

ПРИБОРОСТРОЕНИЕ, МЕТРОЛОГИЯ И ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ И СИСТЕМЫ

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ И УПРАВЛЯЮЩИЕ СИСТЕМЫ

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.144-164
УДК 681.2.088 + 004.2

МЕТОД ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ПРЕЦИЗИОННОГО ПОВОРОТНОГО СТЕНДА

Статья поступила в редакцию 10.09.2019, в окончательном варианте – 25.11.2019.

Ермаков Роман Вячеславович, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, кандидат технических наук, e-mail: roma-ermakov@yandex.ru

Серанова Анна Александровна, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, аспирант, e-mail: seranova.anna@gmail.com

Львов Алексей Арленович, Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А., 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, доктор технических наук, профессор, e-mail: alvova@mail.ru

Калихман Дмитрий Михайлович, филиал ФГУП НПЦ – «ПО «Корпус», 410019, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Осипова, 1, доктор технических наук, e-mail: lidkalihman@yandex.ru

Гироскопические приборы находят широкое применение в различных областях техники. При их производстве применяются управляемые основания (стенды), задающие с высокой точностью и стабильностью угловые скорости, изменяющиеся по определенному закону. Создание подобных стендов является самостоятельной задачей, успешное решение которой во многом определяет прогресс в развитии инерциальной навигации. В статье описан метод, позволяющий произвести оценку угловой скорости платформы поворотного стенда для задания угловой скорости, оптимальную по критерию минимума среднего квадрата погрешности данной оценки, за счёт комплексирования информации с нескольких датчиков, в основе принципов измерения которых лежат различные физические законы. Приводятся выражения, позволяющие оценивать угловую скорость по методу максимального правдоподобия, основываясь на показаниях каждого из датчиков. Описан метод получения интегральной оценки угловой скорости платформы стенда. Проанализированы результаты имитационного моделирования описанного стенда, которые подтвердили целесообразность применения предлагаемой методики.

Ключевые слова: угловые измерения, погрешность, метод максимального правдоподобия, оптимальная оценка, тангенциальное и центростремительное ускорение, угловая скорость, полигауссовский закон распределения

METHOD FOR EVALUATING ANGULAR VELOCITY OF A PRECISION ROTARY TABLE

The article was received by the editorial board on 10.09.2019, in the final version – 25.11.2019.

Ermakov Roman V., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, Cand. Sci. (Engineering), e-mail: roma-ermakov@yandex.ru

Seranova Anna A., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, post-graduate student, e-mail:

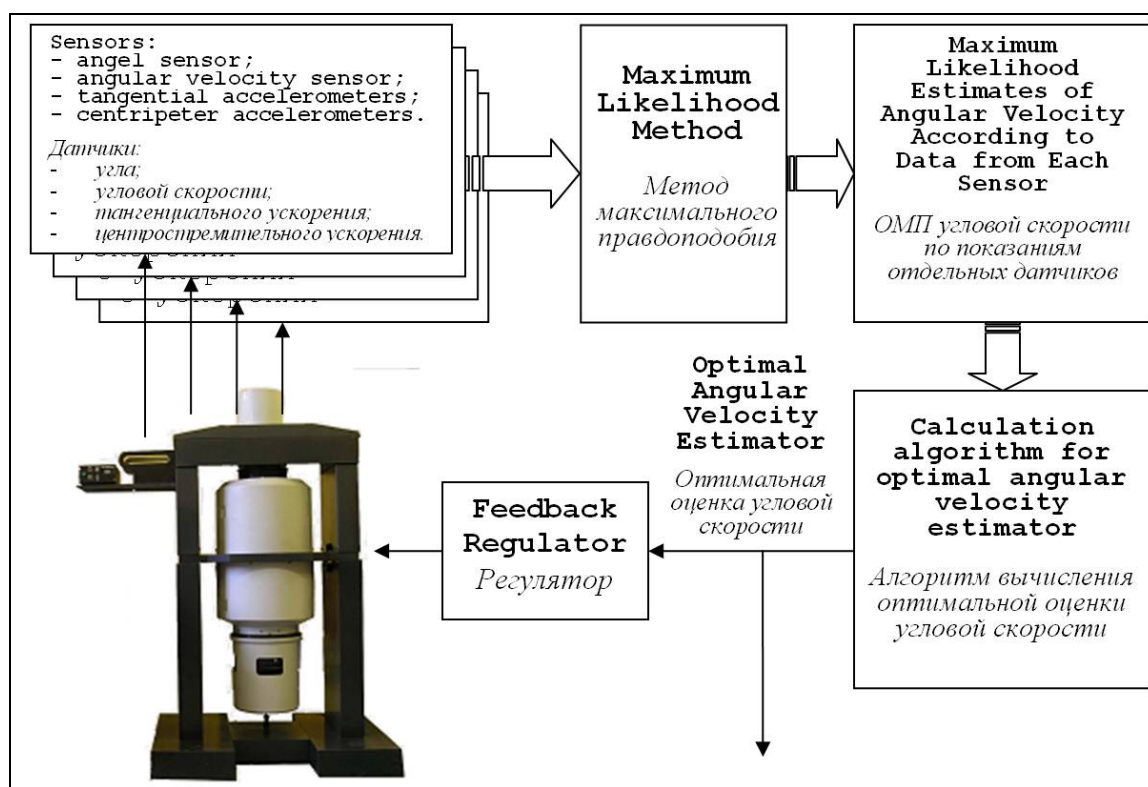
Lvov Aleksey A., Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, 77 Politekhnikeskaya St., Saratov, 410054, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering), Professor, e-mail: alvova@mail.ru

Kalikhman Dmitry M., PC “Korpus”, Branch of FSUE N.A. Pilyugin “NPCAP”, 1 Osipov St., Saratov, 410019, Russian Federation, Doct. Sci. (Engineering)

Gyroscopic devices are widely used in various fields of technology. In their production, controlled bases (stands) are used, which specify with high accuracy and stability angular velocities that vary according to a certain law. The creation of such stands is an independent task, the successful solution of which largely determines the progress in the development of gyroscopic instrumentation. The article describes a method that allows estimating the angular velocity of the platform of the turntable for specifying the angular velocity, which is optimal by the criterion of the minimum mean square error of this estimate, due to the integration of information from several sensors based on the measurement principles of which various physical laws. Expressions are given that allow us to estimate the angular velocity using the maximum likelihood method, based on the readings of each of the sensors. A method for obtaining an integral estimate of the angular velocity of a bench platform is described. The results of simulation modeling of the described stand were analyzed, which confirmed the feasibility of applying the proposed methodology.

Key words: Angular measurements, optical angular sensor, angular velocity sensor, linear acceleration sensor, error, maximum likelihood method, tangential and centripetal acceleration, angular velocity, poly-Gaussian distribution law

Graphical annotation (Графическая аннотация)



Гироскопические приборы находят широкое применение в системах ориентации морских объектов, авиационной, ракетно-космической техники, навигационных системах исследования состояния газо- и нефтепроводов, в инклинометрии, и т.п. При наладке и испытаниях прецизионных гироскопических приборов применяются управляемые основания (стенды), задающие с высокой точностью и стабильностью угловые скорости, изменяющиеся по определенному закону [2, 14, 16]. Создание подобных стендов является самостоятельной задачей, успешное решение которой в значительной степени влияет на прогресс в области инерциальной навигации [3, 17, 25, 28, 29].

Поворотные стенды, применяющиеся для испытаний гироскопических приборов, должны быть как минимум на порядок более точны, чем сами испытываемые приборы, а также соответствующие режимы контроля, т.е. возможность задавать угловую скорость, изменяющуюся по определенному закону.

Традиционно в основе конструкции поворотного стенда для воспроизведения угловой скорости лежит датчик угла [4, 29, 38, 42–43, 45, 46]. Главный недостаток данной схемы заключается в невозможности точного воспроизведения низких угловых скоростей: единицы – десятки доли градуса в час. Альтернативное решение, лишенное указанного недостатка, состоит в использовании в составе поворотного стенда инерциальных чувствительных элементов. Такие стенды описаны в работах [9, 15, 22, 23, 31, 36] и др. В упомянутых работах, как правило, не рассматриваются

вопросы получения оценки угловой скорости, оптимальной в смысле минимизации погрешности её измерения, с учетом информации с отдельных датчиков.

Цель данной статьи состоит в разработке метода повышения точности воспроизведения и измерения угловой скорости с помощью прецизионных поворотных стенов, включающих в свой состав инерциальные датчики и оптические датчики угла. Для этого разрабатываются математические модели погрешностей упомянутых датчиков, которые учитывают реальные их (погрешностей) распределения, методики и алгоритмы обработки измерительной информации, производящие оптимальную в смысле минимума среднего квадрата погрешности оценки параметров указанных математических моделей и учитывающие информацию со всех датчиков, а также статистические свойства погрешностей датчиков.

Конструкция измерительного стенов. Как правило, конструктивно стенов состоит из поворотной платформы, электродвигателя, датчика угла и системы управления. Такие стенов не обеспечивают необходимую высокую точность воспроизведения малых угловых скоростей для контроля датчиков угловой скорости среднего и высокого классов точности [15, 16]. Одним из возможных способов улучшения точностных показателей является введение в конструкцию стенов инерциальных датчиков: акселерометров, выдающих информацию о тангенциальной и центростремительной составляющей линейного ускорения в точке их установки и гироскопов (датчиков угловой скорости, ДУС). Подобные стенов рассмотрены, например, в работах [11, 15, 23, 31, 36].

На рисунке 1 приведена обобщённая схема стенов, рассматриваемого в данной статье. В состав стенов входит датчик: угла (2), угловой скорости (ДУС) (4), тангенциальной (6) и центростремительной (7) составляющих линейного ускорения, расположенные на вспомогательной платформе (5), которая в свою очередь связана с основной платформой (1), где устанавливается испытуемый прибор (10) посредством жёсткого вала (3), закреплённого в прецизионных опорах (на рисунке не показаны).

