s fluktuaciej faz sostavlyayushhix garmonicheskix kolebanij pri aperturnoj neopredelennosti analogo-cifrovogo preobrazovatelya. *Izmeritel'naya texnika*. 2018. № 10. С. 50-56.

12. Len'kov S. V. Izmereniye amplitud garmonik periodicheskogo signala s pomoshch'yu algoritma bystrogo preobrazovaniya Fur'ye. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2006. № 2. С. 51-53.

13. Len'kov S. V., Molin S. M. Izmereniye amplitudy, chastoty i fazy periodicheskikh sostavlyayushchikh korotkikh realizatsiy summarnogo signala s ispol'zovaniyem bystrogo preobrazovaniya Fur'ye. *Izmeritel'naya tekhnika*. 2009. № 10. С. 23-30.

14. Chernyx I. V. Modelirovanie e'lektrotekhnicheskix ustrojstv v MATLAB, SimPowerSystems i Simulink. М.: ДМК Пресс, 2008. 288 с.

15. Lazarev Yu. F. Matematicheskoe modelirovanie fizicheskix processov i texnicheskix sistem v MATLAB. К.: 2004. 474 с.

Надійшла до редакції 12.12.2022