

**СПОСОБ ОЦЕНКИ ВНУТРИОБОРОТНОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ СКОРОСТИ ВРАЩЕНИЯ ОСЕЙ
МОДЕЛИРУЮЩЕГО СТЕНДА****В. А. Лазарев, П. А. Иванов*, А. Д. Усков***Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“
им. В. И. Ульянова (Ленина), Санкт-Петербург, Россия*** ivanov_etu@mail.ru*

Аннотация. Предложен способ оценки внутриоборотной неустойчивости скорости вращения осей моделирующего стенда. Способ основан на кросс-калибровке датчика угловой скорости по измеренному с помощью метода фиксированного угла значению скорости вращения планшайбы стенда. Предлагаемый способ позволяет повысить достоверность выходных данных датчика угловой скорости и на основе измеренных значений мгновенной скорости вращения оценить неустойчивость последней и выделить систематическую составляющую погрешности скорости вращения осей моделирующего стенда внутри оборота. С помощью щелевого датчика (в качестве нуля-метки) и волоконно-оптического гироскопа (в качестве измерителя скорости вращения планшайбы вокруг осей стенда) проведены измерения скорости вращения планшайбы вокруг осей двухосного стенда и оценены погрешности их неустойчивости. Проведен анализ полученных данных, выделена систематическая составляющая погрешности скорости вращения планшайбы двухосного стенда вокруг его внешней оси. Использование полученных результатов в алгоритмах калибровок инерциальных датчиков и систем позволит увеличить точность и достоверность этих калибровок.

Ключевые слова: моделирующий стенд, погрешность скорости вращения, неустойчивость скорости вращения, кросс-калибровка, щелевой датчик, волоконно-оптический гироскоп

Благодарности: работа поддержана грантом РФФИ № 20-19-00412-П.

Ссылка для цитирования: Лазарев В. А., Иванов П. А., Усков А. Д. Способ оценки внутриоборотной неустойчивости скорости вращения осей моделирующего стенда // Изв. вузов. Приборостроение. 2025. Т. 68, № 1. С. 67–78. DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-1-67-78.

METHOD FOR ASSESSING INTRA-TURN INSTABILITY OF ROTATION SPEED OF A SIMULATION STAND AXES**V. A. Lazarev, P. A. Ivanov*, A. D. Uskov***St. Petersburg Electrotechnical University, St. Petersburg, Russia*** ivanov_etu@mail.ru*

Abstract. A method for estimating intra-turn instability of the rotation speed of the axes of a simulation stand is proposed. The method is based on cross-calibration of the angular velocity sensor based on the value of the rotation speed of the stand faceplate measured using the fixed angle method. The proposed method allows to increase the reliability of the output data of the angular velocity sensor and, based on the measured values of the instantaneous rotation speed, to estimate the instability of the latter and to isolate the systematic component of the error in the rotation speed of the axes of the simulation stand within a turn. Using a slot sensor (as a zero mark) and a fiber-optic gyroscope (as a meter for the rotation speed of the faceplate around the axes of the rig), the rotation speed of the faceplate around the axes of a two-axis stand is measured and the errors in their instability are estimated. The obtained data are analyzed, the systematic component of the error in the rotation speed of the faceplate of a two-axis stand around its outer axis is isolated. Using the obtained results in the calibration algorithms of inertial sensors and systems will increase the accuracy and reliability of these calibrations.

Keywords: simulation stand, rotation speed error, rotation speed instability, cross calibration, slot sensor, fiber optic gyroscope

Acknowledgments: The work was supported by the grant of the Russian Science Foundation No. 20-19-00412-P.

For citation: Lazarev V. A., Ivanov P. A., Uskov A. D. Method for assessing intra-turn instability of rotation speed of a simulation stand axes. *Journal of Instrument Engineering*. 2025. Vol. 68, N 1. P. 67–78 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2025-68-1-67-78.

Введение. Для навигации и управления движением различных подвижных объектов используются бесплатформенные инерциальные навигационные системы (БИНС) [1–4]. Основой любой БИНС являются инерциальные датчики линейного ускорения (акселерометры) и угловой скорости (гироскопы). Высокая точность определения навигационных параметров обеспечивается калибровкой инерциальных чувствительных элементов и измерительных модулей на их основе. Калибровка осуществляется на специализированных моделирующих стендах, предназначенных для задания и измерения угловых положений и скоростей вращения планшайбы, на которую, в свою очередь, установлен объект испытаний [5–8]. Такие установки могут иметь одну, две или три взаимно перпендикулярных оси вращения, при этом точность калибровки датчиков и систем зависит от характеристик этих установок. Задача измерения и контроля точностных характеристик возникает на этапе производства стенда, во время заводских испытаний, первичной и периодических аттестаций. При этом наиболее важными метрологическими характеристиками являются погрешность и нестабильность скорости вращения планшайбы. Как правило, для измерения скорости вращения определяют ее усредненное значение на полном обороте, т. е. используют метод фиксированного угла [9]. Для оценки внутриоборотной нестабильности скорости оборот разбивается на сектора, однако такой способ не всегда доступен и в значительной степени увеличивает погрешность измерения, поскольку появляется дополнительная погрешность, обусловленная таким разбиением.

Целью настоящей работы является разработка способа оценки внутриоборотной нестабильности скорости вращения планшайбы моделирующих стендов.

Погрешность и нестабильность скорости вращения. Погрешность скорости вращения характеризует разницу между заданной и действительной скоростью вращения планшайбы стенда. Современные стенды обладают погрешностью скорости вращения планшайбы на уровне 0,0001 % от заданной величины для скоростей более 10 °/с и 0,001 % — для менее чем 10 °/с [10–12]. Нестабильность скорости вращения характеризует разброс измеренных значений в выборке от среднего значения в последней.

Погрешность (δ_ω) и нестабильность (σ_ω) скорости вращения определяются выражениями, %:

$$\delta_\omega = \left| \frac{\bar{\omega}_{\text{изм}} - \omega_3}{\omega_3} \right| \cdot 100 \%, \quad (1)$$

$$\sigma_\omega = \frac{1}{N-1} \frac{\sum_{i=1}^N (\omega_i - \bar{\omega}_{\text{изм}})^2}{|\bar{\omega}_{\text{изм}}|} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где $\bar{\omega}_{\text{изм}}$ — среднее значение измеренной скорости вращения в выборке, °/с; ω_3 — заданная скорость вращения, °/с; $i = 1, \dots, N$ — номер измерения; ω_i — i -е измерение скорости вращения, °/с.