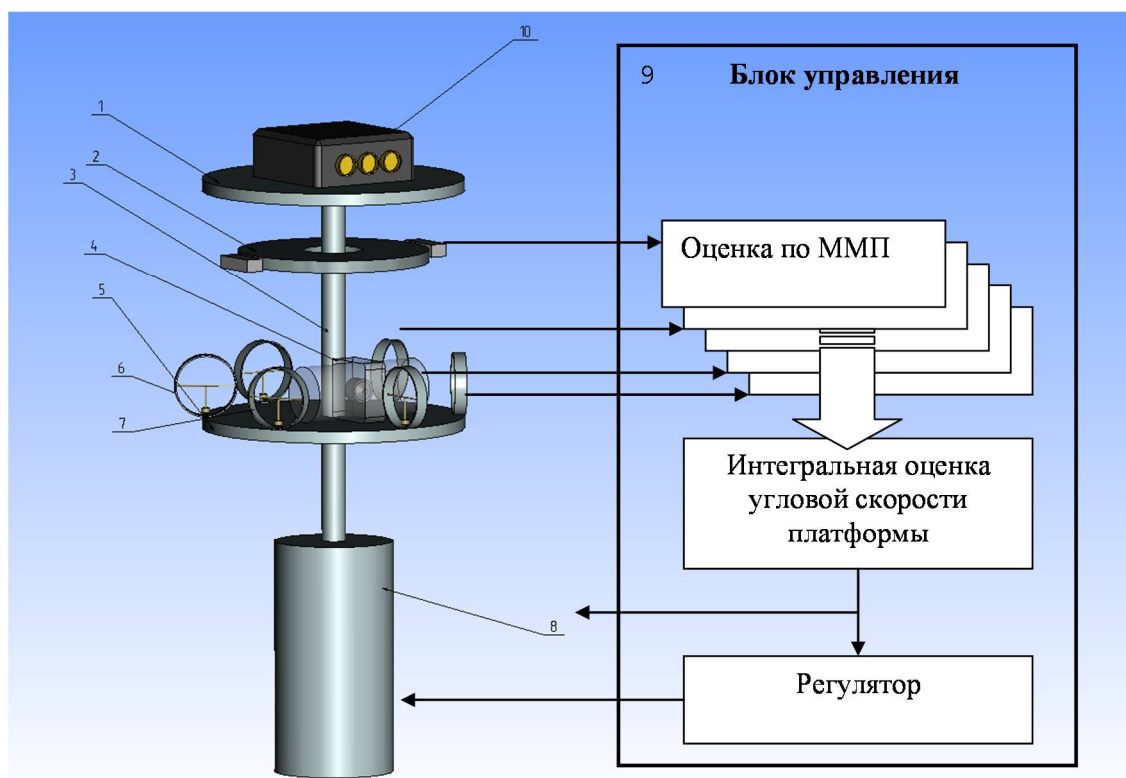


Рисунок 1 – Обобщённая схема стенов

Вал стенов приводится во вращение при помощи моментного двигателя (8), который контролирует блок управления (9). Информация с датчиков об угле, угловой скорости, тангенциальной и центростремительной составляющих ускорения поступает в регулятор блока управления, который вырабатывает в сигналы управления двигателем. Если используемые датчики имеют достаточную

полосу пропускания, а моментный двигатель – достаточную мощность, стенд способен поворачивать свою платформу с заданными угловой скоростью и угловым ускорением. При этом угловая скорость может изменяться по заданному закону.

Основное преимущество построения стенда по указанной схеме заключается в некоррелированности погрешностей измерений используемых датчиков, основанных на различных физических принципах измерения. Точность определения параметров движения во многом определяется тем, насколько хорошо известны значения параметров модели погрешности конкретного датчика.

В перечисленных ранее работах недостаточно внимания уделяется вопросу точности оценивания угловой скорости поворотной платформы стенда. В частности, в [15] проводится качественная оценка погрешностей, в [9, 18, 38] погрешность стенда отождествляется с погрешностью единственного датчика (ДУС либо датчика угла), по сигналу с которого производится управление приводом стенда. В работах, рассматривающих эталонные поворотные столы, например, [27, 29, 33, 35, 38, 44, 47], большое внимание уделено погрешностям воспроизведения и измерения углов. В контексте же достоверного воспроизведения и измерения малых угловых скоростей информация об угле разворота платформы носит второстепенный характер, поскольку недостаточная разрешающая способность современных датчиков угла не позволяет производить мгновенную оценку угловой скорости с необходимой точностью [13, 31]. В связи с вышесказанным данный метод измерения угловой скорости непригоден для высокоточного воспроизведения и измерения низких угловых скоростей, изменяющихся по определённому закону.

Поэтому основная задача статьи состоит в **нахождении оптимальной в смысле минимума среднего квадрата погрешности оценки угловой скорости стенда**, представленного на рисунке 1. Далее полученная оценка используется в системе управления приводом стенда, а также в качестве результата измерения мгновенной скорости платформы. Помимо этого, во время определения оценки угловой скорости вычисляется её неопределенность.

Для того чтобы найти описанную выше оценку угловой скорости, авторами предложено использование классического метода максимального правдоподобия (ММП). Чтобы найти асимптотически эффективную оценку максимального правдоподобия (ОМП) требуется разработать модели погрешностей отдельных датчиков, входящих в состав стенда и проанализировать статистические свойства разработанных моделей погрешностей.

Ниже авторами будут получены выражения для оценок угловой скорости по информации от датчиков угла, угловой скорости (ДУС), тангенциального и центростремительного ускорений как функций угловой скорости вращения платформы стенда.

Оценка угловой скорости платформы по показаниям различных датчиков.

Погрешность оценки угловой скорости платформы по показаниям датчика угловой скорости. Традиционно статическая передаточная функция датчика угловой скорости принимается линейной [15]:

$$\hat{\omega}_r = M_{\omega_r} \omega + \zeta_{\omega_r}, \quad (1)$$

где $\hat{\omega}_r$ – оценка угловой скорости платформы, полученная по показаниям датчика угловой скорости; M_{ω_r} – масштабный коэффициент датчика; ω – истинное значение угловой скорости; ζ_{ω_r} – погрешность датчика. При этом считается, что математическое ожидание погрешности ζ_{ω_r} датчика угловой скорости ω_r^0 неизменно на протяжении всего измерения, но может изменяться от измерения к измерению. Необходимо отметить, что величина ω_r^0 изменяется от включения к включению датчика по случайному закону, т.е. сама представляет собой случайную величину, не обязательно имеющую нормальное распределение. Закон распределения данной случайной величины обусловлен конструкцией конкретного датчика. Однако производителям датчиков в процессе производства удобнее назначить диапазон граничных значений параметра ω_r^0 , не делая при этом предположений о характере его распределения. В статье авторами делается допущение о том, что величина ω_r^0 имеет равномерное распределение на интервале $[-d; d]$. Тогда, используя выражения для композиции законов распределения [24]:

$$p(\eta) = \int_{-\infty}^{\infty} p(\xi_1) q(\eta - \xi_1) d\xi_1; \quad \eta = \xi_1 + \xi_2;$$

$$p(\xi) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right\};$$

$$q(\xi) = \begin{cases} 1/2d, & |\xi| \leq d \\ 0, & |\xi| > d \end{cases};$$

$$\xi_1 = \omega_r^0; \quad \xi_2 = \zeta_{\omega_r} - \omega_r^0;$$

$$\eta = \zeta_{\omega_r};$$

распределение плотности вероятности погрешности определения угловой скорости может быть представлено выражением:

$$p(\eta) = \int_{\eta-d}^{\eta+d} \frac{1}{2d\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{\xi^2}{2\sigma^2}\right\} d\xi, \quad (2)$$

где σ – стандартное отклонение случайной величины ζ_{ω_r} .

В качестве решения уравнения (2) авторами было получено следующее выражение:

$$p(\eta) = \frac{1}{4d} \left[\operatorname{erf}\left(\frac{\eta+d}{\sqrt{2}\sigma}\right) - \operatorname{erf}\left(\frac{\eta-d}{\sqrt{2}\sigma}\right) \right], \quad (3)$$

где $\operatorname{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$ – функция Лапласа.

На рисунке 2 представлены кривые $p(\eta)$ для некоторых значений d при неизменном σ . Видно, что при $d/\sigma \rightarrow 0$ форма кривой плотности вероятности распределения стремится к нормальному, а при $d/\sigma \rightarrow \infty$ – к равномерному. Значения d и σ , использованные авторами, были взяты из [15].

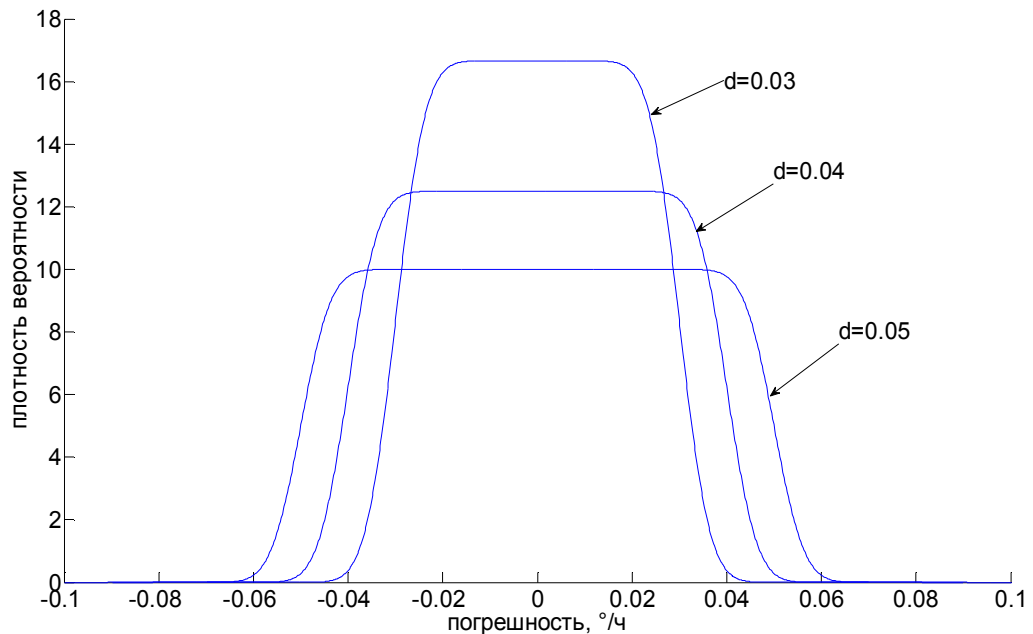


Рисунок 2 – Распределение плотности вероятности для различных значений d при фиксированном $\sigma = 0,003$

Погрешность оценки угловой скорости платформы, по показаниям датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения. Тангенциальная составляющая линейного ускорения, измеряемая соответствующими датчиками (акселерометрами), равна: $a_\tau = \varepsilon r / g$, где a_τ – значение тангенциальной составляющей линейного ускорения; ε – угловое ускорение; r – радиус, соответствующий

ющий расстоянию между центром вращения и центром масс чувствительного элемента акселерометра; g – проекция силы тяжести на ось чувствительности акселерометра [15]. Оценку угловой скорости вращения платформы стенда по показаниям датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения за интервал времени $T = t_n - t_{n-1}$:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{1}{T} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{g}{K_\tau^r \cdot r} \hat{a}_\tau dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}] \quad (4)$$

где T – период интегрирования, а коэффициент K_τ^r описывает неточность установки датчика.

Запишем измеряемую датчиком величину ускорения $\hat{a}_\tau$ в виде:

$$\hat{a}_\tau = M_\tau a_\tau + \zeta_{a_\tau} \quad (5)$$

где a_τ – истинное значение тангенциальной составляющей линейного ускорения; ζ_{a_τ} – случайная составляющая погрешности; M_τ – масштабный коэффициент датчика. Тогда можем представить (4) в следующем виде:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{1}{T} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{g(M_\tau a_\tau + \zeta_{a_\tau})}{K_\tau^r \cdot r} dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}] \quad (6)$$

Будем считать, что конструкция стенда абсолютно жёсткая, вследствие чего K_τ^r – постоянная, тогда можем вынести множитель $g/(K_\tau^r r)$ из-под интеграла. Представим $M_\tau = M_\tau^* + \Delta M_\tau$, где M_τ^* – «идеальный»¹ масштабный коэффициент; ΔM_τ – погрешность масштабного коэффициента, получим:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{1}{T} \frac{1}{K_\tau^r r} \int_{t_{n-1}}^{t_n} g(M_\tau^* a_\tau + \Delta M_\tau a_\tau + M_\tau^* \zeta_{a_\tau} + \Delta M_\tau \zeta_{a_\tau}) dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}]. \quad (7)$$

Слагаемым $\Delta M_\tau \zeta_{a_\tau}$ в выражении (7) можно пренебречь из-за малости сомножителей. Представим $\zeta_{a_\tau} = a_\tau^0 + \zeta_{a_\tau}^r$ где a_τ^0 – математическое ожидание случайной составляющей показаний датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения. Считаем, как и прежде, величину a_τ^0 неизменной в течение времени измерения, но изменяющейся от измерения к измерению случайным образом. Погрешность $\zeta_{a_\tau}^r$ – случайная величина с гауссовым законом распределения и нулевым математическим ожиданием. Учитывая вышеизложенное, запишем:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{1}{T} \frac{1}{K_\tau^r r} \int_{t_{n-1}}^{t_n} g(M_\tau^* a_\tau + \Delta M_\tau a_\tau + M_\tau^* a_\tau^0 + M_\tau^* \zeta_{a_\tau}^r) dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}] \quad (8)$$

Учитывая, что в (8) $M_\tau^* a_\tau$, $\Delta M_\tau a_\tau$, $M_\tau^* a_\tau^0$ не зависят от времени, окончательно можем записать:

$$\hat{\omega}_\tau[t_n] = \frac{M_\tau^*}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau}{K_\tau^r} \omega + \omega_\tau^0 + \frac{1}{T} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} M_\tau^* \int_{t_{n-1}}^{t_n} g \zeta_{a_\tau}^r dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}] \quad (9)$$

где ω – истинная угловая скорость платформы, а величина $\omega_\tau^0 = \frac{1}{T} \int_{t_{n-1}}^{t_n} \frac{g M_\tau^* a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r} dt = \frac{g M_\tau^* a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r}$ пред-

ставляет собой постоянную составляющую погрешности оценки угловой скорости платформы по показаниям датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения. Видно, что величина ω_τ^0 не зависит от времени интегрирования. Также нетрудно заметить, что обе составляющие погрешности обратно пропорциональны радиусу. Обусловленная постоянной составляющей погрешность будет накапливаться в процессе интегрирования, в связи с чем требуется периодически корректировать текущее значение оценки угловой скорости по информации от других датчиков.

