

УДК 621.391.8.029

doi: 10.32620/aktt.2021.5.09

О. Д. АБРАМОВ, Ю. В. С'ЄДИНА, А. Ю. НИКОЛАЄВ, А. А. БОНДАРЄВ

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «ХАІ», Україна

## АЛГОРИТМ ОЦІНЮВАННЯ ЧАСТОТИ КОМПЛЕКСНОГО ГАРМОНІЧНОГО СИГНАЛУ З СЕГМЕНТАЦІЄЮ ДАНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

Предметом вивчення в статті є технології оцінювання частоти гармонічних компонент в умовах наявності адитивних нормальних завад для вирішення прикладних завдань спектрального аналізу. Мета роботи: розробка методології синтезу алгоритмів визначення частоти комплексного гармонічного сигналу за дискретними відділками процесу який спостерігається при використанні сегментації даних. Завдання: за модельними уявленнями та вимогами, які відповідають проблемам сучасного стану практики спектрального аналізу, розробити оптимальну за критерієм максимальної правдоподібності технологію визначення частоти гармонічної компоненти процесу, наданого кінцевим числом дискретних відсіків. Отримані такі результати. Вирішена задача до оцінювання частоти гармоніки по сегментованим даним в умовах присутності адитивних гаусових завад в спостереженнях, що базується на методі максимальної правдоподібності. Наведені алгоритм обробки та наслідки цифрового моделювання синтезованої технології оцінювання за заданою кількістю дискретних відліків процесу. Проведено аналіз як практичної спроможності технології визначення оцінки так і певних якісних показників оцінок. Висновки. Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному: надбали подальший розвиток як метод вирішення задач оцінювання частоти гармонічного сигналу за невеликою кількістю вибірових значень процесу в умовах адитивних нормальних завад, так і методи оптимізації структури цифрової обробки спостережень при сегментації даних. Синтезована технологія для визначення оцінок використовує одну вибірку спостережень, що забезпечує оперативність обробки інформації при досить простій програмній реалізації. Використання сегментації в технологічному процесі цифрової обробки спостережень дозволяє одержати оцінки, якісні показники яких відповідають показникам оцінок максимальної правдоподібності. Для однозначного оцінювання виникає необхідність в усуненні неоднозначності. При виконанні цих умов технологія при заданій кількості вибірок дозволяє суттєво розрішити діапазон відносин сигнал/завада при яких можуть бути отримані практична незміщені оцінки.

**Ключові слова:** сегментовані дані; метод максимальної правдоподібності; спектральний аналіз; оцінювання частоти.

## Введення

Відомі сучасні технології обробки вибірових спостережень, отримані на базі власно структурних методів, за допомогою яких спеціалісти намагаються вирішити на сьогоднішній день основні задачі спектрального аналізу, зокрема, задачі оцінювання частоти гармонічних компонент [1-8]. Тим не менш обчислювальні аспекти та якісні показники оцінки при використанні вказаних технологій і їх модифікацій в умові невеликої кількості вибірових значень спостережень не задовольняє вимоги радіотехнічної практики [2-8].

Мета роботи: розробка методології синтезу алгоритмів оцінювання частоти комплексного гармонічного сигналу за дискретними відділками процесу який спостерігається при використанні сегментації

даних. В статті на базі метода максимальної правдоподібності вирішена задача до визначення частоти гармонічного комплексного сигналу за сегментованими вибіровими значеннями спостережень, отримано алгоритм їх обробки, проведено цифрове моделювання, яке підтвердило наслідки теоретичних досліджень

## Постановка задачі

Нехай на інтервалі спостереження  $T$  задана послідовність відліків  $\dot{U}_n$  ( $n = 1, 2, \dots, L$ ):

$$\dot{U}_n = \dot{S}_n + \dot{\epsilon}_n \quad (1)$$

тимчасового процесу  $\dot{U}(t), t \in (0, T)$ .

