
**ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ,
ВЕЩЕСТВ, МАТЕРИАЛОВ И ИЗДЕЛИЙ**

**INSTRUMENTS AND METHODS FOR MONITORING THE NATURAL ENVIRONMENT,
SUBSTANCES, MATERIALS AND PRODUCTS**

УДК 681.7
DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-430-436

**ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА
ДЛЯ КОНТРОЛЯ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОРПУСА ВОЗДУШНОГО СУДНА**

Е. Е. МАЙОРОВ^{1*}, Г. А. КОСТИН², Т. А. ЧЕРНЯК²

¹ Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения,
Санкт-Петербург, Россия
*majorov_ee@mail.ru

² Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации,
Санкт-Петербург, Россия

Аннотация. Проведено экспериментальное исследование измерительной системы для контроля поверхностей корпуса воздушного судна. Представлены результаты экспериментальных исследований диапазона измерений, амплитуды выходного сигнала, а также погрешности измерений. Проведен сравнительный анализ результатов экспериментальных измерений с независимыми, выполненными с помощью аттестованного прибора. Получены зависимости усредненной амплитуды выходного сигнала от расстояния от выходного оптического зрачка до исследуемой поверхности при движении контролируемого объекта, а также от диаметра светового пучка на поверхности объекта.

Ключевые слова: воздушное судно, измерительная система, выходной оптический зрачок, диапазон измерений, амплитуда выходного сигнала, погрешность измерений, исследуемая поверхность

Ссылка для цитирования: Майоров Е. Е., Костин Г. А., Черняк Т. А. Экспериментальная измерительная система для контроля поверхностей корпуса воздушного судна // Изв. вузов. Приборостроение. 2023. Т. 66, № 5. С. 430—436. DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-430-436.

**EXPERIMENTAL MEASURING SYSTEM
FOR CONTROL OF AIRCRAFT HULL SURFACES**

E. E. Maierov^{1*}, G. A. Kostin², T. A. Chernyak²

¹ St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation,
St. Petersburg, Russia
*majorov_ee@mail.ru

² St. Petersburg State University of Civil Aviation,
St. Petersburg, Russia

Abstract. A measuring system for monitoring aircraft hull surfaces is studied experimentally. Results of experimental research into the measurement range, the output signal amplitude, as well as the measurement error are presented. A comparative analysis of the results of experimental measurements and independent measurements performed with a certified instrument is carried out. The dependences of the averaged amplitude of the output signal on the distance of the output signal from the optical pupil to the surface under investigation during the controlled object movement, as well as on the light beam diameter at the object surface, are obtained.

Keywords: aircraft, measuring system, optical pupil output, measurement range, output signal amplitude, measurement error, surface under study

For citation: Maierov E. E., Kostin G. A., Chernyak T. A. Experimental measuring system for control of aircraft hull surfaces. *Journal of Instrument Engineering*. 2023. Vol. 66, N 5. P. 430—436 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2023-66-5-430-436.

Введение. В настоящее время гражданская авиация огромное внимание уделяет безопасности полетов [1, 2]. Технические службы аэропорта, осуществляющие контроль за летательным аппаратом, заинтересованы в современных оптико-электронных системах и приборах для контроля поверхности корпуса воздушного судна. Получение высокоинформативной, высокоточной и достоверной информации о форме поверхности летательного аппарата после посадки и до взлета — важная задача для авиации. Для оптического приборостроения значимыми факторами являются расширение функциональных возможностей оптико-электронных систем, повышение информативного содержания измерений и более широкое внедрение таких систем в производственную практику [3, 4].

Оптические приборы и системы измерений формы поверхности основаны на фиксации светового излучения, отраженного от исследуемой поверхности [5, 6]. Эти средства являются методами неразрушающего контроля, так как исключено механическое воздействие на предмет исследования [7, 8]. Кроме того, они пригодны для решения динамических задач и имеют высокую производительность.