¹ Здесь и далее под «идеальным» значением параметра будем понимать такое значение, которое было бы у данного параметра (масштабного коэффициента, частоты генератора и т.д.) в случае, когда погрешности отсутствуют. Иными словами, это значение, указанное в паспорте прибора.

Далее произведём оценку влияния нестабильности задающего генератора на точность оценивания угловой скорости платформы стенда по сигналу датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения. Период дискретности по времени алгоритма может быть представлен в виде:

$$T = N_{3Г} / f_{3Г} = N_{3Г} / (M_{3Г} f_0 + \zeta_T), \quad (10)$$

где T – период дискретности алгоритма по времени; $N_{3Г}$ – число тактов генератора в течение одного периода; $f_{3Г}$ – истинное значение частоты задающего генератора; $M_{3Г}$ – погрешность задающего генератора; f_0 – «идеальное» значение частоты задающего генератора; ζ_T – случайная составляющая погрешности задающего генератора (обусловлена джиттером). Ввиду того, что число тактов $N_{3Г}$ велико, а величина ζ_T имеет нулевое математическое ожидание, будем считать $\zeta_T = 0$. В этом случае можно представить (10) в виде:

$$T = N_{3Г} / M_{3Г} f_0 = T_0 / M_{3Г} \quad (11)$$

где T_0 – «идеальная» величина периода дискретности алгоритма.

Подставив (11) в (9), получаем:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_\tau[t_n] = & \frac{M_\tau^* M_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau M_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \omega_\tau^0 + \frac{M_{3Г}}{T_0} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} M_\tau^* \int_{t_{n-1}}^{t_n} g \zeta_{a_\tau}^r dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}], \\ \omega_\tau^0 = & \frac{g M_\tau^* M_{3Г} a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r}. \end{aligned} \quad (12)$$

Представляя $M_{3Г}$ в виде $M_{3Г} = 1 + \Delta_{3Г}$, где $\Delta_{3Г}$ – абсолютная величина погрешности частоты задающего генератора, запишем предыдущее выражение в следующем виде:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_\tau[t_n] = & \frac{M_\tau^*}{K_\tau^r} \omega + \frac{M_\tau^* \Delta_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau \Delta_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \omega_\tau^0 + \\ & + \frac{1 + \Delta_{3Г}}{T_0} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} M_\tau^* \int_{t_{n-1}}^{t_n} g \zeta_{a_\tau}^r dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}], \end{aligned} \quad (13)$$

$$\omega_\tau^0 = \frac{g M_\tau^* (1 + \Delta_{3Г}) a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r}.$$

Современные кварцевые генераторы имеют погрешность частоты в пределах $10^{-5} \div 10^{-8}$ от номинального значения; рубидиевые и цезиевые стандарты имеют погрешности в диапазоне $10^{-8} \div 10^{-11}$ [5, 6, 8, 10, 27, 30, 40]. Учитывая это, приближённо запишем:

$$\begin{aligned} \hat{\omega}_\tau[t_n] \cong & \frac{M_\tau^*}{K_\tau^r} \omega + \frac{M_\tau^* \Delta_{3Г}}{K_\tau^r} \omega + \frac{\Delta M_\tau}{K_\tau^r} \omega + \omega_\tau^0 + \frac{1}{T_0} \frac{1}{K_\tau^r \cdot r} M_\tau^* \int_{t_{n-1}}^{t_n} g \zeta_{a_\tau}^r dt + \hat{\omega}_\tau[t_{n-1}], \\ \omega_\tau^0 \cong & \frac{g M_\tau^* a_\tau^0}{K_\tau^r \cdot r}. \end{aligned} \quad (14)$$

Из приведённых выше выражений видно, что эффекты, обусловленные нестабильностью частоты генератора стенда, выражаются в смещении оценки угловой скорости, причём величина данного смещения пропорциональна измеряемой угловой скорости. В случае использования рубидиевых либо цезиевых стандартов частоты данной погрешностью можно пренебречь. При использовании кварцевого генератора и погрешности масштабного коэффициента стенда $0,001 \% \div 0,0001 \%$ указанную погрешность нужно учитывать.

Аналогично погрешности датчика угловой скорости будем считать, что величина a_τ^0 неизменна в течение измерения, но изменяется от измерения к измерению. Тогда плотность вероятности погрешности оценки угловой скорости по информации от датчика тангенциальной составляющей линейного ускорения будет распределена аналогично датчику угловой скорости и по форме совпадёт с выражением (3), хотя значения параметров распределения будут иметь другой физический смысл.

Погрешность оценки угловой скорости платформы по показаниям датчика центростремительной составляющей линейного ускорения. В [15] приводится выражение для центростремительной составляющей линейного ускорения, действующего на расстоянии r от оси вращения платформы поворотного стенда:

$$a_y = \omega^2 r / g. \quad (15)$$

Запишем выражение для оценки угловой скорости вращения поворотной платформы стенда по сигналу от датчика центростремительной составляющей линейного ускорения:

$$\hat{\omega}_u = \sqrt{\frac{a_u g}{r}} = \sqrt{\frac{M_u^* + \Delta M_u}{K_u^r}} \left(\omega - \sqrt{\frac{g(\zeta_{a_u}^r + a_u^0)}{r}} \right), \quad (16)$$

где $\hat{a}_u$ – показания датчика центростремительной составляющей линейного ускорения; a_u – «истинная» величина центростремительной составляющей линейного ускорения; M_u^* – «идеальное» значение масштабного коэффициента датчика; ΔM_u – погрешность масштабного коэффициента датчика; a_u^0 – постоянная составляющая погрешности датчика; $\zeta_{a_u}^r$ – случайная величина с гауссовым законом распределения и нулевым математическим ожиданием. Считаем, как и прежде, величину a_u^0 неизменной в течение времени измерения, но изменяющейся от измерения к измерению случайным образом.

Разложив величину $\sqrt{g(\zeta_{a_u}^r + a_u^0)}/r$ в ряд Тейлора относительно $\zeta_{a_u}^r$, можем приближённо представить (16) как:

$$\hat{\omega}_u \cong \sqrt{\frac{M_u^* + \Delta M_u}{K_u^r}} \omega - \sqrt{\frac{M_u^* + \Delta M_u}{K_u^r}} \frac{g}{r} a_u^0 - \sqrt{\frac{M_u^* + \Delta M_u}{K_u^r}} \frac{g}{r} \frac{1}{4a_u^0} \zeta_{a_u}^r. \quad (17)$$

В дальнейшем будем использовать данную линеаризованную оценку при получении оценки угловой скорости платформы стенда методом максимального правдоподобия.

Так же как в случае с датчиком тангенциальной составляющей линейного ускорения, плотность вероятности погрешности оценки угловой скорости по показаниям датчика центростремительной составляющей линейного ускорения будет распределена аналогично датчику угловой скорости и по форме совпадёт с выражением (3), хотя значения параметров распределения будут иметь другой физический смысл.

Погрешность датчика угла. В [11, 13] приводится выражение для полной погрешности оптического датчика угла, основанное на физическом принципе действия данного датчика и описывающее, как возникают отдельные составляющие данной погрешности. Как правило, физические величины, которые вызывают эту погрешность, не доступны для измерения. Поэтому анализ и компенсация погрешности оптического датчика удобнее производить с использованием представления его погрешности в следующем виде [13]:

$$\Delta\alpha(\alpha) = \Delta\alpha_0(\alpha) + \Delta\alpha_\zeta, \quad (18)$$

где величины $\Delta\alpha_0(\alpha)$ и $\Delta\alpha_\zeta$ представляют систематическую и случайную составляющие погрешности датчика угла, причём дисперсия случайной составляющей $\sigma^2(\Delta\alpha_\zeta, \alpha)$ есть функция измеряемого угла α .

Экспериментальные данные, приведенные в [12, 13], свидетельствуют о несоответствии закона распределения плотности вероятности погрешности датчика угла гауссовому закону распределения. На рисунке 3 приводятся погрешности одного из исследованных датчиков угла, а на рисунке 4 – гистограмма распределения приведенных на рисунке 3 погрешностей для угла разворота призмы 210° .

В [12, 20] предлагается методика аппроксимации апостериорной плотности вероятности вектора оцениваемых параметров системы с помощью выпуклой комбинации гауссовых плотностей вероятности. Кратко изложим её суть.

Обозначим через $\mathbf{Y}$ вектор выходных измерений модели, $\mathbf{X}$ – вектор параметров модели, тогда

$$\mathbf{Y} = h(\mathbf{X}, \mathbf{\Xi}),$$

где $h(\bullet)$ – передаточная функция; $\mathbf{\Xi}$ – погрешность измерений. Алгоритм аппроксимирует априорную область изменения оцениваемых параметров модели комбинацией гауссовых распределений:

$$p_{\mathbf{X}}(\mathbf{x}) = \sum_{i=1}^N \rho_i \cdot N_x\{\mathbf{\mu}_i, \boldsymbol{\gamma}_i\}, \quad (19)$$

где $N_x\{\mathbf{\mu}_i, \boldsymbol{\gamma}_i\} = \left(1/\sqrt{(2\pi)^n \det \boldsymbol{\gamma}_i}\right) \cdot \exp\left\{\left[\mathbf{x} - \mathbf{\mu}_i\right]^T \cdot \boldsymbol{\gamma}_i^{-1} \cdot \left[\mathbf{x} - \mathbf{\mu}_i\right]\right\}$, $\boldsymbol{\gamma}_i$ – корреляционная матрица вектора

$\mathbf{x}$, а неотрицательные коэффициенты ρ_i удовлетворяют условию $\sum_{i=1}^N \rho_i = 1$.