Тут:

$$\dot{S}_n = \dot{E}_0 \exp(j2\pi f_0 n \Delta t) \quad (2)$$

сигнальна складова спостереження (1) з невідомою амплітудою  $\dot{E} = |\dot{E}| \exp(j\varphi_0)$  і частотою  $f_0$  із заданого діапазону  $|f_0| \leq F$ ,  $|\dot{E}|$  і  $\varphi_0$  - інтенсивність та початкова фаза комплексної амплітуди  $\dot{E}$ ,  $\dot{\varepsilon}_n$  - n-й відлік нормального комплексного випадкового процесу  $\dot{\varepsilon}(t)$  з нульовим середнім та дисперсією  $2\sigma_0^2 = 2FN_0$ ,  $N_0$  - постійна в заданій смузі частот спектральна інтенсивність,  $\Delta t = \frac{1}{2F}$  - крок дискретизації.

Потрібно на основі спостережень  $U_n$  ( $n \in \overline{1, L}$ ) отримати оцінку  $\hat{f}_0$  частоти  $f_0$  при невідомих  $|\dot{E}|, \varphi_0, \sigma_E^2 = 2\sigma_0^2$ .

### Рішення задачі

Використовуючи основи методологічних положень ESPRIT [2, 3], представимо спостереження в виді сукупності непересічних (сегментованих) векторів  $\bar{U}_0$  і  $\bar{U}_1$ :

$$\bar{U}_K = \begin{bmatrix} \bar{U}_0 \\ \bar{U}_1 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

де

$$\begin{aligned} \bar{U}_0^T &= (\bar{U}_1, \bar{U}_2, \dots, \bar{U}_{L-K}), \\ \bar{U}_1^T &= (\bar{U}_{K+1}, \bar{U}_{K+2}, \dots, \bar{U}_L). \end{aligned} \quad (4)$$

Знак «Т» над символом в (4) означає операцію транспонування, а  $K$  – коефіцієнт прорідження.

Будемо вважати, що:

$$\dot{\lambda} = \exp(j2\pi f_0 \Delta t) \quad (5)$$

є коренем рівняння:

$$x(\dot{\lambda}^K) = C_0 + C_K \dot{\lambda}^K = 0. \quad (6)$$

Оскільки вектор спостереження  $\bar{U}$  містить сигнальну та шумову компоненту, то можна записати:

$$\tilde{H}_K \bar{U} = \bar{\eta}_K. \quad (7)$$

Тут матриця перетворення  $\tilde{H}_K$  розмірністю  $\dim \tilde{H}_K = (L-K) \times L$  така:

$$\tilde{H}_K = \begin{bmatrix} C_0 & 0 & 0 & 0 & \dots & C_K & 0 & 0 & 0 \\ 0 & C_0 & 0 & 0 & \dots & 0 & C_K & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & C_0 & \dots & 0 & 0 & 0 & C_K \end{bmatrix}, \quad (8)$$

а  $\bar{\eta}_1^T = (\eta_1, \eta_2, \dots, \eta_{L-K})$ .

Не важко показати, що гаусова шумова компонента  $\bar{\eta}$  в (7) має нульове математичне очікування і кореляційну матрицю  $\tilde{R}_K = \delta^2 \tilde{I}_K$ , зв'язаною з квадратом  $\|\bar{C}\|^2$  норми  $\|\bar{C}\|$  вектора  $\bar{C}^T = (C_0, C_K)$  рівністю:

$$\tilde{R}_K = 2\sigma_0^2 \|\bar{C}\|^2 \tilde{I}_K = 2\sigma_0^2 \tilde{H}_K \tilde{H}_K^+. \quad (9)$$

В останній рівності: знак «+» означає операцію сполучення по Ерміту відповідної матриці,  $\tilde{I}_K$  - одинична діагональна матриця  $\dim \tilde{I}_K = (L-K) \times (L-K)$ .

Визначення (7) і (9) дозволяють записати функцію правдоподібності  $W(\bar{U}/\bar{C})$  вектора спостереження  $\bar{U}$  відносно  $\bar{C}$  при заданому  $K$  у вигляді:

$$\begin{aligned} W(\bar{U}/\bar{C}) &= \left( \frac{1}{(2\pi)^{(L-K)} |\hat{R}_K|} \right)^{\frac{1}{2}} \times \\ &\times \exp\left\{ -\frac{1}{2} (\tilde{H}_K \bar{C})^+ \hat{R}_K^{-1} (\tilde{H}_K \bar{C}) \right\}. \end{aligned} \quad (10)$$