Скорость вращения планшайбы находится методом фиксированного угла с использованием нуля-метки: измеряется время, за которое планшайба поворачивается на определенный угол. При вращении планшайбы ноль-метка вырабатывает сигнал с одним периодом на оборот. После измерения периода следования импульсов с помощью частотомера скорость вращения планшайбы $\omega_{\text{изм}}$ рассчитывается следующим образом, °/с:

$$\omega_{\text{изм}} = \frac{360^\circ}{T_{\text{изм}}},$$

где $T_{\text{изм}}$ — измеренный частотомером период, с.

Погрешность измерения скорости вращения Δ_ω определяется следующим выражением, °/с:

$$\Delta_\omega = \omega_{\text{ист}} - \omega_{\text{изм}} = \frac{\omega_{\text{ист}} \Delta_T}{T_{\text{ист}} + \Delta_T}, \quad (3)$$

где $\omega_{\text{ист}} = \frac{360^\circ}{T_{\text{ист}}}$ — истинная скорость вращения, $^\circ/\text{с}$; $\omega_{\text{изм}} = \frac{360^\circ}{T_{\text{изм}}} = \frac{360^\circ}{T_{\text{ист}} + \Delta_T}$ — измеренная скорость вращения, $^\circ/\text{с}$; $T_{\text{ист}}$ — истинный период следования импульсов, с; Δ_T — погрешность измерения периода сигнала нуль-метки, с.

Погрешность измерения периода сигнала нуль-метки определяется следующим выражением:

$$\Delta_T = \sqrt{\Delta_{\text{чм}}^2 + \Delta_t^2}, \quad (4)$$

где $\Delta_{\text{чм}}$ — погрешность частотомера, с; Δ_t — погрешность, вызванная неустойчивостью временных задержек формирователя сигнала, с.

В системе управления современных стендов используются абсолютные (энкодеры) и инкрементные датчики угла [13], которые необходимы для получения обратной связи по угловому положению и угловой скорости соответствующей оси стенда.

Однако измерение малых угловых скоростей с помощью датчика угла невозможно в связи с существенным влиянием случайной составляющей погрешности датчика угла при дифференцировании его показаний [14]. Эта проблема может быть решена с использованием системы управления сервоприводами стенда с обратной связью от инерциальных датчиков [15–17]. При этом введение в конструкцию стенда датчиков, использующих различные физические принципы, может дать значительное увеличение точности определения угловой скорости в связи с некоррелированностью погрешностей этих датчиков [18].

Для измерения скорости вращения методом фиксированного угла может быть использована нуль-метка энкодера. Однако в энкодере отсутствует устройство, определяющее нулевое положение датчика, так как его лимб имеет уникальный растровый рисунок для каждого углового положения [19], при этом нуль-метка является „виртуальной“, поскольку формируется по цифровому коду нулевого положения датчика.

Для формирования „физической“ нуль-метки (что предпочтительнее с точки зрения обеспечения единства измерений) предлагается использовать оптический щелевой датчик, закрепленный на неподвижном, относительно вала контролируемой оси, основании.

В настоящей работе предлагается способ оценки внутриоборотной (мгновенной) неустойчивости скорости вращения относительно осей стенда, при котором совместно с нуль-меткой и частотомером, измеряющим оборотную угловую скорость методом фиксированного угла, используется инерциальный датчик (ДУС).

Способ оценки внутриоборотной неустойчивости скорости вращения по ДУС с применением кросс-калибровки. Определять скорость вращения внутри оборота возможно с использованием ДУС, однако даже высокоточные оптические датчики не могут обеспечить необходимую точность. Связано это с тем, что обычно относительная погрешность измерения скорости вращения в оптических ДУС не превышает 0,01 % из-за неустойчивостей масштабного коэффициента и смещения нуля во времени и от запуска к запуску. Математическая модель ошибок ДУС в общем случае включает в себя смещение нуля, масштабный коэффициент и шумовую составляющую [20]. Также в случае использования ДУС для измерения скорости вращения планшайбы моделирующего стенда дополнительную погрешность вносит несоосность оси чувствительности датчика и контролируемой оси вращения стенда. Для получения более точных выходных данных ДУС перед проведением испытаний датчик калибруется по значению скорости вращения Земли, которая выступает в качестве эталона.

Предлагаемый в работе способ измерения не требует предварительной калибровки ДУС. Калибровочные коэффициенты ДУС определяются с помощью кросс-калибровки по скорости вращения, измеряемой с помощью метода фиксированного угла.

Рассмотрим модель выходных данных ДУС при измерении скорости вращения планшайбы моделирующего стенда:

$$\omega^{\text{ДУС}} = M_{\omega} \omega^{\text{пр}} + \omega_0 = M_{\omega} \cos \gamma \omega^{\text{д}} + \omega_0,$$

где $\omega^{\text{ДУС}}$ — измеренная ДУС скорость вращения, °/с; M_{ω} — масштабный коэффициент ДУС; $\omega^{\text{пр}}$ — проекция действительной скорости вращения планшайбы на чувствительную ось гироскопа, °/с; ω_0 — смещение нуля ДУС, °/с; γ — угол между осью чувствительности ДУС и осью вращения планшайбы стенда; $\omega^{\text{д}}$ — действительная скорость вращения планшайбы стенда, °/с. В рамках поставленной задачи можно сделать следующую замену:

$$M_{\omega} \cos \gamma = k; \quad \omega^{\text{ДУС}} = k\omega^{\text{д}} + \omega_0.$$

Определим k и ω_0 с помощью следующих выражений:

$$k = \frac{\bar{\omega}_{\omega^+}^{\text{ДУС}} - \bar{\omega}_{\omega^-}^{\text{ДУС}}}{\bar{\omega}_{\omega^+}^{\text{ЧМ}} - \bar{\omega}_{\omega^-}^{\text{ЧМ}}}, \quad (5)$$

$$\omega_0 = \bar{\omega}_{\omega^+}^{\text{ДУС}} - k\bar{\omega}_{\omega^+}^{\text{ЧМ}}, \quad (6)$$