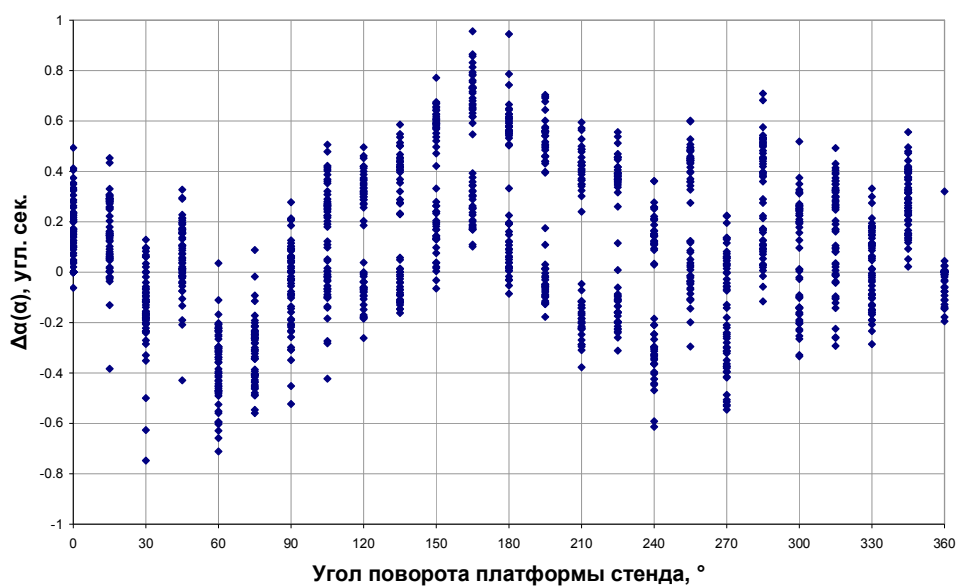


Рисунок 3 – Погрешности бесконтактного оптического датчика угла

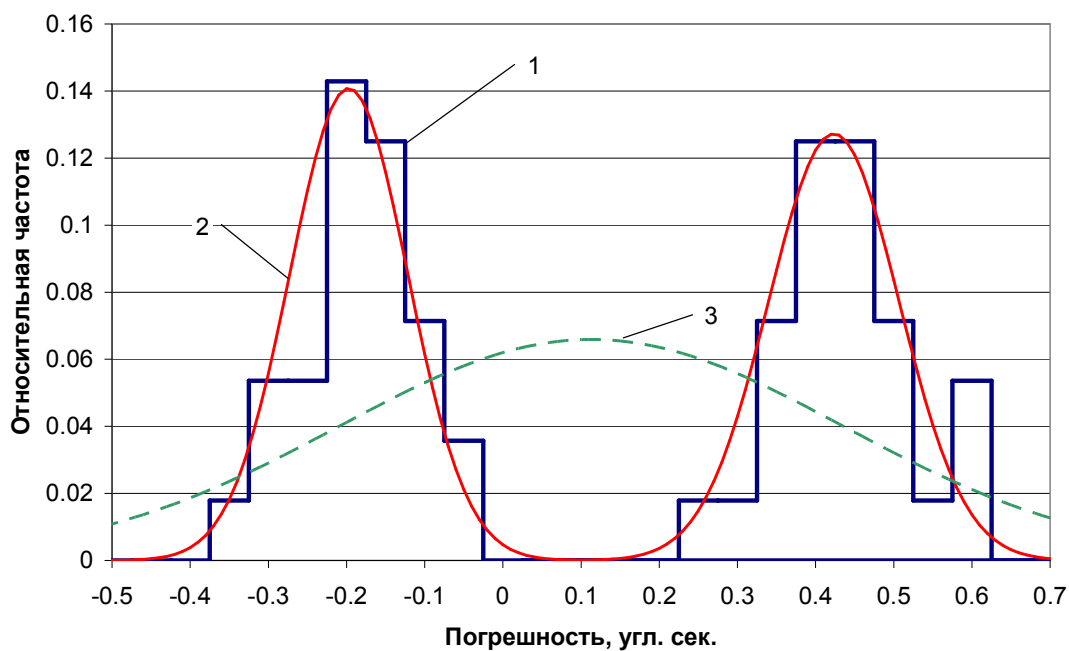


Рисунок 4 – Гистограмма распределения относительных частот погрешностей, приведенных на рисунке 3 для угла разворота призмы 210° (1), их аппроксимация по полигауссовскому (2) и нормальному закону распределения

В [12] приводится выражение для апостериорной плотности вероятности:

$$p(x|y) = \sum_{i=1}^N u_i \cdot N_x\{\hat{\mu}_i, \hat{\gamma}_i\}, \quad u_i = \frac{\alpha_i \cdot N_y\{\mathbf{a}_i + \mathbf{A}_i \cdot \boldsymbol{\mu}, \hat{\mathbf{W}}_i\}}{\sum_{i=1}^N \alpha_i \cdot N_y\{\mathbf{a}_i + \mathbf{A}_i \cdot \boldsymbol{\mu}, \hat{\mathbf{W}}_i\}}. \quad (20)$$

N_y определяется аналогично N_x (см. выше). Тогда

$$\begin{aligned}\hat{\mathbf{W}}_i &= \mathbf{W} + \mathbf{A}_i \cdot \gamma_i \cdot \mathbf{A}_i^T, \\ \hat{\boldsymbol{\mu}}_i &= \boldsymbol{\mu} + \gamma_i \cdot \mathbf{A}_i^T \cdot \hat{\mathbf{W}}_i^{-1} \cdot (\mathbf{y} - \mathbf{a}_i - \mathbf{A}_i \cdot \boldsymbol{\mu}), \\ \hat{\gamma}_i &= \gamma_i - \gamma_i \cdot \mathbf{A}_i^T \cdot \hat{\mathbf{W}}_i^{-1} \cdot \mathbf{A}_i \cdot \gamma_i,\end{aligned}\quad (21)$$

где $\mathbf{Y} \approx \mathbf{a}_i + \mathbf{A}_i \cdot \mathbf{x} + \mathbf{G}_i \cdot \boldsymbol{\Xi}$, $\mathbf{W}_i = \mathbf{G}_i \cdot \mathbf{G}_i^T$ – разложение в ряд Тейлора функции $h(\bullet)$ в окрестности i -го пика. Введём обозначения:

$$\mathbf{a}_i = h(\boldsymbol{\mu}_i, 0) - \nabla_x h(\boldsymbol{\mu}_i, 0) \cdot \boldsymbol{\mu}_i, \quad \mathbf{A}_i = \nabla_x h(\boldsymbol{\mu}_i, 0), \quad \mathbf{G}_i = \nabla_\xi h(\boldsymbol{\mu}_i, 0).$$

Произведя обработку вектора выходных измерений по алгоритму, который был описан в [12, 20], можно получить оценку, оптимальную в смысле минимума среднего квадрата ошибки:

$$\mathbf{m} = M\{\mathbf{X}|\mathbf{Y} = \mathbf{y}\} = \int \mathbf{x} \cdot p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) \cdot d\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N u_i \cdot \int \mathbf{x} \cdot N_x\{\hat{\boldsymbol{\mu}}_i, \hat{\gamma}_i\} \cdot d\mathbf{x} = \sum_{i=1}^N u_i \cdot \hat{\boldsymbol{\mu}}_i. \quad (22)$$

Из рисунка 4 видно, что предлагаемая модель позволяет более точно описать экспериментальные данные.

Погрешность оценки угловой скорости платформы по показаниям датчика угла. Поскольку рассматриваемый в работе датчик угла является дискретным датчиком, угловая скорость по его показаниям может быть найдена с использованием выражения:

$$\hat{\omega}_{ДУ} = (\alpha[n] - \alpha[n-1]) / T, \quad (23)$$

где T – период дискретности алгоритма по времени; $\alpha[n]$ – показания датчика угла в момент времени n . Пусть оценка угла, полученная по информации от датчика угла, представлена выражением:

$$\hat{\alpha} = \alpha + \Delta\alpha_0(\alpha) + \Delta\alpha_\zeta, \quad (24)$$

где $\hat{\alpha}$ – оценка угла; $\Delta\alpha_0(\alpha)$ – систематическая составляющая погрешности датчика угла; $\Delta\alpha_\zeta$ – случайная составляющая погрешности датчика угла; α – истинное значение угла.

Тогда можем представить оценку угловой скорости по информации с датчика угла в виде:

$$\hat{\omega}_{ДУ} \cong \omega + \Delta_{3T}\omega + \frac{(\Delta\alpha_0(\alpha[n]) - \Delta\alpha_0(\alpha[n-1]))}{\Delta\alpha} \omega + \frac{\Delta\alpha_\zeta}{T_0}. \quad (25)$$

Современные бесконтактные оптические датчики угла имеют случайную составляющую погрешности на уровне десятых долей угловой секунды [12, 13, 17]. Следовательно, если период дискретности алгоритма измерения угловой скорости составляет 1 мс, случайная составляющая погрешности угловой скорости составит сотни угловых секунд за секунду (градусов в час); а если период дискретности составляет 10 мс – десятки градусов в час.

В связи с этим авторы считают невозможным непосредственное использование датчика угла для управления прецизионным поворотным стендом.

Оптимальное оценивание угловой скорости платформы поворотного стенда методом максимального правдоподобия. Ранее было показано несоответствие законов распределения погрешностей показаний датчиков, которые входят в состав стенда, нормальному закону распределения. В связи с этим использование МНК для определения оценки угловой скорости по информации от совокупности входящих в состав стенда датчиков некорректно. Находить оптимальную в смысле минимума среднего квадрата погрешности оценку при известных плотностях распределения погрешности измерений авторами предлагается методом максимального правдоподобия (ММП) [7, 19, 33].

Обозначим измеряемые выходные значения датчиков y_k . Тогда

$$y_k = M_k g_k(\omega_k) + \xi_k = M_k g_k(\omega_k) + (\zeta_k + \xi_k^0), \quad (26)$$

где ω – истинная угловая скорость поворотной платформы стенда; $g(\omega)$ – передаточная функция датчика; M – масштабный коэффициент датчика; ξ – значение аддитивной погрешности датчика, являющейся суммой систематической ξ^0 и случайной ζ составляющих, $k = 1 \dots m$ – номер измерительного канала. Оценка угловой скорости по данным с k -го измерительного канала:

$$\tilde{\omega}_k = f_k(y_k, z_1, z_2, z_3, \dots), \quad (27)$$

где функция $f_k(y_k, z_1, z_2, z_3, \dots)$ для ДУС определяется выражением (1), для датчика угла – выражением (25), а для датчиков тангенциальной и центростремительной составляющих линейного ускорения – выражениями (14) и (17) соответственно.

Нахождение итоговой оценки угловой скорости $\tilde{\omega}_{ML}$ по ММП требует определения ОМП для всех измерительных каналов поворотного стенда. Далее для каждого измерительного канала построим систему нормальных уравнений. Для простоты пока полагаем масштабные коэффициенты M_k постоянными и известными.

В [11] было показано, что плотность вероятности погрешности показаний в каналах датчика угла, центростремительной и тангенциальной составляющих линейного ускорения распределена в соответствии с (3), а распределение плотности вероятности погрешности показаний датчика угла может быть описано с использованием полигауссовской аппроксимации (22).

Обозначим $x_k = g_k(\omega_{ki})$, тогда можем представить (26) в виде:

$$\xi_{ki} = y_{ki} - M_k x_k. \quad (28)$$

Будем полагать все погрешности ξ_{ki} некоррелированными вследствие того, что соответствующие датчики имеют различную физическую природу. Тогда можно выписать выражения для систем нормальных уравнений у каждого отдельного измерительного канала стенда.