Оскільки

$$\tilde{H}_K \bar{U} = \tilde{N}_K \bar{C}, \quad (11)$$

де

$$\tilde{N}_K = \begin{bmatrix} \dot{U}_1 & \dot{U}_2 & \dots & \dot{U}_{L-K} \\ \dot{U}_{K+1} & \dot{U}_{K+2} & \dots & \dot{U}_L \end{bmatrix}, \quad (12)$$

а  $\hat{R}_K$  (9) діагональна, мінімум  $\inf_{\bar{C}} [(\tilde{H}_K \bar{U})^+ \hat{R}_K^{-1} (\tilde{H}_K \bar{U})]$  при фіксованому  $\|\bar{C}\|^2$  досягається, якщо вектор  $\bar{C}$  дорівнює власному вектору  $\bar{V}_1$  матриці  $T_K$ :

$$\tilde{T}_K = \tilde{N}_K^+ \tilde{N}_K = \begin{bmatrix} \tilde{U}_0^+ \tilde{U}_0 & \tilde{U}_0^+ \tilde{U}_1 \\ \tilde{U}_1^+ \tilde{U}_0 & \tilde{U}_1^+ \tilde{U}_1 \end{bmatrix}, \quad (13)$$

який відповідає її мінімальному власному числу  $v_1$  [9].

Враховуючи відомий зв'язок між власними значеннями та власними векторами матриці [9] приходимо до висновку: складові власного вектора  $\tilde{V}_1$  являються максимально правдоподібними оцінками  $\hat{C}_0$  і  $\hat{C}_K$  складових вектора  $\tilde{C}$ .

Знаючи  $\hat{C}_0$  і  $\hat{C}_K$  дозволяють вирішити відносно  $\hat{\lambda}^K$  поліном (6), а потім на підставі рівності (5) отримати оцінку  $\hat{f}_0$ .

$$\hat{f}_0 = \frac{1}{2\pi k \Delta t} \left\{ \arctg \frac{\text{Im} \hat{\lambda}^K}{\text{Re} \hat{\lambda}^K} + m\pi \right\}, \quad (14)$$

де  $m=1,2,\dots$

Значення  $\hat{f}_0$  може визначатися неоднозначно. Для отримання однозначного результату потрібно знати додаткові «грубі» значення  $\hat{f}_0$ . Це можливо досягти, вважаючи, що  $K = 1, 2, \dots, t$  та відповідно вираховуючи  $\hat{\lambda}, \hat{\lambda}^2, \dots, \hat{\lambda}^t$ .

В обчислювальному плані процедура прийняття рішення допускає спрощення. Зокрема, вважаючи  $C_0 = 1$ , числовим значенням  $\hat{\lambda}^K$ , що витікає із вище наведеного, може слугувати нормована величина  $\tilde{U}_0^+ \tilde{U}_1$ :

$$\hat{\lambda}^K = \frac{\tilde{U}_0^+ \tilde{U}_1}{|\tilde{U}_0^+ \tilde{U}_1|}. \quad (15)$$

Якісні показники алгоритми оцінювання частоти гармоніки по кінцевому числу відліків процесу  $\dot{U}(t)$  ілюструють результати, отримані на рівні цифрового статичного моделювання, проведенні при наступних вихідних даних.

Послідовність  $\dot{U}_1, \dot{U}_2, \dots, \dot{U}_L$  складається з адитивної суміші комплексної гармоніки з постійною  $|\dot{E}|$ , частотою  $f_0 = 2\text{Гц}$  та  $L$  незалежних відліків нормальної завади з нульовим математичним очікуванням. Для першого експерименту:  $L=16, K=10, f_0 \Delta t = 0,521$  (табл. 1). Для оцінки частоти  $f_0$  використовується спрощений алгоритм, визначається співвідношеннями (14) і (15).

Цифровий матеріал з таблиці 1 ілюструю залежність якісних показників оцінок  $\langle \hat{f}_0 \rangle$  дисперсії  $\sigma_{\hat{f}_0}^2$

оцінок частоти  $f_0$  від відношення сигнал/шум  $g = |\dot{E}|^2 / 2\sigma_0^2$ . Оціночне значення отримане при усередненні результатів на 50 реалізацій шумового вектора.

Цифровий матеріал з таблиці 2: залежність якісних показників оцінок  $\hat{f}_0$  від відношення сигнал/шум для другого випадку ( $L=32, K=20, f_0 \Delta t = 0,521$ ).