Как отмечается в научно-технической литературе, актуальными и перспективными для контроля сложной формы поверхности являются интерференционные системы и приборы, имеющие источники излучения белого света (низкокогерентные с длиной когерентности 1...3 нм) [9, 10]. На сегодняшний день это направление в оптическом приборостроении бурно развивается. Такие приборы и системы характеризуются высокой точностью, необходимым диапазоном измерений для контроля рельефа поверхности, и, что немаловажно, расстояние до измеряемой поверхности не зависит от апертурных углов освещения и наблюдения [11 — 15]. Исследование метрологических характеристик таких измерительных систем представляет несомненный интерес.

Цель настоящей статьи — исследование экспериментальной измерительной системы для контроля поверхностей корпуса воздушного судна, в частности исследование диапазона измерений, амплитуды выходного сигнала и погрешности измерений, а также сравнительный анализ результатов экспериментальных измерений с независимыми, выполненными с помощью аттестованного прибора.

Исследование диапазона измерений. В представленной на рис. 1 измерительной системе (ИС) диапазон измерений определяется смещением опорного зеркала. При смещении опорного зеркала должна обеспечиваться необходимая и достаточная амплитуда оптического сигнала. Поэтому для определения диапазона ИС амплитуда сигнала измерялась при разных расстояниях от оптического зрачка системы до исследуемой поверхности.

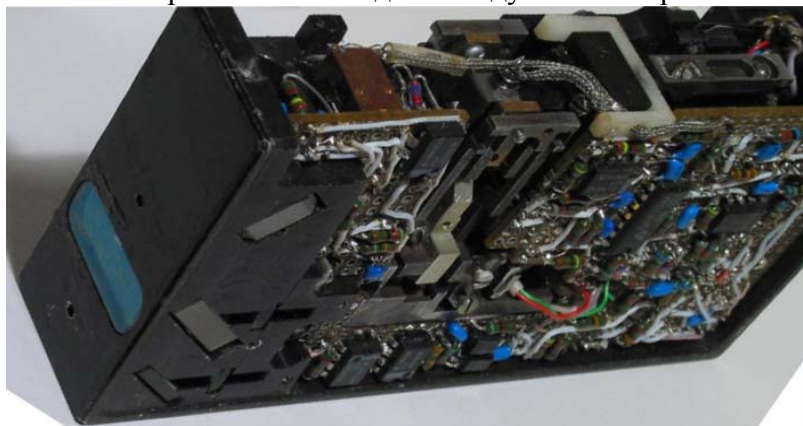


Рис. 1

Начальное расстояние — максимум амплитуды при отсутствии напряжения на модуляторе опорного зеркала — в ходе исследования составляло 100 мм. Зависимость амплитуды сигнала от расстояния до поверхности фиксировалась при движении объекта по оси OZ от начальной точки в обе стороны. Экспериментальные результаты получены при частоте сканирования опорного зеркала $f_M = 46$ Гц и показаны на рис. 2, согласно которому диапазон измерений для данной ИС составляет 0...4 мм.

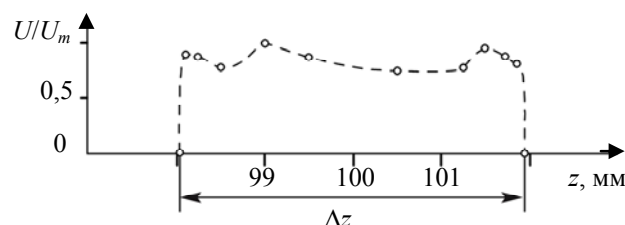


Рис. 2

Исследование амплитуды выходного сигнала. Одна из основных характеристик ИС — амплитуда выходного сигнала, содержащая информацию об определяемом расстоянии. Амплитуда сигнала обеспечивает необходимую величину превышения полезного сигнала над уровнем шумов и помехозащищенность измерений [14, 15].

Исследование амплитуды сигнала при движении опорного зеркала в одну и другую сторону позволяет оценить погрешность ИС, а также объяснить механизм формирования полей рассеяния, которые влияют на точность измерений.