Оценка максимального правдоподобия угловой скорости по показаниям ДУС. На основании (3), а также учитывая, что $x = \omega$, запишем выражение для совместной плотности вероятностей выборки из N значений угловой скорости, измеренных с помощью ДУС:

$$W_N = \prod_{i=1}^N \frac{1}{4d} \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right) =$$

$$\left(\frac{1}{4d} \right)^N \prod_{i=1}^N \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right) \rightarrow \max$$

Прологарифмируем эту функцию правдоподобия [16]:

$$L(\omega) = \ln(W_N) = \ln \left\{ \left(\frac{1}{4d} \right)^N \prod_{i=1}^N \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right) \right\} =$$

$$= N \ln \left(\frac{1}{4d} \right) + \sum_{i=1}^N \ln \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right). \quad (29)$$

Выражение (29) есть функция двух переменных: ω и σ . Оценка ω даст нам угловую скорость, которая будет использована в итоговой оценке, а величина σ характеризует достоверность оценки угловой скорости каждым конкретным датчиком и определяет дисперсию погрешности оценивания. Значение дисперсии определяет вес каждой оценки ω в итоговом выражении оценки угловой скорости по результатам измерения совокупностью датчиков.

Определение максимума выражения (29) производится нахождением нулей её частных производных по ω и σ .

$$\frac{dL(\omega, \sigma)}{d\omega} = \sum_{i=1}^N \frac{M_\omega \left(\exp \left(-\frac{(y_i - M_\omega \omega - d)^2}{2\sigma_i^2} \right) - \exp \left(-\frac{(y_i - M_\omega \omega + d)^2}{2\sigma_i^2} \right) \right)}{\sqrt{\pi}\sigma \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right)} = 0; \quad (30)$$

$$\frac{dL(\omega, \sigma)}{d\sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{\exp \left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_\omega \omega - d)^2}{\sigma_i^2} \right) (y_i - M_\omega \omega - d) \sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma_i^2} -$$

$$- \frac{\exp \left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_\omega \omega + d)^2}{\sigma_i^2} \right) (y_i - M_\omega \omega + d) \sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma_i^2} = 0. \quad (31)$$

Выражения (30) и (31) нелинейные, и аналитическое решение полученной системы нормальных уравнений невозможно. Для решения системы нормальных уравнений авторами использовались численные методы [33]. В качестве начальных приближений были использованы следующие величины [33]:

$$\omega_{k0} = \sum_{i=1}^N y_i / N_k M_k, \sigma_{0k}^2 = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (y_i - \bar{y})^2, \bar{y} = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} y_{ki}, (i = \overline{1, N_k}), \quad (32)$$

Оценка максимального правдоподобия угловой скорости по показаниям датчиков тангенциальной и центростремительной составляющих линейного ускорения. Аналогично ДУС, для данных датчиков находятся ОМП соответствующих составляющих ускорения и их стандартные отклонения путём численного решения систем нормальных уравнений (33) и (34):

$$\frac{dL(\omega)}{d\omega} = \sum_{i=1}^N \frac{M_\omega \left(\exp\left(-\frac{(y_i - M_k g_k(\omega_k) - d)^2}{2\sigma_i^2}\right) - \exp\left(-\frac{(y_i - M_k g_k(\omega_k) + d)^2}{2\sigma_i^2}\right) \right)}{\sqrt{\pi}\sigma_i \left(\operatorname{erf}\left[\frac{y_i - M_k g_k(\omega_k) + d}{\sqrt{2}\sigma_i}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y_i - M_k g_k(\omega_k) - d}{\sqrt{2}\sigma_i}\right] \right)} \cdot \frac{dg_k(\omega_k)}{d\omega} = 0; \quad (33)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL(\omega, \sigma)}{d\sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_\omega \omega - d)^2}{\sigma_i^2}\right) (y_i - M_\omega \omega - d) \sqrt{2}}{\sqrt{\pi} \sigma_i^2} - \\ - \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_\omega \omega + d)^2}{\sigma_i^2}\right) (y_i - M_\omega \omega + d) \sqrt{2}}{\sqrt{\pi} \sigma_i^2} = 0, \end{aligned} \quad (34)$$

где k – номер канала измерения; N_k – объём выборки.

Как и ранее, в качестве начальных приближений используются величины:

$$\omega_{k0} = g^{-1} \left(\sum_{i=1}^N y_{ki} / N_k M_k \right), \sigma_{0k}^2 = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} (y_{ki} - \bar{y}_k)^2, \bar{y}_k = \frac{1}{N_k} \sum_{i=1}^{N_k} y_{ki}, (k = \overline{1, 4}), (i = \overline{1, N_k}), \quad (35)$$

а соответствующие оценки угловой скорости определяются подстановкой найденных ОМП составляющих ускорения в выражения (16) и (4).

Оценка максимального правдоподобия угловой скорости по информации с датчика угла. Для получения оптимальной ОМП по информации с датчика угла авторами на основании выражения (25) была получена следующая система нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} W_N = \prod_{i=1}^N \sum_{j=1}^R \rho_j \cdot N_x \{ \mu_j, \sigma_j \} \\ L(\alpha) = \ln(W_N) = \ln \left(\prod_{i=1}^N \sum_{j=1}^R \rho_j \cdot N_x \{ \mu_j, \sigma_j \} \right) = \sum_{i=1}^N \ln \left(\sum_{j=1}^R \rho_j \cdot N_x \{ \mu_j, \sigma_j \} \right) \\ \frac{dL}{d\alpha} = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j=1}^R \frac{\rho_j (y_i - \alpha) \exp\left\{ -\frac{(y_i - \alpha)^2}{2\sigma_{ij}^2} \right\}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ij}^3}}{\sum_{j=1}^R \rho_j \frac{\exp\left\{ -\frac{(y_i - \alpha)^2}{2\sigma_{ij}^2} \right\}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ij}}} = 0. \quad (36) \\ \frac{dL(\alpha, \sigma)}{d\sigma} = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\frac{1}{2} \frac{\rho_i \exp\left\{ \frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}} \right\} (2\pi)^N \left(\frac{\partial}{\partial \sigma_{ij}} \det(\sigma_{ij}) \right)}{\left(\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})} \right)^3} + \frac{\rho_i (y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha) \exp\left\{ \frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}} \right\}}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})} \sigma_{ij}^2} \right) \\ \frac{\sum_{j=1}^R \frac{\rho_j \exp\left\{ \frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}} \right\}}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})}}}{\sum_{j=1}^R \frac{\rho_j \exp\left\{ \frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}} \right\}}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})}}} \end{aligned} \quad (37)$$

Как и ранее, оценки $\hat{\alpha}$ и σ из (36), (37) находятся с использованием численных методов. Далее, подставив оценку $\hat{\alpha}$ в выражение (25), найдём оценку угловой скорости поворотной платформы стенда.

Методика оценки масштабных коэффициентов датчиков. Истинные значения масштабных коэффициентов M_k , как правило, точно не известны и изменяются во время измерений. Для их уточнения авторами предлагается следующая методика.

Пусть «идеальное» значение масштабного коэффициента любого из рассматриваемых датчиков равно $M_\omega^* = M_\omega + \Delta M_\omega$. Тогда для датчика угловой скорости выражение (26) можно переписать так:

$$y_j = M_\omega \omega + \Delta M_\omega \omega + M_\omega \xi_{\omega j} + \Delta M_\omega \xi_{\omega j}, \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (38)$$

Величина M_ω известна, а малая поправка ΔM_ω – неизвестна. Последним членом в (38) можно пренебречь, ввиду малости ΔM_ω и $\xi_{\omega j}$. Полученное уравнение является нелинейным, так как в нем присутствует произведение неизвестных параметров ω и ΔM_ω . Для вычисления их оценок авторами предлагается следующий подход.

Сначала будем полагать, что величина масштабного коэффициента известна точно и равна M_ω . Тогда (38) можно представить в виде:

$$y_j = M_\omega \omega + \xi_j, \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (39)$$

Из системы уравнений (39) определяется оценка угловой скорости по описанной выше методике. Далее вычисляется результирующая оценка угловой скорости ω (по методике, которая будет приведена далее). Обозначим найденную оценку ω_0 . Далее считаем истинную угловую скорость равной $\omega = \omega_0 + \Delta\omega$, а истинное значение масштабного коэффициента равно $M_\omega^* = M_\omega + \Delta M_\omega$. С учётом этого перепишем (39) в виде:

$$y_j = M_\omega \omega_0 + M_\omega \Delta\omega + \Delta M_\omega \omega_0 + \Delta M_\omega \Delta\omega + \xi_j, \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (40)$$

Пренебрегая членом $\Delta M_\omega \Delta\omega$ ввиду его малости, получим систему линейных относительно неизвестных $\Delta\omega$ и ΔM_ω уравнений:

$$y_j = M_\omega \omega_0 + M_\omega \Delta\omega + \Delta M_\omega \omega_0 + \xi_j, \quad (j = 1, 2, \dots, N). \quad (41)$$

Система (41) решается повторно по ММП относительно величин $\Delta\omega$ и ΔM_ω . Данная процедура выполняется для всех измерительных каналов, после чего вновь находится результирующая оценка угловой скорости. Процедура выполняется итерационно вплоть до достижения необходимой точности.

Методика определения угловой скорости платформы поворотного стенда. Упрощённая информационно-логическая схема определения угловой скорости платформы поворотного стенда по информации от входящих в его состав датчиков приведена на рисунке 5.

Предлагаемая авторами методика состоит из двух этапов, на первом из которых выполняется калибровка стенда, после выполнения которой стенд может воспроизводить и измерять угловую скорость (второй этап). Предполагается, что систематическая составляющая погрешности датчика угла $\Delta\alpha_0(\alpha)$, а также погрешность задающего генератора $M_{3Г}$ известны до начала калибровки поворотного стенда.

1. Платформа стенда фиксируется, измеряются средние значения величин $\zeta_{\omega Г}$, a_u^0 , a_r^0 . Полученные значения позже будут использованы как начальные приближения.

2. Производится разворот платформы с наперёд заданными угловыми скоростями ω_i , $i = 1, \dots, M$ на фиксированные углы α_i . Угловое положение платформы во время движения выбирается таким образом, чтобы случайная составляющая погрешности $\Delta\alpha_\zeta$ была пренебрежимо малой (желательно производить движение платформы в диапазонах угловых положений, в которых СКО погрешности мало – области, не заштрихованные на рисунке 6, где в качестве примера представлены экспериментальные данные погрешности датчика угла). Длительности разворотов T_i фиксируется.

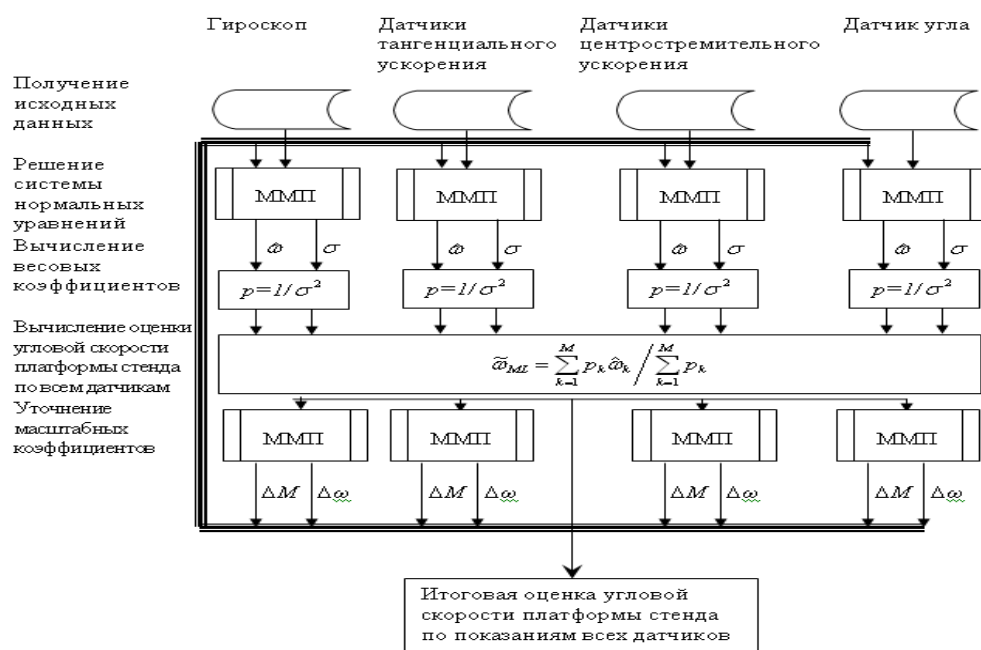


Рисунок 5 – Упрощенная информационно-логическая схема определения угловой скорости платформы поворотного стенда по показаниям совокупности датчиков различной физической природы (второй этап)

3. Для каждого датчика с помощью взвешенного МНК [33] находится масштабный коэффициент M_k :

$$M_k = \sum_{i=1}^M \omega_i (\tilde{\omega}_{ki} - \xi_k^0) / \sum_{i=1}^M \omega_i^2, \quad \omega_i = \frac{\alpha_i}{T_i},$$

где в качестве ξ_k^0 используются значения, определенные на первом этапе.