Таблиця 1

Якісні показники оцінок частоти сигналу

g	$\langle \hat{f}_0 \rangle$	$\sigma_{\hat{f}_0}^2$
8	1,997	$6,83 \times 10^{-5}$
4	1,994	$1,74 \times 10^{-4}$
2,67	1,981	$8,584 \times 10^{-4}$
2	1,98	$1,19 \times 10^{-3}$

Таблиця 2

Якісні показники оцінок частоти сигналу

g	$\langle \hat{f}_0 \rangle$	$\sigma_{\hat{f}_0}^2$
8	2	$1,275 \times 10^{-5}$
4	1,994	$4,764 \times 10^{-5}$
2,67	1,997	$8,259 \times 10^{-5}$
2	1,993	$1,935 \times 10^{-4}$

Для зіставлення, в таблиці 3 приведені числові значення оцінки  $\langle \hat{f}_0 \rangle$ , отримані при оцінюванні, яке базується на використанні дискретного перетворення Фурь'є [10]. Дані отримані при  $L=32, f_0 \Delta t = 0,521, f_0 = 2\text{Гц}$ .

Таблиця 3

Якісні показники оцінок частоти сигналу

g	8	4	2,67	2
$\langle \hat{f}_0 \rangle$	2,7	2,95	3	4,225

### Висновки

Наведені теоретичні та практичні дослідження дозволяють зробити наступні висновки.

Синтезована технологія одержаних оцінок частоти комплексної гармоніки завдяки використанню сегментації проста в обчисленні.

Алгоритм обробки використовує одну вибірку спостережень, але для однозначного оцінювання потрібно усунення неоднозначності, що потребує з практичної точки зору подальших досліджень.

На відмінність від відомої технології/ (використання дискретного перетворення Фур'є) правила при невеликому числі вибірок спостережень та усуненні неоднозначності дозволяє отримати практично незміщені оцінки.

## Література

1. Марпл–мл., С. Л. Цифровой спектральный анализ и его приложения [Текст] : пер. с англ. / С. Л. Марпл–мл. – М. : Мир, 1990. – 584 с.

2. Василишин, В. И. Повышение эффективности спектрального анализа методом ESPRIT с использованием технологии сурогатных данных [Текст] / В. И. Василишин // Прикладная радиоэлектроника. – 2013. – Т. 12, № 3. – С. 400-407.

3. Василишин, В. И. Предварительная обработка сигналов с использованием метода SSA в задаче спектрального анализа [Текст] / В. И. Василишин // Прикладная радиоэлектроника. – 2014. – Т. 13, № 1. – С. 43-50.

4. Multi-component instantaneous frequency estimation using signal decomposition and time-frequency filtering [Text] / J. Akram, N. A. Khan, S. Ali et al. // SIViP. – 2020. – Vol. 14, Iss. 8. – P. 1663–1670. – DOI: 10.1007/s11760-020-01711-6.

5. Signal Frequency Estimation Based on RNN [Text] / B. Huang, C. -L. Lin, W. Chen, C. F. Juang, X. Wu // 2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC). – Hefei, China, 2020. – P. 2030-2034. DOI: 10.1109/CCDC49329.2020.9164504.

6. Yu, Su. Digital Instantaneous Frequency Measurement of a Real Sinusoid Based on Three Sub-Nyquist Sampling Channels [Text] / Yu Su, Defu Jiang // Mathematical Problems in Engineering. – Vol. 2020. – Article ID: 5089761. – 11 p. – DOI: 10.1155/2020/5089761.

7. Абрамов, А. Д. Тест для обнаружения гармонического сигнала при разрывных наблюдениях [Текст] / А. Д. Абрамов, Т. А. Петрунина, Т. И. Москаленко // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2008. – №2(29). – С. 31-35.

8. Восстановление когерентных изображений поверхностей в зоне Френеля методами многоканальной обработки сигналов [Текст] / В. К. Волосюк, С. С. Жила и др. // Радиоэлектронні і комп'ютерні системи. – 2018. – № 3(87). – С. 97-102. DOI: 10.32620/reks.2018.3.10.

9. Корн, Г. Справочник по математике [Текст]: пер. с англ. / Г. Корн, Т. Корн ; под общ. ред. И. Г. Арамановича. – М. : Наука, 1973. – 832 с.