где $\bar{\omega}_{\omega^+}^{\text{ДУС}}$, $\bar{\omega}_{\omega^-}^{\text{ДУС}}$ — усредненные показания ДУС для заданных скоростей вращения ω_+ и ω_- , °/с ($\omega_+ = -\omega_-$); $\bar{\omega}_{\omega^+}^{\text{ЧМ}}$, $\bar{\omega}_{\omega^-}^{\text{ЧМ}}$ — скорость вращения, измеренная по частотомеру для заданных скоростей вращения ω_+ и ω_- . Таким образом, при оценке параметров k и ω_0 для каждой пары скоростей не добавляется погрешность, связанная с неучтенной нелинейностью выходной характеристики ДУС. Тогда определить $\omega^{\text{д}}$ можно по выражению:

$$\omega^{\text{д}} = \frac{\omega^{\text{ДУС}} - \omega_0}{k}.$$

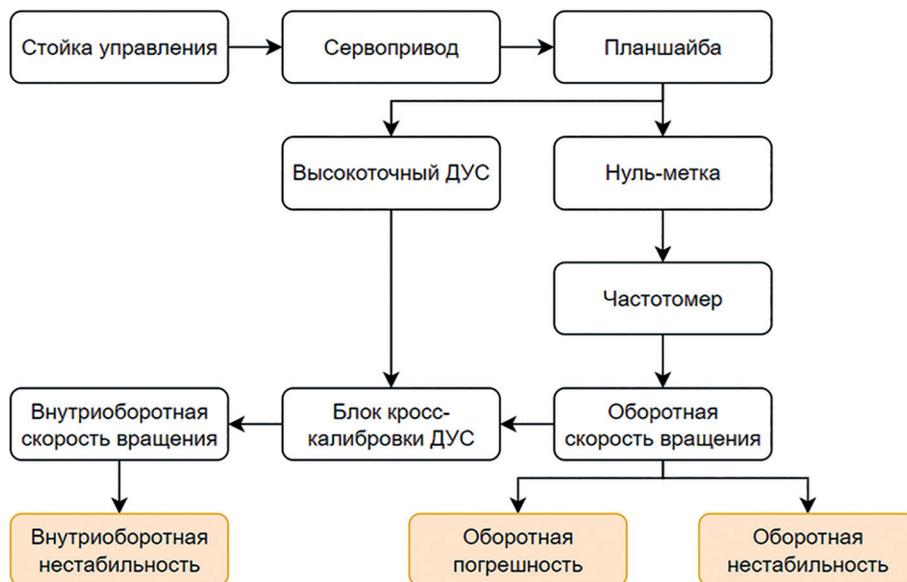


Рис. 1

На рис. 1 приведена блок-схема предлагаемого способа. При таком подходе по нуль-метке определяется скорость вращения за оборот, относительно которой в блоке кросс-калибровки по выражениям (5) и (6) определяются калибровочные коэффициенты для ДУС. Далее с помощью данных с ДУС оценивается внутриоборотная нестабильность скорости вращения. В выходном сигнале ДУС остаются только случайные составляющие — случайный дрейф нуля от запуска к запуску и шумовая составляющая. При нахождении каждой пары скоростей, для которых определяются калибровочные коэффициенты, за один пуск ДУС дрейф нуля от запуска к запуску в

измерениях будет отсутствовать. Для минимизации погрешности измерения, вызванной шумовой составляющей, необходимо использовать лазерный или волоконно-оптический гироскоп, поскольку шумовая составляющая современных приборов значительно меньше измеряемых величин. Предлагаемый в работе способ измерения не требует предварительной калибровки ДУС. Калибровочные коэффициенты ДУС определяются с помощью кросс-калибровки по скорости вращения, измеряемой при помощи метода фиксированного угла.

Внутриоборотная нестабильность скорости вращения осей стенда отрицательно влияет на точность и достоверность калибровки инерциальных датчиков и навигационного оборудования на стенде, однако этот параметр не проверяется ни заводскими испытаниями, ни при аттестации стендов из-за отсутствия общепринятого метода измерения. Применение предлагаемого способа позволит получить больше информации о параметрах вращения планшайбы вокруг осей стенда без затрат времени на дополнительные испытания.

Апробирование предлагаемого способа. Предлагаемый способ оценки внутриоборотной нестабильности скорости вращения планшайбы моделирующего стенда был апробирован на двухосном стенде с термокамерой производства компании „Acutronic“ (рис. 2).

Производитель этого образца заявляет (и подтверждает) погрешность воспроизведения скорости вращения 0,001 % за оборот от 10 °/с; данное обстоятельство вызывает ряд вопросов с метрологической точки зрения, поскольку погрешность оценивается не во всем диапазоне воспроизводимой характеристики, а ее нестабильность не оценивается вовсе.

При реализации предлагаемого метода в качестве средств измерений использовались частотомер АКИП-5102/1, волоконно-оптический гироскоп (ВОГ) ОИУС-1001 (диапазон измерения угловых скоростей ± 550 °/с). ВОГ устанавливался на планшайбу стенда. Для формирования „физической“ нуль-метки использовался фотоэлектрический щелевой датчик Autronics BS5-T2M.

Нестабильность временных задержек щелевого датчика определяется нестабильностью времени нарастания сигнала. С помощью осциллографа АКИП 4126/2-Х была произведена серия измерений времени нарастания сигнала. Стандартное отклонение выборки составило 27 нс. Следовательно, нестабильность временных задержек не превышает 0,1 мкс (утроенное среднеквадратическое отклонение). Погрешность измерения периода частотомером на порядок меньше, поэтому ей можно пренебречь. Согласно выражению (4), погрешность измерения периода сигнала нуль-метки составляет 0,1 мкс. Таким образом, по выражению (3) была определена зависимость погрешности измерения скорости вращения планшайбы стенда относительно истинной скорости вращения (рис. 3).