В эксперименте движение исследуемого объекта осуществлялось относительно выходного оптического зрачка (ВОЗ). Производился контроль одной аттестованной поверхности с первым классом шероховатости $R_a = 80$ мкм. Диаметр светового пятна (d) на поверхности изменялся за счет введения стеклянных пластин разной толщины между ВОЗ и контролируемой поверхностью. Согласно результатам исследования, которые представлены на рис. 3, на базовой длине зондируемого участка поверхности амплитуда сигнала может изменяться более чем на порядок. Наблюдаются скачки амплитуды за счет декорреляции полей рассеяния светового излучения. При движении опорного зеркала возникает суперпозиция некоррелированных составляющих светового поля, которые имеют разные амплитуды, что, как следствие, приводит к деформации формы огибающей сигнала, а значит, влияет на точность измерений. На рис. 4 приведены результаты расчета зависимости среднего значения амплитуды сигнала от диаметра светового пучка на измеряемой поверхности. Приведенная зависимость хорошо согласуется с теоретическими расчетами.

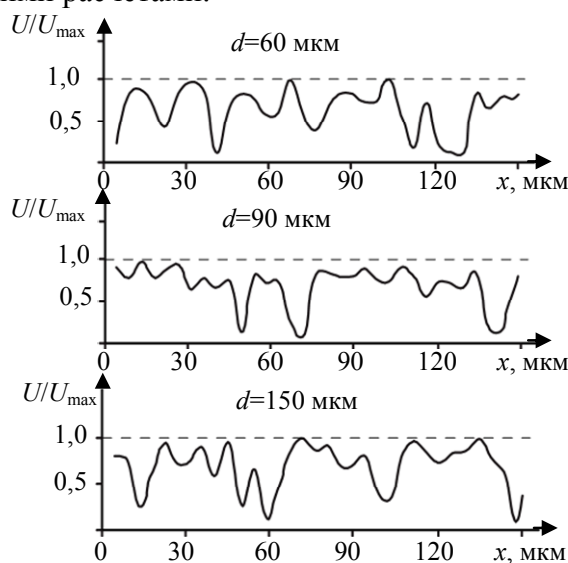


Рис. 3

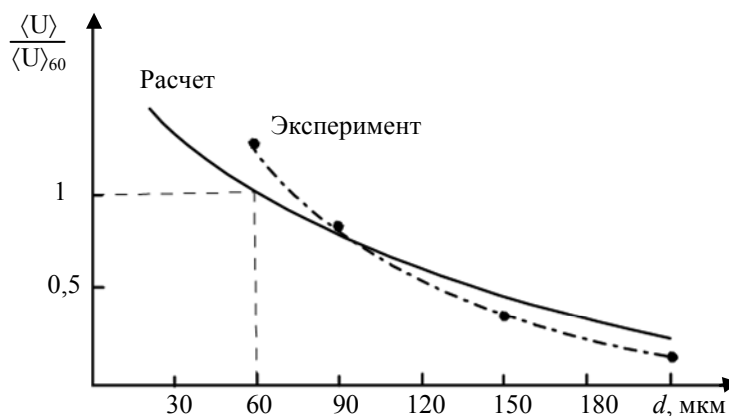


Рис. 4

Исследование погрешности измерений. Для исследования погрешности измерений определялись расстояния до измеряемой поверхности при заданных экспериментатором углах падения светового излучения. Исследуемая поверхность имела разный наклон относительно ВОЗ ИС (углы наклона $\theta = 0, 15, 30, 45^\circ$). Для каждого значения θ фиксировалось расстояние до исследуемой поверхности при движении объекта относительно ВОЗ. Номинальное расстояние было неизменным, а фиксировались изменения этого расстояния. Объект находился на микрометрическом столике, где выставлялся угол наклона в направлении ВОЗ. Движение объекта производилось с шагом 50 мкм, и для каждого угла выполнялись 50 измерений. В ходе эксперимента интерферометром Майкельсона проводился независимый контроль отклонения микрометрического столика при смещении от плоскопараллельного положения. Экспериментальные результаты приведены на рис. 5. Следует отметить, что привязка максимального значения амплитуды сигнала к модуляции опорного зеркала позволила определить систематическую погрешность, которая была учтена в общей погрешности измерений.