10. Фалькович, С. Е. Статистическая теория измерительных радиосистем [Текст] / С. Е. Фалькович, Э. Н. Хомяков. – М. : Радио и связь, 1981. – 288 с.

## References

1. Marple Jr., S. L. *Cifrovoj spektral'nyj analiz i ego prilozhenija* [Digital spectral analysis and its applications]. Moscow, "Mir" Pub., 1990. 584 p.

2. Vasilishin, V. I. *Povyshenie jeffektivnosti spektral'nogo analiza metodom ESPRIT s ispol'zvaniem tehnologii surogatnyh dannyh* [Increasing the efficiency of spectral analysis by the ESPRIT method using surrogate data technology]. *Prikladnaja radioelektronika – Applied radioelectronics*, 2013, vol. 12, no. 3, pp. 400-407.

3. Vasilishin, V. I. *Predvaritel'naja obrabotka signalov s ispol'zovaniem metoda SSA v zadachi spektral'nogo analiza* [Increasing the efficiency of spectral analysis by the ESPRIT method using surrogate data technology]. *Prikladnaja radioelektronika – Applied radioelectronics*, 2013, vol. 12, no. 3, pp. 43-50.

4. Akram, J., Khan, N. A., Ali, S. et al. Multi-component instantaneous frequency estimation using signal decomposition and time-frequency filtering. *SIViP*, 2020, vol. 14, iss. 8, pp. 1663–1670. DOI: 10.1007/s11760-020-01711-6.

5. Huang, B., Lin, C.-L., Chen, W., Juang, C.-F., Wu, X. Signal Frequency Estimation Based on RNN, *2020 Chinese Control And Decision Conference (CCDC)*, Hefei, China, 2020, pp. 2030-2034, DOI: 10.1109/CCDC49329.2020.9164504.

6. Yu, Su., Defu, Jiang. Digital Instantaneous Frequency Measurement of a Real Sinusoid Based on Three Sub-Nyquist Sampling Channels. *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2020, Article ID: 5089761. 11 p. DOI: 10.1155/2020/5089761.

7. Abramov, A. D., Petrunina, T. A., Moskalenko, T. I. Test dlja obnaruzhenija garmonicheskogo signala pri razryvnyh nabljudenijah [The task of detection of the complex harmonic signal in the presence of totally independent observation intervals]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2008, no. 2 (29), pp. 31-35.

8. Volosyuk, V. K., Zhila, S. S., Cherepnin, H. S., Tserne, E. A. *Vosstanovlenie kogerentnyh izobrazhenij poverhnostej v zone Frenelja metodami mnogokanal'noj obrabotki signalov* [Recovery of surfaces coherent images in the fresnel region by the methods of multichannel signal processing]. *Radioelektronni i komp'uterni sistemi – Radioelectronic and computer systems*, 2018, no. 3(87), pp. 97-102. DOI: 10.32620/reks.2018.3.10.

9. Korn, G., Korn, T. *Spravochnik po matematike* [Handbook of mathematics]. Moscow, "Nauka" Publ., 1973. 832 p.

10. Falkovich, S. E., Khomyakov, E. N. *Statisticheskaja teorija izmeritel'nyh radiosistem* [Statistical theory of measuring radio systems]. Moscow, "Radio i svjaz" Pub., 1981. 288 p.