Погрешность возрастает с увеличением действительной скорости. Максимальное значение погрешности — $2,8 \cdot 10^{-5}$ % (при действительной скорости вращения 1000 °/с), что говорит о до-



Рис. 2

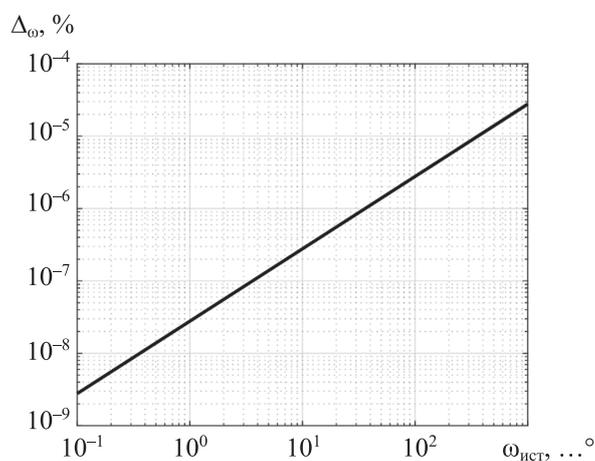


Рис. 3

статочной для проведения измерений точности (предел допускаемой погрешности измерений не превышает 0,2–0,3 от границы симметричного допуска на измеряемый параметр.* Однако при проведении измерений для скоростей свыше 1000 °/с (диапазон скоростей вращения планшайбы современных испытательных моделирующих стендов достигает 10 000 °/с) необходимо повысить точность измерения, уменьшив нестабильность временных задержек. Для этих целей в качестве формирователя нуля-метки может быть использован интерференционный нуль-индикатор, однако его использование ограничено диапазоном измеряемых скоростей вращения.

Внутриоборотные характеристики измерялись для скоростей вращения от 0,1 до 360 °/с для внутренней оси и от 0,1 до 400 °/с — для внешней. Обратная погрешность скорости вращения и обратная нестабильность скорости вращения определялись по пяти оборотам во всем диапазоне угловых скоростей стенда. При длительных измерениях (на малых скоростях вращения) уход ВОГ корректировался после каждой пары измерений соответствующими коэффициентами k и ω_0 (см. выражения (5) и (6)).

На рис. 4 и 5 показаны графики зависимости оборотной погрешности скорости вращения ($\delta_{\omega}^{об}$, %) и оборотной нестабильности скорости вращения ($\sigma_{\omega}^{об}$, %) для внутренней и внешней оси двухосного стенда соответственно (a — положительное направление, b — отрицательное). Видна корреляция между оборотными погрешностью и нестабильностью. Наибольшие значения погрешности скорости вращения составляют 0,01 — для внутренней и 0,0006 % — для внешней оси; а соответствующие значения нестабильности достигают 0,0004 и 0,0009 %. При этом максимальные значения погрешностей наблюдались при скоростях 1 °/с для внутренней оси и 50 — для внешней.

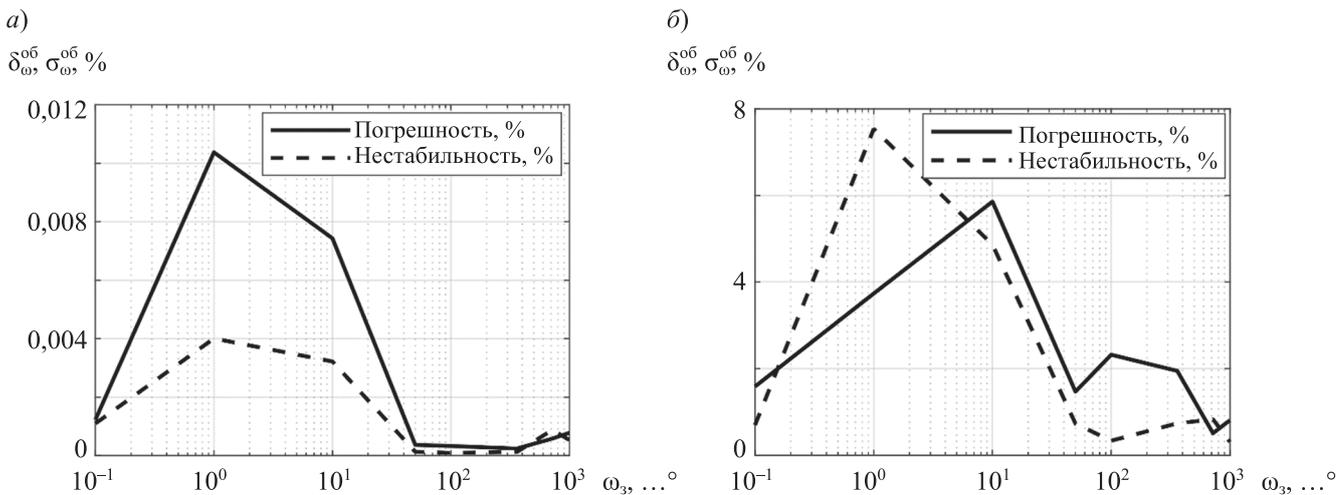


Рис. 4

Экспериментальное исследование внутриоборотной скорости вращения, определенной с помощью ВОГ, показало, что погрешность скорости вращения планшайбы стенда вокруг внешней оси имеет значительную систематическую составляющую. Следовательно, определять внутриоборотную нестабильность целесообразно только после ее исключения (для получения распределения измеренных значений, близкого к нормальному). На рис. 6 показаны действительные значения скорости вращения планшайбы стенда относительно его внешней оси, измеренные ВОГ при заданных значениях 100 (а) и 400 °/с (б).

Аналогичная картина погрешности проявлялась и при других значениях скорости вращения для внешней оси. Данная погрешность выражается в виде колебаний с одним периодом на оборот и колебаний на промышленной частоте 50 Гц (но с меньшей амплитудой).

* РМГ 63-2003. Обеспечение эффективности измерений при управлении технологическими процессами. Метрологическая экспертиза технической документации. М.: Издательство стандартов, 2004).