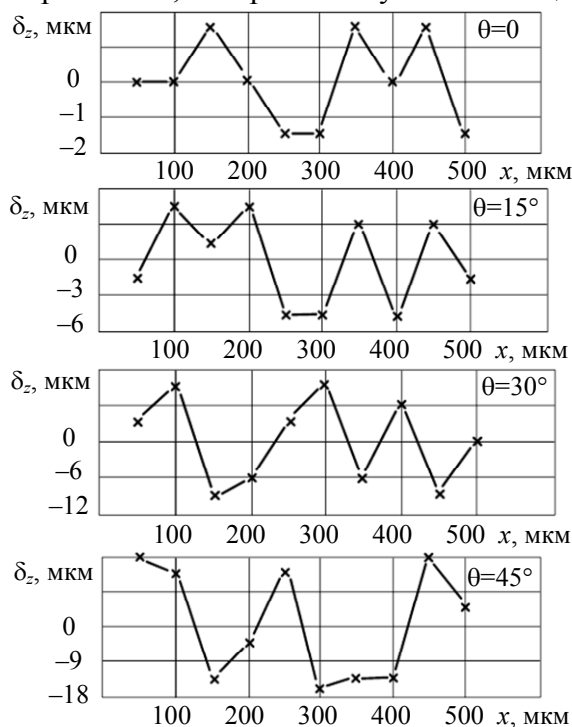


Рис. 5

В ходе исследований был проведен сравнительный анализ экспериментальных результатов измерений расстояния до объекта (Δz) с независимыми данными (Δz_a), полученными на аттестованном приборе: $\delta_z = \Delta z - \Delta z_a$ (рис. 6). В качестве аттестованного прибора использовался

индикатор линейных перемещений 1МИГ (ГОСТ 9696-75), имеющий погрешность измерений 0,5 мкм.