*Поступила в редакцию 14.08.2021, рассмотрена на редколлегии 23.09.2021*

#### ALGORITHM FOR ESTIMATING THE FREQUENCY OF A COMPLEX HARMONIC SIGNAL WITH SEGMENTATION OF OBSERVATION DATA

*A. Abramov, Yu. Siedina, A. Nikolaev, A. Bondarev*

The article deals with the technology of estimating the frequency of harmonic components in the presence of additive normal interferences for solving applied problems of spectral analysis. Objective: to develop a methodology for the synthesis of algorithms for determining the frequency of a complex harmonic signal in discrete sections of the process, this is observed when using data segmentation. Objective: to develop the optimal technology for determining the frequency of the hormonal component of the process, provided by a finite number of discrete compartments, according to model representations and requirements that meet the problems of the current state of spectral analysis practice. These results were obtained. The problem of estimating the harmonic frequency from segmented data in the presence of additive Gaussian interference in observations based on the method of maximum likelihood is solved. The processing algorithm and the consequences of digital modeling of the synthesized evaluation technology for a given number of discrete process samples are given. The analysis of both the practical capacity of the technology for determining the assessment and certain qualitative indicators of assessment is performed. Conclusions. The scientific novelty of the obtained results is as follows: further development as a method for solving problems of estimating the frequency of the harmonic signal from a few sample values of the process under conditions of additive normal interference and methods for optimizing the structure of digital processing of observations in data segmentation. The synthesized technology uses one sample of observations to determine the estimates, which ensure the efficiency of information processing in a simple software implementation. The use of segmentation in the technological process of digital processing of observations allows obtaining estimates, the quality of which corresponds to the indicators of maximum likelihood. For unambiguous assessment, there is a need to eliminate ambiguity. Under these conditions, the technology with a given number of samples can significantly solve the range of signal-to-noise ratios at which can be obtained unbiased estimates.

**Keywords:** segmented data; maximum plausibility method; spectral analysis; frequency estimation.

#### АЛГОРИТМ ОЦЕНИВАНИЯ ЧАСТОТЫ КОМПЛЕКСНОГО ГАРМОНИЧЕСКОГО СИГНАЛА С СЕГМЕНТАЦИЕЙ ДАННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

*А. Д. Абрамов, Ю. В. Съедина, А. Ю. Николаев, А. А. Бондарев*

Предметом изучения в статье являются технологии оценки частоты гармонических компонент в условиях наличия аддитивных нормальных помех для решения прикладных задач спектрального анализа. Цель работы: разработка методологии синтеза алгоритмов определения частоты комплексного гармонического сигнала по дискретным участкам процесса, который наблюдается при использовании сегментации данных. Задача: по модельным представлениям и требованиям, которые соответствуют проблемам современного состояния практики спектрального анализа, разработать оптимальную по критерию максимального правдоподобия технологию определения частоты гормональной компоненты процесса, предоставленного конечным числом дискретных отсеков. Получены следующие результаты. Решена задача оценки частоты гармонической компоненты по сегментированным данным в условиях присутствия аддитивных гауссовых помех в наблюдениях, основанная на методе максимального правдоподобия. Приведены алгоритм обработки и последствия цифрового моделирования синтезированной технологии оценки по заданному количеству дискретных отсчетов процесса. Проведен анализ как практической способности технологии определения оценки, так и определенных качественных показателей оценок. Выводы. Научная новизна полученных результатов заключается в следующем: приобрели дальнейшее развитие как метод решения задач оценивания частоты гармонического сигнала небольшим количеством выборных значений процесса в условиях аддитивных нормальных помех, так и методы оптимизации структуры цифровой обработки наблюдений при сегментации данных. Синтезированная технология для определения оценок использует одну выборку наблюдений, обеспечивает оперативность обработки

информации при достаточно простой программной реализации. Использование сегментации в технологическом процессе цифровой обработки наблюдений позволяет получить оценки, качественные показатели которых соответствуют показателям оценок максимального правдоподобия. Для однозначного оценивания возникает необходимость в устранении неоднозначности. При выполнении этих условий технология при заданном количестве выборок позволяет существенно разрешить диапазон отношений сигнал / помеха при которых могут быть получены практически несмещенные оценки.

**Ключевые слова:** сегментированные данные; метод максимального правдоподобия; спектральный анализ; оценка частоты.

**Абрамов Александр Дмитриевич** – канд. техн. наук, ст. науч. співроб., доцент кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**С'єдіна Юлія Володимирівна** – провідний інженер кафедри аерокосмічної теплотехніки, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Ніколаєв Андрій Юрійович** – магістр кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Бондарєв Артем Андрійович** – магістр кафедри аерокосмічних радіоелектронних систем, Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського «Харківський авіаційний інститут», Харків, Україна.

**Alexander Abramov** - Candidate of Technical Sciences Science, Senior Researcher, associate professor of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: abr.a@ukr.net.

**Yulia Siedina** — Leading Engineer of the Department of Aerospace Heat Engineering, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: syedina.yv@gmail.com.

**Andrey Nikolaev** – Master of the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: andrej.nikolaev.97@email.ua.

**Artem Bondarev** – Master of the department of aerospace radio-electronic systems, National Aerospace University «Kharkov Aviation Institute», Kharkov, Ukraine, e-mail: artem32525@gmail.com.