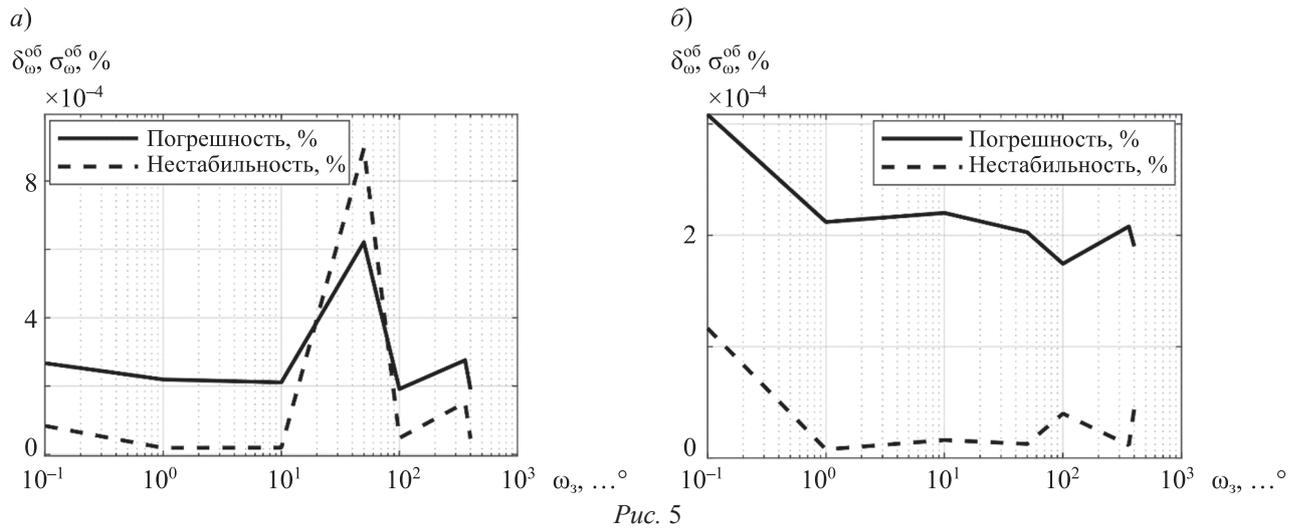


Рис. 5

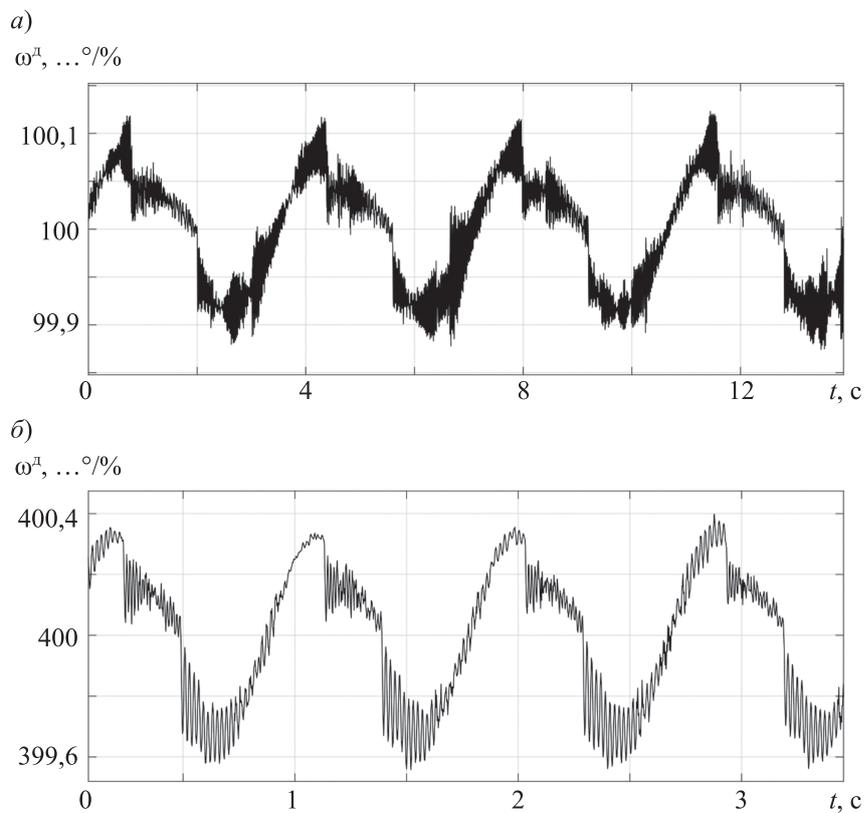


Рис. 6

Для выделения систематических значений погрешности скорости вращения были усреднены значения измеренной скорости вращения в каждом угловом положении планшайбы (с дискретностью ВОГ) по нескольким оборотам.

Систематическая составляющая погрешности скорости вращения ($\Delta\omega^с$) определялась следующим выражением, $^\circ/\text{с}$:

$$\Delta\omega_j^с = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \omega_{j+n(k-1)}^л - \omega_3,$$

где $k = 1, \dots, N$ — номер оборота; N — число оборотов; $j = 1, \dots, n$ — номер измерения внутри оборота; $n = \frac{f^{\text{ВОГ}} 360^\circ}{\omega_3}$ — число отсчетов ВОГ за оборот; $f^{\text{ВОГ}}$ — частота дискретизации ВОГ.

При таком усреднении можно связать номер измерения внутри оборота (j) с угловым положением планшайбы станда (φ_j, \dots°):

$$\varphi_j = \frac{j\omega_3}{f_{\text{ВОГ}}}$$

однако из-за погрешности скорости вращения станда в таком сопоставлении номера измерения и углового положения возникнет некоторая ошибка. В проведенном эксперименте эту ошибку можно считать несущественной, для ее устранения можно снимать отсчеты ВОГ не с фиксированной частотой, а по сигналу от энкодера.

Случайная составляющая погрешности скорости вращения ($\Delta\omega^{\text{сл}}$) определялась следующим выражением, $^\circ/\text{с}$:

$$\Delta\omega_{j+n(k-1)}^{\text{сл}} = \omega_{j+n(k-1)}^{\text{д}} - \Delta\omega_j^{\text{с}} - \omega_3.$$

На рис. 7 представлена зависимость амплитуды систематической составляющей погрешности от заданной скорости вращения планшайбы станда относительно внешней оси. На графике указаны абсолютные и относительные значения систематической составляющей погрешности, усредненные по прямому и обратному ходу.