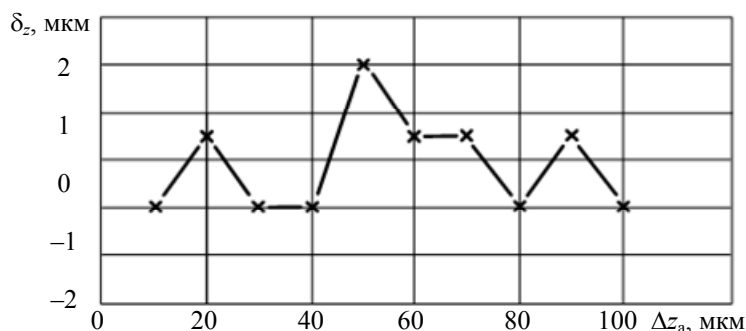


Рис. 6

Заключение. Приведены результаты экспериментальных исследований диапазона измерений, амплитуды выходного сигнала и погрешности измерений ИС. Сравнительный анализ показал, что ИС полностью удовлетворяет требованиям по контролю поверхностей корпуса воздушного судна. Данное исследование может представлять интерес для авиационных технических служб аэропорта, осуществляющих контроль за летательным аппаратом, а также для оптического приборостроения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. М.: Наука, 1970. 855 с.
2. Малакара Д. Оптический производственный контроль / Пер. с англ.; под ред. А. Н. Соснова. М.: Машиностроение, 1985. 340 с.
3. Коломийцев Ю. В. Интерферометры. Л.: Машиностроение, 1976. 296 с.
4. Арефьев А. В., Бородянский Ю. М., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Хохлова М. В. Измерение микрорельефа негладких поверхностей автоматизированным интерферометром в низкокогерентном свете // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 211—219.
5. Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Таюрская И. С. Экспериментальное исследование разработанной интерференционной системы для измерений поверхности объектов сложной формы // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2020. № 8. С. 179—189.
6. Хохлова М. В., Дагаев А. В., Майоров Е. Е., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Громов О. В. Интерференционная система измерения геометрических параметров отражающих поверхностей // Междунар. науч.-исслед. журн. 2021. № 6 (108). С. 184—189. DOI: 10.23670/IRJ.2021.108.6.029.
7. Черняк Т. А., Бородянский Ю. М., Майоров Е. Е., Попова Е. В., Петрова Е. А., Хохлова М. В. Математическое моделирование интерференционного сигнала и получение диапазона измерений величины смещения // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. Вып. 6. С. 199—204. DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-199-204.
8. Цыганкова Г. А., Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Константинова А. А., Машек А. Ч., Писарева Е. А. Исследование разработанного интерферометра поперечного сдвига для настройки интерференционных полос при обработке интерферограмм // Приборы. 2021. № 2. С. 20—25.
9. Майоров Е. Е., Колесниченко С. В., Константинова А. А., Машек А. Ч., Писарева Е. А., Цыганкова Г. А. Исследование флуктуаций фазы выходного сигнала системы фазовых измерений // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2021. № 9. С. 1—6. DOI: 10.25791/pribor.9.2021.1287.
10. Громов О. В., Майоров Е. Е., Черняк Т. А., Удахина С. В., Писарева Е. А., Константинова А. А. Измерения оптических свойств кожного покрова *in vivo* под воздействием современных увлажняющих средств // Междунар. науч.-исслед. журн. 2021. № 3 (105). С. 38—43. DOI: 10.23670/IRJ.2021.105.3.006.
11. Майоров Е. Е., Громов О. В., Курлов В. В., Коцкович В. Б., Петрова Е. А., Пушкина В. П., Таюрская И. С. Исследование рельефа поверхности биологических объектов методом контроля, анализирующим расходимость // Изв. ТулГУ. Технические науки. 2021. № 2. С. 383—388.

12. Арефьев А. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Сорокин А. А., Удахина С. В. Исследование разработанного интерференционного зонда для измерения неровностей реальных поверхностей // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. 2022. № 2. С. 1—6. DOI: 10.25791/pribor.2.2022.1319.
13. Арефьев А. В., Курлов В. В., Коцкович В. Б., Майоров Е. Е., Пушкина В. П., Удахина С. В. Исследование постинъекционного эпидермиса модифицированным интерферометром Майкельсона — Физо // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 4. С. 295—302. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-295-302.
14. Майоров Е. Е., Коцкович В. Б., Пушкина В. П., Арефьев А. В., Гулиев Р. Б., Дагаев А. В. Исследование оптических плоских поверхностей светоделительных пластин средством когерентной оптики // Научное приборостроение. 2022. Т. 32, № 2. С. 65—74.
15. Майоров Е. Е. Исследование разработанной измерительной системы на основе двухлучевой интерферометрии // Моделирование и ситуационное управление качеством сложных систем: Сб. докл. Третьей Всерос. науч. конф., Санкт-Петербург, 18—22 апр. 2022 г. СПб: ГУАП, 2022. С. 52—55. DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3.

Сведения об авторах

- Евгений Евгеньевич Майоров** — канд. техн. наук, доцент; СПб ГУАП, кафедра прикладной математики; E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Геннадий Александрович Костин** — д-р техн. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, кафедра прикладной математики и информатики; проректор по науке и цифровизации; E-mail: ga_kostin@spbguga.ru, g_kostin@mail.ru
- Татьяна Анатольевна Черняк** — канд. экон. наук, доцент; Санкт-Петербургский государственный университет гражданской авиации, кафедра высшей математики; зав. кафедрой; E-mail: 79119113039@yandex.ru

Поступила в редакцию 25.10.2022; одобрена после рецензирования 01.11.2022; принята к публикации 20.03.2023.