На этом калибровка заканчивается. Во время эксплуатации стенда:

4. По ММП для каждого датчика определяется оценка угловой скорости $\hat{\omega}_k$ и дисперсия σ_k^2 .

5. Вычисляются весовые коэффициенты p_k как величины, обратные дисперсиям: $p_k = 1 / \sigma_k^2$.

6. Окончательная оценка угловой скорости определяется как средневзвешенная [17, 21]:

$$\tilde{\omega}_{ML} = \sum_{k=1}^M p_k \hat{\omega}_k / \sum_{k=1}^M p_k, \quad (42)$$

где $\hat{\omega}_k$ – ОМП, полученная по данным с k -го измерительного канала.

На рисунках 7, 8 и 9 приведены результаты численного моделирования динамики поворотно-го стенда. При этом на рисунке 7 оценка угловой скорости платформы вычисляется как среднее арифметическое оценок отдельных датчиков, на рисунке 8 – по методу переключения, предложенному в [15], на рисунке 9 – в соответствии с предложенной авторами методикой.

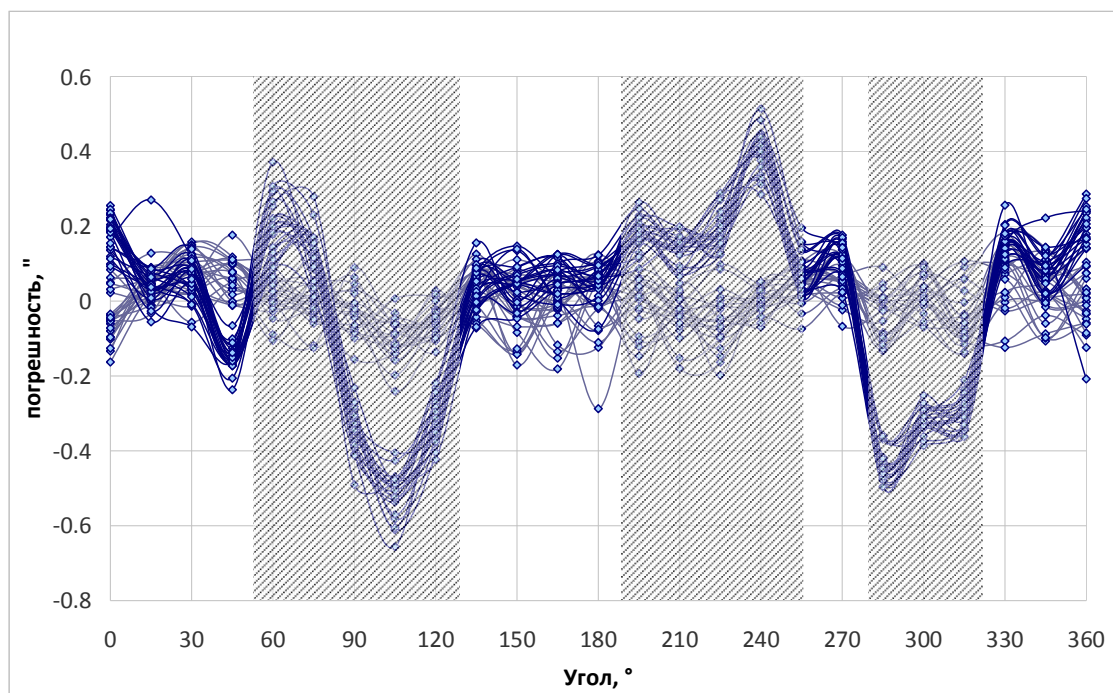


Рисунок 6 – Выбор областей для калибровки датчиков

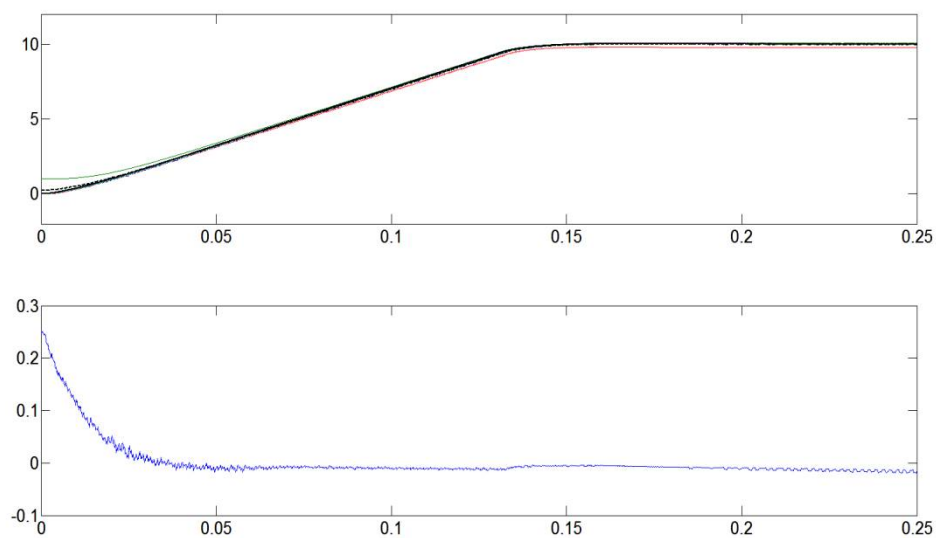


Рисунок 7 – Оценки угловой скорости (вверху) и погрешность результирующей оценки (внизу). Результирующая оценка ищется как среднее арифметическое отдельных оценок

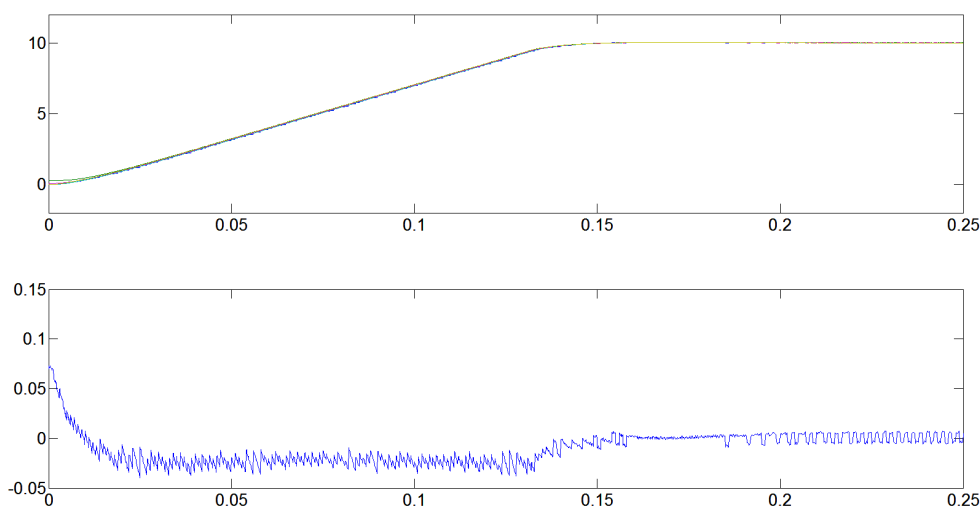


Рисунок 8 – Оценки угловой скорости (вверху) и погрешность результирующей оценки (внизу). Результирующая оценка ищется по МНК

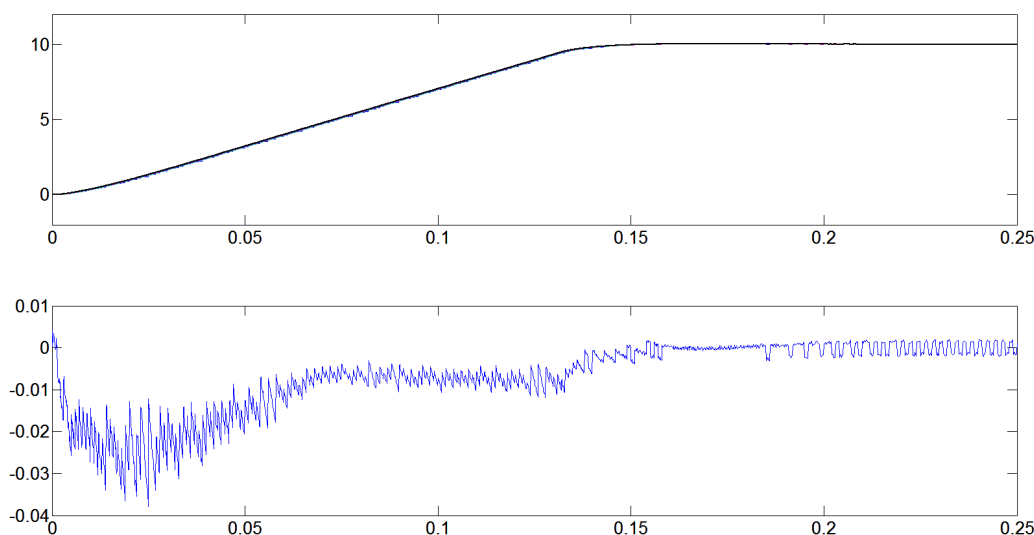


Рисунок 9 – Оценки угловой скорости (вверху) и погрешность результирующей оценки (внизу). Результирующая оценка ищется по предлагаемой авторами методике

Из вышеприведенных рисунков видно существенное повышение точности оценивания угловой скорости платформы поворотного стенда с помощью предлагаемых авторами методов.

Заключение. В работе приведено описание метода оценки угловой скорости платформы поворотного стенда по информации от совокупности датчиков, основанное на методе максимального правдоподобия, использующем полученные авторами распределения плотностей вероятностей погрешностей датчиков угловой скорости, угла, тангенциальной и центростремительной составляющих линейного ускорения.

Показано, что законы распределения плотностей вероятности погрешностей различных датчиков из состава поворотного стенда не соответствуют нормальному закону распределения. Авторы делают вывод о некорректности использования для определения оптимальной оценки угловой скорости по информации с совокупности всех датчиков стенда, метода наименьших квадратов, так как найденная оценка не будет асимптотически эффективной. Поэтому предлагается использовать метод максимального правдоподобия для определения оптимальной с точки зрения минимума квадрата погрешности оценки угловой скорости поворотной платформы стенда.

Использование совокупной информации с датчиков параметров движения, основанных на различных физических принципах измерения, в сочетании с оптимальными методами обработки полученных экспериментальных данных, позволяет точнее оценивать и задавать параметры движения прецизионных поворотных платформ.