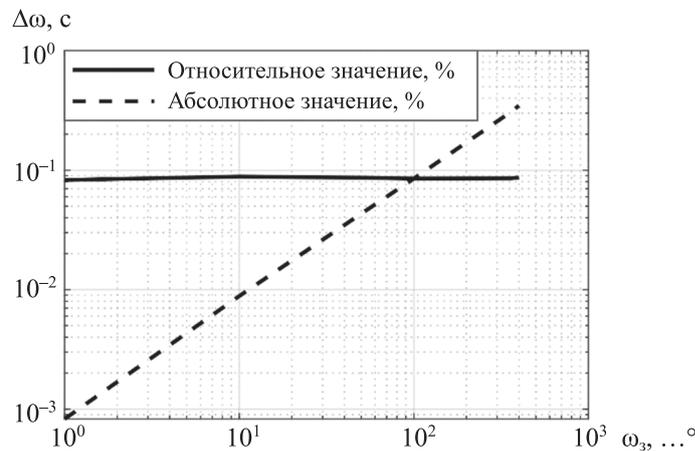


Рис. 7

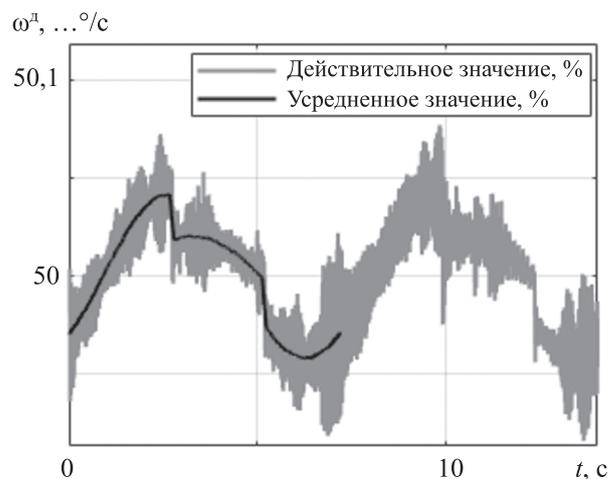


Рис. 8

На рис. 8 проиллюстрированы действительные значения скорости вращения планшайбы станда относительно его внешней оси, измеренные ВОГ (после применения коэффициентов k и ω_0) при заданном значении $50^\circ/\text{с}$, и соответствующие значения, усредненные по 18 полным

оборотам. Экспериментальные данные показывают, что систематическая составляющая погрешности зависит от углового положения планшайбы стенда и увеличивается пропорционально заданной скорости вращения. В общем случае ее можно описать следующим выражением:

$$\Delta\omega^c = f^c(\varphi)\omega_3,$$

где функция $f^c(\varphi)$ описывает зависимость систематической составляющей погрешности от углового положения внешней оси стенда (рис. 9).

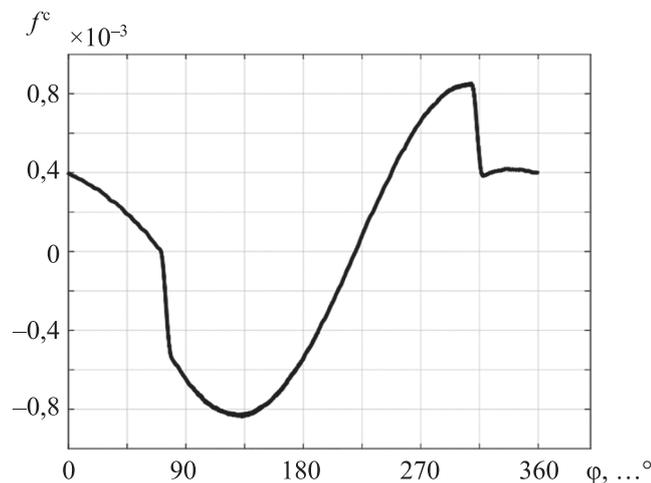


Рис. 9

По случайной составляющей погрешности были найдены значения неустойчивости для внутренней (рис. 10, а) и внешней (б) осей стенда. Как видно из рисунка, значение внутриоборотной неустойчивости уменьшается с увеличением скорости вращения. Максимальное значение неустойчивости для внешней оси составляет 12,2 %, для внутренней — 2,3 % при скорости вращения 0,1 °/с.

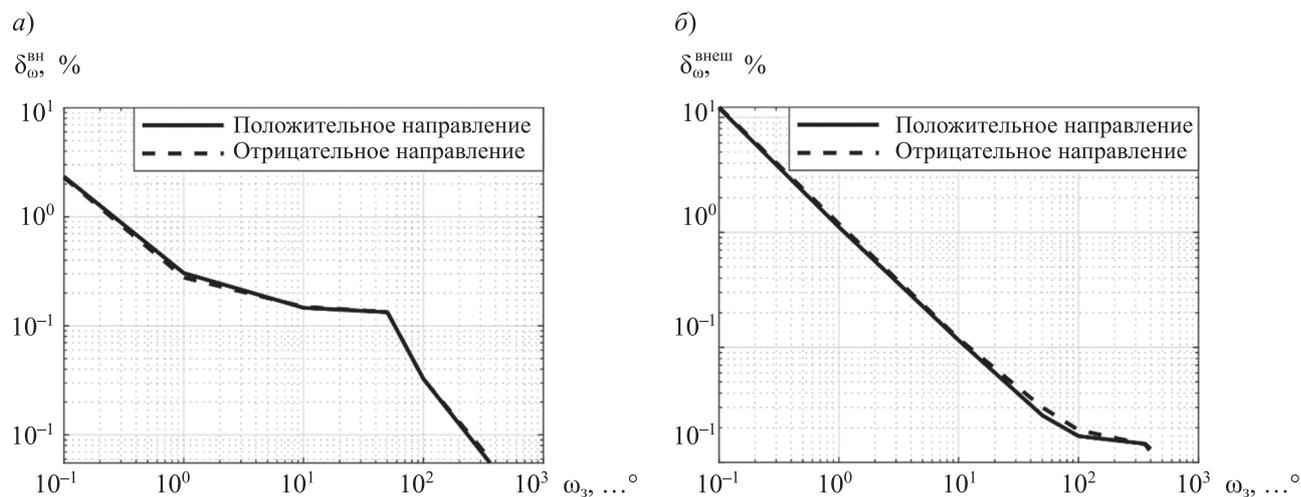


Рис. 10

Заключение. Предложен способ оценки внутриоборотной неустойчивости скорости вращения планшайбы вокруг осей моделирующего стенда. Способ позволяет оценивать мгновенную скорость вращения планшайбы вокруг осей стенда. С помощью щелевого датчика и волоконно-оптического гироскопа проведены измерения скорости вращения планшайбы вокруг осей двухосного моделирующего стенда производства компании „Acutronic“ и оценены их обратная погрешность (0,0006 % для внутренней оси и 0,01 % — для внешней), обратная