REFERENCES

1. Born M., Wolf E. *Principles of Optics*, Pergamon Press, 1970.
2. Malacara D., ed., *Optical Shop Testing*, Wiley-Interscience, A John Wiley & Sons, Inc., 2007.
3. Kolomiitsev Yu.V. *Interferometry* (Interferometers), Leningrad, 1976, 296p. (in Russ.)
4. Arefiev A.V., Borodyansky Yu.M., Guliev R.B., Dagaev A.V., Maiorov E.E., Khokhlova M.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2020, no. 8, pp. 211—219. (in Russ.)
5. Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Majorov E.E., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2020, no. 8, pp. 179—189. (in Russ.)
6. Khokhlova M.V., Dagaev A.V., Arefyev A.V., Guliev R.B., Mayorov E.E., Gromov O.V. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 6(108), pp. 184—189, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.108.6.029>. (in Russ.)
7. Chernyak T.A., Borodyansky Yu.M., Maiorov E.E., Popova E.V., Petrova E.A., Khokhlova M.V. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 6, pp. 199—204, DOI: 10.24412/2071-6168-2021-6-199-204. (in Russ.)
8. Tsygankova G.A., Majorov E.E., Chernyak T.A., Konstantinova A.A., Mashek A.Ch., Pisareva E.A. *Pribory*, 2021, no. 2, pp. 20—25. (in Russ.)
9. Mayorov E.E., Chernyak T.A., Tsygankova G.A., Mashek A.Ch., Konstantinova A.A. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2020, no. 7, pp. 25—32, DOI: 10.25791/pribor.07.2020.1190. (in Russ.)
10. Gromov O.V., Mayorov E.E., Chernyak T.A., Udakhina S.V., Pisareva E.A., Konstantinova A.A. *Meždunarodnyj naučno-issledovatel'skij žurnal* (International Research Journal), 2021, no. 3(105), pp. 38—43, DOI: <https://doi.org/10.23670/IRJ.2021.105.3.006>. (in Russ.)
11. Majorov E.E., Gromov O.V., Kurlov V.V., Kotskovich V.B., Petrova E.A., Pushkina V.P., Tayurskaya I.S. *News of the Tula State University. Technical Sciences*, 2021, no. 2, pp. 383—388. (in Russ.)
12. Arefiev A.V., Kotskovich V.B., Maiorov E.E., Pushkina V.P., Sorokin A.A., Udakhina S.V. *Instruments and Systems: Monitoring, Control, and Diagnostics*, 2022, no. 2, pp. 1—6, DOI: 10.25791/pribor.2.2022.1319 (in Russ.)
13. Arefiev A.V., Kurlov B.B., Kotskovich V.B., Maiorov E.E., Pushkina V.P., Udakhina S.V. *Journal of Instrument Engineering*, 2022, no. 4(65), pp. 295—302, DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-4-295-302. (in Russ.)
14. Maiorov E.E., Kotskovich V.B., Pushkina V.P., Arefiev A.V., Guliyev R.B., Dagaev A.V. *Nauchnoe Priborostroyeniye* (Scientific Instrumentation), 2022, no. 2(32), pp. 65—74. (in Russ.)
15. Maiorov E.E. *Modelirovaniye i situatsionnoye upravleniye kachestvom slozhnykh sistem* (Modeling and Situational Quality Management of Complex Systems), Third All-Russian Scientific Conference, St. Petersburg, April 18—22, 2022, pp. 52—55, DOI: 10.31799/978-5-8088-1707-4-2022-3. (in Russ.)

Data on authors

- Evgeny E. Maiorov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Aerospace Instrumentation, Department of Applied Mathematics;
E-mail: majorov_ee@mail.ru
- Gennady A. Kostin** — Dr. Sci., Associate Professor; St. Petersburg State University of Civil Aviation, Department of Applied Mathematics and Computer Science; Vice-Rector for Science and Digitalization; E-mail: ga_kostin@spbguga.ru, g_kostin@mail.ru
- Tatiana A. Chernyak** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg State University of Civil Aviation, Department of Higher Mathematics; Head of the Department;
E-mail: 79119113039@yandex.ru

Received 25.10.2022; approved after reviewing 01.11.2022; accepted for publication 20.03.2023.