Библиографический список

1. Аникст Д. А. Высокоточные угловые измерения / Д. А. Аникст, К. М. Константинович, И. В. Меськин. – Москва : Машиностроение, 1987. – 480 с.
2. Блантер Б. Э. Государственный специальный эталон единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот 0,5–104 Гц / Б. Э. Блантер, А. Ф. Бордиловский, А. Е. Синельников, В. С. Шкалик // Измерительная техника. – 1975. – № 10. – С. 10–12.
3. Блантер Б. Э. Состояние и перспективы создания средств передачи размера единицы плоского угла, угловой скорости и ускорения на основе кольцевых лазеров / Б. Э. Блантер, Е. П. Кривцов, Д. П. Лукьянов, А. Е. Синельников, Ю. В. Филатов, Ю. Н. Шестопалов // Измерительная техника. – 1984. – № 7. – С. 27–29.
4. Бурнашев М. Н. Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии / М. Н. Бурнашев, Д. П. Лукьянов, П. А. Павлов, Ю. В. Филатов // Квантовая электроника. – 2000. – Т. 30, № 2. – С. 141–146.
5. Васильев В. И. Физическая модель систематического изменения частоты выходного сигнала водородных стандартов частоты и времени / В. И. Васильев // Измерительная техника. – 2014. – № 2. – С. 31–34.
6. Васильев В. И. Водородные стандарты частоты и времени / В. И. Васильев, В. В. Гаврилов, С. А. Козлов // Радиоэлектронные технологии России. – 2012. – С. 97–109.
7. Вучков И. Н. Прикладной линейный регрессионный анализ / И. Н. Вучков, Л. Н. Бояджиева, Е. Б. Солаков. – Москва : Финансы и статистика, 1987. – 239 с.
8. Гончаров А. С. Эталонный комплекс времени и частоты для хранения национальной шкалы времени РФ / А. С. Гончаров, Ю. Ф. Смирнов, И. Б. Норец // Альманах современной метрологии. – 2017. – № 11. – С. 221–229.
9. Калихман Д. М. Прецизионный стенд с датчиком угловой скорости в качестве инерциального чувствительного элемента и двухконтурной цифровой системой управления / Д. М. Калихман, Л. Я. Калихман, Ю. В. Садомцев, Е. А. Депутатова, С. Ф. Нахов, А. И. Сапожников, Е. Л. Межирицкий, В. М. Никифоров // Авиационная промышленность. – 2010. – № 1. – С. 43–49.
10. Домнин Ю. С. Цезиевый репер частоты фонтанного типа МЦР-Ф2 / Ю. С. Домнин, В. Н. Барышев, А. И. Бойко, Г. А. Елкин, А. В. Новоселов // Измерительная техника. – 2012. – № 10. – С. 26–30.
11. Ермаков Р. В. Исследование законов распределения погрешностей датчиков, входящих в состав стендов для задания угловых скоростей / Р. В. Ермаков, Д. М. Калихман, Д. В. Кондратов, А. А. Львов // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2016. – № 3. – С. 9–16.
12. Ермаков Р. В. Использование полигауссовской аппроксимации для описания свойств погрешностей оптического датчика угла / Р. В. Ермаков, Д. М. Калихман, А. А. Львов // Надежность и качество : сб. тр. Междунар. симп. – Пенза : ПГУ, 2016. – Т. 2. – С. 23–25.
13. Ермаков Р. В. Анализ погрешностей углоизмерительного стенда на основе оптического бесконтактного датчика угла / Р. В. Ермаков, А. А. Львов // Проблемы управления, обработки и передачи информации : сб. тр. IV Междунар. науч. конф. : в 2 т. – Саратов : Издательский дом «Райт-Экспо», 2015. – Т. 2. – С. 114–121.
14. Исаев Л. К. Метрологические задачи в области малых и сверхмалых величин параметров движения / Л. К. Исаев, А. Е. Синельников // Измерительная техника. – 1998. – № 4. – С. 3.
15. Калихман Д. М. Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов / Д. М. Калихман ; под общ. ред. акад. В. Г. Пешехонова. – СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. – 296 с.
16. Кирьянов В. П. Анализ современных технологий синтеза углоизмерительных структур для высокоточных угловых измерений (Аналитический обзор) / В. П. Кирьянов, А. В. Кирьянов, Д. Ю. Кручинин, О. Б. Яковлев // Оптический журнал. – 2007. – Т. 74, № 12. – С. 40–49.
17. Кривцов Е. П. Современное состояние первичных эталонов в областях измерений геометрических, механических и связанных с ними величин / Е. П. Кривцов, К. В. Чекирда, А. А. Янковский // Измерительная техника. 2017. – № 12. – С. 23–27.
18. Кудрявцев М. Д. Методы планирования и обработки результатов измерений плоского угла для градуировки прецизионных навигационных датчиков : дис. ... канд. техн. наук / М. Д. Кудрявцев. – СПб., 2009. – 172 с.
19. Линник Ю. В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю. В. Линник. – Москва : ГИФМЛ, 1958. – 334 с.
20. Львов П. А. Разработка методов, алгоритмов и программ для СВЧ-преобразователей информации в системах управления техническими объектами : дис. ... канд. техн. наук / П. А. Львов. – Саратов, 2011. – 132 с.
21. Мироновский Л. А. Алгоритмы оценивания результата трех измерений / Л. А. Мироновский, В. А. Слаев. – Санкт-Петербург : Професионал, 2010. – 192 с.
22. Синельников А. Е. Новый эталон России в области измерения низкочастотных параметров движения / А. Е. Синельников, В. Н. Кудрявцев, П. А. Павлов // Сб. материалов IX Ст.-Петербургской междунар. конф. по инерциальным навигационным системам. – Санкт-Петербург : Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2002. – С. 221–229.

23. Синельников А. Е. Принципы построения нового комплексного эталона в области измерений низкочастотных параметров движения / А. Е. Синельников // Механика и навигация. – 1999. – С. 59–61.
24. Тихонов В. И. Нелинейная фильтрация и квазикогерентный прием сигналов / В. И. Тихонов, Н. К. Кульман. – Москва : Советское Радио, 1975. – 704 с.
25. Шестопапов Ю. Н. Метрологическое обеспечение углометрии в машиностроении / Ю. Н. Шестопапов // Измерения, контроль, автоматизация. – 1991. – № 2 (78). – С. 20–26.
26. Ямпурин Н. П. Формирование прецизионных частот и сигналов : учеб. пос. / Н. П. Ямпурин, В. В. Болонзев, Е. В. Сафронов, Е. Б. Жалнин. – Нижний Новгород : НГТУ, 2003. – 187 с.
27. Янковский А. А. Вторичный эталон плоского угла: состояние и направления развития / А. А. Янковский, А. В. Плотников, К. Б. Савкин, И. В. Козак // Измерительная техника. – 2012. – № 7. – С. 30–31.
28. Янковский А. А. Новый эталон единицы плоского угла для области обороны и безопасности государства / А. А. Янковский, Плотников А. В., Савкин К. Б., Козак И. В. // Вестник метролога. – 2012. – № 3. – С. 33–35.
29. Bournashev M. N. Reproduction of plane angle unit in dynamic mode by means of ring laser and holographic optical encoder / M. N. Bournashev, Yu. V. Filatov, D. P. Loukianov, P. A. Pavlov, A. E. Sinelnikov // Proc. of 2-nd EUSPEN Int. Conf. – Turin, Italy, 2001. – P. 322–325.
30. Chenakin A. Frequency Synthesizers: From Concept to Product / A. Chenakin. – N.Y. : Artech House, 2010. – 305 p.
31. Ermakov R. V. Fundamentals of developing integrated digital control of precision stands with inertial sensors using signals from an angular rate sensor, accelerometer, and an optical angle sensor / R. V. Ermakov, D. M. Kalikhman, L. Ya. Kalikhman, S. F. Nahov, V. A. Turkin, A. A. Lvov, Iu. V. Sadomtsev, E. P. Krivtsov, A. A. Iankovskiy // Proc. of 23 St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg, Russia : IEEE, 2016. – P. 361–365.
32. Ermakov R. V. Angular Velocity Estimation of Rotary Table Bench Using Aggregate Information From the Sensors of Different Physical Nature / R. V. Ermakov, A. A. Lvov, D. N. Sokolov, D. M. Kalihman // Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf. – St. Petersburg, Russia : IEEE, 2017. – P. 585–589.
33. Gill P. E. Practical optimization / P. E. Gill, W. Murrey, M. H. Wright. – Elsevier Academic Press, 1981. – 395 p.
34. Havlicek H. S. Improving real-time communication between host and motion system in a HWIL simulation / H. S. Havlicek, Zana L. // SPIE Defense and Security Symposium. – Acutronic, USA, Pittsburgh, 2004. – DOI: 10.1117/12.542637
35. Just A. Comparison of angle standards with the aid of a high-resolution angle encoder / A. Just, M. Krause, R. Probst, H. Bosse, H. Haunerding, Ch. Spaeth, G. Metz, W. Israel // Precision Engineering, 2009. – Vol. 3 (10). – P. 530–533.
36. Kalikhman D. M. Ways of extending the measurement range and increasing the accuracy of rotary test benches with inertial sensory elements for gyroscopic devices / D. M. Kalikhman, L. Ya. Kalikhman, E. A. Deputatova, A. K. Krainov, E. P. Krivtsov, A. A. Yankovskiy, R. V. Ermakov, A. A. Lvov // Proc. of the 25-th Anniversary St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg : IEEE, 2018. – P. 460–465. – DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405929.
37. Kalihman D. M. Multi-Purpose Precision Test Simulator With a Digital Control System For Testing Rate Gyroscopes of Different Types / D. M. Kalihman, L. Ya. Kalihman, Yu. V. Sadomtsev, A. V. Polushkin, E. A. Deputatova, R. V. Ermakov, S. F. Nahov, L. A. Izmailov, A. V. Molchanov, M. V. Chirkin // Proc. of the 17th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems. – St. Petersburg : IEEE, 2010. – P. 151–156.
38. Krause M. Angle metrology at the PTB: current status and developments / M. Krause, A. Just, R. D. Geckeler, H. Bosse // Proc. of the 9-th Int. Symp. on Measurement Technology and Intelligent Instruments. – St. Petersburg, Russia, 2009. – P. 2/092–6/092/.
39. Šiaudinytė L. Research and development of methods and instrumentation for the calibration of vertical angle measuring systems of geodetic instruments: doctoral dissertation, technological sciences, measurement engineering / L. Šiaudinytė. – Vilnius Gediminas Technical University, 2014. – 134 p.
40. Marrison W. The Evolution of the Quartz Crystal Clock // Bell System Technical Journal. – 1948. – Iss. 27 (3). – P. 510–588. – DOI:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01343.x.
41. Masuda T. High accuracy calibration system for angular encoders / T. Masuda, M. Kajitani // Journal of robotics and mechatronics. – 1993. – Vol. 5 (5). – P. 448–452.
42. Mokros J. Kruhovy laser a mereni uhlu / J. Mokros, K. X. Vu // Jemna Mechanika a Optika. – 1993. – № 9 (203). – P. 203–205 (на чешском).
43. Probst R. A Primary Standard for Angle Measurement / R. Probst, M. Krause // Proc. of the 2-nd Int. EUSPEN Conf. – Turin, Italy, 2001. – P. 327–329.
44. Probst R. The new PTB angle comparator / R. Probst, R. Wittekopf, M. Krause, H. Dangschat, A. Ernst // Measurement Science and Technology. – 1998. – № 9. – P. 1059–1066.
45. Sim P. J. Angle standards and their calibration / P. J. Sim // Modern Techniques in Metrology. – Singapore : World Scientific, 1984. – P. 102–121.
46. Velikoseltsev A. On the Application of Fiber Optic Gyroscopes for Detection of Seismic Rotations / A. Velikoseltsev, A. Boronachin, A. Tkachenko, K. U. Schreiber, A. Yankovsky, J.-P. R. Wells // Journal of Seismology, 2012. – Vol. 16, № 4. – P. 623–637.