нестабильность (0,002 % для внутренней оси и 0,02 % — для внешней) и внутриоборотная нестабильность (2,3 % для внутренней оси и 12,2 % — для внешней). Также была выделена систематическая составляющая погрешности скорости вращения для внешней оси стенда. Систематическая составляющая представлена в виде колебаний с одним периодом на оборот и амплитудой 0,086 % от заданной скорости вращения. Полученные результаты показывают, что предложенный способ измерения может быть использован для оценки внутриоборотных характеристик скорости вращения, в том числе и для определения систематической составляющей соответствующей погрешности, данные о которой могут быть использованы для оптимизации алгоритмов калибровки инерциальных датчиков и навигационных систем на их основе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Анучин О. Н., Емельянцева Г. И.* Интегрированные системы ориентации и навигации (БИНС и БИСО) / Под общ. ред. акад. РАН В. Г. Пешехонова. СПб: Электроприбор, 1999.
2. *Titterton D., Weston J.* Strapdown Inertial Navigation Technology. Institution of Engineering and Technology, 2004. 558 p.
3. *Драницына Е. В., Егоров Д. А., Унтилов А. А.* Современное состояние разработок волоконно-оптических гироскопов и перспективы их развития // Гироскопия и навигация. 2023. Т. 31, № 4(123). С. 2–21.
4. *Степанов О. А.* Интегрированные инерциально-спутниковые системы навигации // Гироскопия и навигация. 2002, № 1. С. 23–46.
5. *Иванов П. А., Лазарев В. А., Бохман Е. Д., Павлов П. А., Филатов Ю. В.* Исследование характеристик трехосного стенда для испытаний навигационных систем // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 3(118). С. 80–93.
6. *Боронахин А. М., Иванов П. А., Бохман Е. Д., Филатов Ю. В., Суков И. Л.* Средства испытаний инерциальных систем и их чувствительных элементов // Матер. XVIII Санкт-Петербургской междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб: Электроприбор, 2011. С. 34–41.
7. *Драницына Е. В.* Калибровка измерительного модуля прецизионной БИНС на волоконно-оптических гироскопах: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2016.
8. *Иванов П. А., Боронахин А. М., Суков И. Л.* Исследование погрешностей триады микромеханических гироскопов с использованием малогабаритного двухосного стенда // Нано- и микросистемная техника. 2010. № 1. С. 35–41.
9. *Иванов П. А.* Разработка и исследование методов испытаний микромеханических модулей: автореф. дис. ... канд. техн. наук. СПб: СПбГЭТУ „ЛЭТИ“, 2011.
10. Каталог поворотных моделирующих стендов производства компании „ИНЕРТЕХ“ [Электронный ресурс]: <<http://inertech-ltd.com/поворотные-испытательные-стенды>>.
11. Каталог поворотных моделирующих стендов производства компании „IdealAerosmith“ [Электронный ресурс]: <<https://www.ideal-aerosmith.com/products/1-2-or-3-axis-rate-and-positioning-tables>>.
12. Каталог поворотных моделирующих стендов производства компании „Acutronic“ [Электронный ресурс]: <<https://www.acutronic.com/simulation-test>>.
13. *Бычков М. Г., Ладыгин А. Н.* Современный сервопривод — классификация и терминология // Докл. науч.-метод. семинара. М.: Изд-во МЭИ, 2013. С. 5–22.
14. *Деревянко А. Е., Валиев А. А., Рожнов А. В., Гляумбетов И. А.* Обзор абсолютных и инкрементальных энкодеров // „Приоритетные направления инновационной деятельности в промышленности“: Сб. науч. статей по итогам 10-й междунар. науч. конф. Казань, 30–31 октября 2020 г. Т. 1. С. 84–86.
15. *Драницына Е. В., Галиева Н. Г., Павлов А. А.* Модель погрешностей волоконно-оптического гироскопа // Матер. XVII конф. молодых ученых „Навигация и управление движением“. СПб: Электроприбор, 2015. С. 342–348.
16. *Ермаков Р. В., Серанова А. А., Львов А. А., Калихман Д. М.* Метод оценивания угловой скорости прецизионного поворотного стенда // Прикаспийский журнал: управление и высокие технологии. 2019. № 4. С. 144–164.
17. *Калихман Д. М., Калихман Л. Я., Садомцев Ю. В., Депутатова Е. А., Нахов С. Ф., Сапожников А. И., Межирицкий Е. Л., Никифоров В. М.* Прецизионный стенд с датчиком угловой скорости в качестве инерциального чувствительного элемента и двухконтурной цифровой системой управления // Авиационная промышленность. 2010. № 1. С. 43–49.
18. *Калихман Д. М., Депутатова Е. А., Пчелинцева С. В., Горбачев В. О.* Концепция проектирования класса прецизионных поворотных стендов с инерциальными ЧЭ в цепи обратной связи // Гироскопия и навигация. 2022. Т. 30, № 3(118). С. 41–64. DOI 10.17285/0869-7035.0098.

19. Ермаков Р. В., Калихман Д. М., Калихман Л. Я., Нахов С. Ф., Туркин В. А., Львов А. А., Садомцев Ю. В., Кривцов Е. П., Янковский А. А. Основы разработки комплексного цифрового управления прецизионными стендами с инерциальными чувствительными элементами по сигналам с измерителей угловой скорости, кажущегося ускорения и оптического датчика угла // XXIII Санкт-Петербургская Междунар. конф. по интегрированным навигационным системам. СПб: Электроприбор, 2016. С. 302–307.
20. Ермаков Р. В., Львов А. А., Светлов М. С. Исследование методов повышения метрологических характеристик стендов для задания углов и угловых скоростей // Изв. ЮФУ. Технические науки. 2017. № 3(188). С. 6–17. DOI 10.23683/2311-3103-2017-3-6-17.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

Вячеслав Александрович Лазарев

— Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ имени В. И. Ульянова (Ленина), кафедра лазерных измерительных и навигационных систем; ассистент;
E-mail: lazarevva4eslav@yandex.ru

Павел Алексеевич Иванов

— канд. техн. наук; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ имени В. И. Ульянова (Ленина), кафедра лазерных измерительных и навигационных систем; доцент;
E-mail: ivanov_etu@mail.ru

Александр Дмитриевич Усков

— студент; Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет „ЛЭТИ“ имени В. И. Ульянова (Ленина), кафедра лазерных измерительных и навигационных систем;
E-mail: uc.kov@yandex.ru

Поступила в редакцию 10.07.24; одобрена после рецензирования 09.09.24; принята к публикации 21.11.24.

REFERENCES

1. Anuchin O.N., Emelyantsev G.I. *Integrirrovannyye sistemy orientatsii i navigatsii (BINS i BISO)* (Integrated Systems of Orientation and Navigation (BINS and BISO)), St. Petersburg, 1999. (in Russ.)
2. Titterton D., Weston J. *Strapdown Inertial Navigation Technology*, Institution of Engineering and Technology, 2004, 558 p.
3. Dranitsyna E.V., Egorov D.A., Untilov A.A. *Gyroscopy and Navigation*, 2023, no. 4(31), pp. 277–289.
4. Stepanov O.A. *Gyroscopy and Navigation*, 2002, no. 1, pp. 23–46. (in Russ.)
5. Ivanov P.A., Lazarev V.A., Bokhman E.D., Pavlov P.A., Filatov Yu.V. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, no. 3(30), pp. 180–188.
6. Boronakhin A.M., Ivanov P.A., Bohman E.D., Filatov Yu.V., Surov I.L. *Materialy XVIII Sankt-Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii po integrirrovannym navigatsionnym sistemam* (Proceedings of the XVIII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems), St. Petersburg, 2011, pp. 34–41. (in Russ.)
7. Dranitsyna E.V. *Kalibrovka izmeritel'nogo modulya pretseziionnoy BINS na volokonno-opticheskikh giroskopakh* (Calibration of the Measuring Module of a Precision SINS on Fiber-optic Gyroscopes), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2016. (in Russ.)
8. Ivanov P.A., Boronakhin A.M., Surov I.L. *Nano- and microsystem technology*, 2010, no. 1, pp. 35–41. (in Russ.)
9. Ivanov P.A. *Razrabotka i issledovaniye metodov ispytaniy mikromekhanicheskikh moduley* (Development and Research of Testing Methods for Micromechanical Modules), Candidate's thesis, St. Petersburg, 2011. (in Russ.)
10. <http://inertech-ltd.com>. (in Russ.)
11. <https://www.ideal-aerosmith.com/products/1-2-or-3-axis-rate-and-positioning-tables>. (in Russ.)
12. <https://www.acutronic.com/simulation-test>. (in Russ.)
13. Bychkov M.G., Ladygin A.N. *Doklady nauchno-metodicheskogo seminara* (Reports of the Scientific and Methodological Seminar), 2013, pp. 5–22. (in Russ.)
14. Derevyanko A.E., Valiev A.A., Rozhnov A.V., Tlyumbetov I.A. *Prioritetnyye napravleniya innovatsionnoy deyatel'nosti v promyshlennosti* (Priority Areas of Innovation Activity in Industry), Collection of scientific articles based on the results of the 10th Intern. Sci. Conf., Kazan, October 30–31, 2020, vol. 1, pp. 84–86. (in Russ.)
15. Dranitsyna E.V., Galieva N.G., Pavlov A.A. *Navigatsiya i upravleniye dvizheniyem* (Navigation and Motion Control), Proceedings of the XVII Conference of Young Scientists, St. Petersburg, 2015, pp. 342–348. (in Russ.)
16. Ermakov R.V., Seranova A.A., Lvov A.A., Kalikhman D.M. *Caspian Journal: management and high technologies*, 2019, no. 4, pp. 144–164. (in Russ.)
17. Kalikhman D.M., Kalikhman L.Ya., Sadomtsev Yu.V., Deputatova E.A., Nakhov S.F., Sapozhnikov A.I., Mezhiritsky E.L., Nikiforov V.M. *Aviation Industry*, 2010, no. 1, pp. 43–49. (in Russ.)
18. Kalikhman D.M., Deputatova E.A., Pchelintseva S.V., Gorbachev V.O. *Gyroscopy and Navigation*, 2022, no. 3(30), pp. C. 155–169.
19. Ermakov R.V., Kalikhman D.M., Kalikhman L.Ya., Nakhov S.F., Turkin V.A., Lvov A.A., Sadomtsev Yu.V., Krivtsov E.P., Yankovsky A.A. *XXIII Sankt-Peterburgskaya Mezhdunarodnaya konferentsiya po integrirrovannym navigatsionnym*

- sistemam* (XXIII St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems.), St. Petersburg, 2016, pp. 302–307. (in Russ.)
20. Ermakov R.V., Lvov A.A., Svetlov M.S. *Izvestiya SFedU. Engineering Sciences*, 2017, no. 3(188), pp. 6–17. DOI 10.23683/2311-3103-2017-3-6-17. (in Russ.)

DATA ON AUTHORS

- Vyacheslav A. Lazarev** — St. Petersburg Electrotechnical University, Department of Laser Measuring and Navigation Systems; Assistant; E-mail: lazarevvy4eslav@yandex.ru
- Alexandr I. Ivanov** — PhD, Associate Professor; St. Petersburg Electrotechnical University, Department of Laser Measuring and Navigation Systems; E-mail: ivanov_etu@mail.ru
- Aleksandr D. Uskov** — Student; St. Petersburg Electrotechnical University, Department of Laser Measuring and Navigation Systems; E-mail: yc.kov@yandex.ru

Received 10.07.24; approved after reviewing 09.09.24; accepted for publication 21.11.24.