47. Watanabe T., Fujimoto H., Nakayama K., Masuda T., Kajitani M. Automatic high precision calibration system for angle encoder / T. Watanabe, H. Fujimoto, K. Nakayama, T. Masuda, M. Kajitani // Proc. of SPIE. – 2001. – Vol. 4401. – Pt. 1. – P. 267–274; 2003. – Vol. 5190. – Pt. 2. – P. 400–409.

References

1. Anikst D. A., Konstantinovich K. M., Meskin I. V. *Vysokotochnye uglovyie izmereniya* [High precision angular measurements]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1987. 480 p.
2. Blanter B. E., Bordilovskiy A. F., Sinelnikov A. E., Shkalikov V. S. Gosudarstvennyy spetsialnyy etalon edinit dliny, skorosti i uskoreniya pri kolebatelnom dvizhenii tverdogo tela v diapazone chastot 0,5–104 Gts [State special standard of units of length, speed and acceleration during vibrational motion of a solid in the frequency range 0.5–104 Hz]. *Izmeritel'naya tekhnika*, [Measurement Techniques], 1975, no. 10, pp. 10–12.
3. Blanter B. E., Krivtsov E. P., Lukyanov D. P., Sinelnikov A. E., Filatov Yu. V., Shestopalov Yu. N. Sostoyaniye i perspektivy sozdaniya sredstv peredachi razmera edinitcy ploskogo ugla, uglovoy skorosti i uskoreniya na osnove koltsevykh lazerov [Status and prospects of creating means for transmitting the unit size of a plane angle, angular velocity and acceleration based on ring lasers]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 1984, no. 7, pp. 27–29.
4. Burnashev M. N., Lukyanov D. P., Pavlov P. A., Filatov Yu. V. Razvitiye metodov i sredstv lazernoy dinamicheskoy goniometrii [Development of methods and equipment of laser dynamic goniometry]. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2000, vol. 30, no. 2, P. 141–146.
5. Vasilev V. I. Fizicheskaya model sistemacheskogo izmeneniya chastoty vykhodnogo signala vodorodnykh standartov chastoty i vremeni [Physical model of the systematic change in the output signal frequency of the hydrogen standards of frequency and time]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2014, no. 2, pp. 160–165.
6. Vasilev V. I., Gavrilov V. V., Kozlov S. A. Vodorodnye standarty chastoty i vremeni [Hydrogen frequency and time standards]. *Radioelektronnyye tekhnologii Rossii* [Radio-electronic technologies of Russia], 2012, pp. 97–109.
7. Vuchkov I. N., Boiadzhieva L. N., Solakov E. B. *Prikladnoy lineinyy regressionnyy analiz* [Applied Linear Regression Analysis]. Moscow, Finansy i statistika Publ., 1987. 239 p.
8. Goncharov A. S., Smirnov Yu. F., Norets I. B. Etalonnyy kompleks vremeni i chastoty dlya khraneniya natsionalnoy shkaly vremeni RF [Reference time and frequency complex for storing the national time scale of the Russian Federation]. *Almanakh Sovremennoy Metrologii* [Almanac of modern metrology], 2017, no. 11, pp. 221–229.
9. Kalikhman D. M., Kalikhman L. Ya., Sadomtsev Yu. V., Deputatova, E. A., Nahov S. F., Sapozhnikov A. I., Mezheritskiy E. L., Nikiforov V. M. Pretsizionnyy stend s datchikom uglovy skorosti v kachestve inertsiynogo chuvstvitel'nogo elementa i dvukhkonturnoy tsifrovoy sistemy upravleniya [Precision bench with an angular velocity sensor as an inertial sensing element and a dual-circuit digital control system]. *Aviatsionnaya promyshlennost* [Aviation Industry], 2010, no. 1, pp. 43–49.
10. Domnin Yu. S., Kopylov L. N., Coopalov D. S., Elkin G. A., Novoselov A. V. Tsezievyy reper chastoty fontannogo tipa MTCR-F2 [The cesium benchmark of frequency of the fountain type MTsR-F2]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 2012, no. 10, pp. 26–30.
11. Ermakov R. V., Kalikhman D. M., Kondratov D. V., Lvov A. A. Issledovanie zakonov raspredeleniya pogreshnostey datchikov, vkhodyashchikh v sostav stendov dlya zadaniya uglovykh skorostey [The study of the laws of the distribution of errors of the sensors included in the composition of the stands for setting angular velocities]. *Matematicheskoe modelirovaniye, kompyuternyy i naturnyy eksperiment v estestvennykh naukakh* [Mathematical Modeling, Computer and Natural Experiment in the Natural Sciences], 2016, no. 3, pp. 9–16.
12. Ermakov R. V., Kalikhman D. M., Lvov A. A. Ispolzovaniye poligaussovskoy approksimatsii dlya opisaniya svoystv pogreshnostey opticheskogo datchika ugla [Using the polyGaussian approximation to characterize the properties of the optical angle sensor errors]. *Nadezhnost i kachestvo : sbornik trudov Mezhdunarodnogo simpoziuma* [Reliability and Quality: Proceedings of the International Symposium]. Penza, 2016, vol. 2, pp. 23–25.
13. Ermakov R. V., Lvov A. A. Analiz pogreshnostey ugloizmeritel'nogo stenda na osnove opticheskogo beskontaktnogo datchika ugla [Error analysis of the angle measuring bench based on the optical non-contact angle sensor]. *Problemy upravleniya, obrabotki i peredachi informatsii : sbornik trudov IV Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii* [Problems of Control, Information Processing and Transmission : Proceedings of the IV International Scientific Conference]. Saratov, Russia, 2015, vol. 2, pp. 114–121.
14. Isaev L. K., Sinelnikov A. E. Metrologicheskie zadachi v oblasti mal'kh i sverkhmal'kh velichin parametrov dvizheniya [Metrological tasks in the field of small and very small values of motion parameters]. *Izmeritel'naya tekhnika* [Measurement Techniques], 1998, no. 4, pp. 3–6.
15. Kalikhman D. M. *Pretsizionnye upravlyayemye stendy dlya dinamicheskikh ispytaniy giroskopicheskikh priborov* [Precision guided stands for dynamic testing of gyroscopic instruments]. St. Petersburg, GNTC RF TCNII «Elektroprigor», 2008. 296 p.
16. Kiryanov V. P., Kiryanov A. V., Kruchinin D. Yu., Yakovlev O. B. Analiz sovremennykh tekhnologiy sinteza ugloizmeritel'nykh struktur dlya vysokotochnykh uglovykh izmereniy (Analiticheskiy obzor) [Analysis of modern technologies for the synthesis of angle measuring structures for high-precision angular measurements (Analytical review)]. *Opticheskiy zhurnal* [Optical Journal], 2007, vol. 74, no. 12, P. 40–49.
17. Krivtsov E. P., Chekirda K. V., Iankovskiy A. A. Sovremennoe sostoyaniye pervichnykh etalonov v oblasti izmereniy geometricheskikh, mekhanicheskikh i svyazannykh s nimi velichin [The current state of primary

standards in the fields of measurements of geometric, mechanical and related quantities]. *Izmeritelnaya tekhnika* [Measurement Techniques], 2017, no. 12, pp. 23–27.

18. Kudryavtsev M. D. *Metody planirovaniya i obrabotki rezultatov izmereniy ploskogo ugla dlya graduировки pretzionnykh navigatsionnykh datchikov* [Methods of planning and processing the results of measurements of a flat angle for graduation of precision navigation sensors]. St. Petersburg, 2009. 172 p.

19. Linnik Yu. V. *Metod naimenshikh kvadratov i osnovy teorii obrabotki nablyudeniy* [Least Squares Method and the Basics of Observed Data Processing Theory]. Moscow, GIFML Publ., 1958. 334 p.

20. Lvov P. A. *Razrabotka metodov, algoritmov i programm dlya SVCh-preobrazovateley informatsii v sistemakh upravleniya tekhnicheskimi obektami* [Development of methods, algorithms, and programs for microwave information converters in control systems for technical objects]. Saratov, 2011. 132 p.

21. Mironovskiy L. A., Slaev V. A. *Algoritmy otsenivaniya rezultata trekh izmereniy* [Algorithms for evaluating the result of three measurements]. St. Petersburg, Professional Publ., 2010. 192 p.

22. Sinelnikov A. E., Kudryavtsev V. N., Pavlov P. A. *Novyy etalon Rossii v oblasti izmereniya nizkочастотных параметров движения* [The new standard of Russia in the field of measuring low-frequency motion parameters]. *Sbornik materialov IX St.-Peterburgskoy mezhdunarodnoy konferentsii po inertialnym navigatsionnym sistemam* [Proceedings of the IX St. Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems]. St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2002, P. 221–229.

23. Sinelnikov A. E. *Printsipy postroeniya novogo kompleksnogo etalona v oblasti izmereniy nizkочастотных параметров движения* [The principles of constructing a new integrated standard in the field of low-frequency motion parameter measurements]. *Mekhanika i navigatsiya* [Mechanics and Navigation]. St. Petersburg, 1999, pp. 59–61.

24. Tikhonov V. I., Kuhlman N. K. *Nelineynaya filtratsiya i kvazikogerentnyy priyem signalov* [Nonlinear filtering and quasicohherent signal reception]. Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1975. 704 p.

25. Shestopalov Yu. N. *Metrologicheskoe obespechenie uglometrii v mashinostroenii* [Metrological support of angularity in mechanical engineering]. *Izmereniya, kontrol, avtomatizatsiya* [Measurement, Test, Automation], 1991, no. 2, vol. 78, pp. 20–26.

26. Yampurin N. P., Boloznev V. V., Safronov E. V., Zhalnin E. B. *Formirovanie pretzionnykh chastot i signalov* [Precision frequencies and signals generation] Tutorial. Nizhnii Novgorod: NGTU, 2003, 187 p.

27. Yankovskiy A. A., Plotnikov A. V., Savkin K. B., Kozak I. V. *Vtorichnyy etalon ploskogo ugla: sostoianie i napravleniya razvitiya* [Secondary standard of a flat angle: state and directions of development]. *Izmeritelnaya tekhnika* [Measurement Techniques], 2012, no. 7, pp. 30–31.

28. Yankovskiy A. A., Plotnikov A. V., Savkin K. B., Kozak I. V. *Novyy etalon edintsy ploskogo ugla dlya oblasti oborony i bezopasnosti gosudarstva* [The new standard of the unit of a flat angle for the field of defense and security of the state]. *Vestnik metrologa* [Metrologist Bulletin], 2012, no. 3, pp. 33–35.

29. Bournashev M. N., Filatov Yu. V., Loukyanov D. P., Pavlov P. A., Sinelnikov A. E. *Reproduction of plane angle unit in dynamic mode by means of ring laser and holographic optical encoder*. *Proc. of 2-nd EUSPEN Int. Conf.* Turin, Italy, 2001, pp. 322–325.

30. Chenakin A. *Frequency Synthesizers: From Concept to Product*. N.Y., Artech House, 2010. 305 p.

31. Ermakov R. V., Kalikhman D. M., Kalikhman L. Ya., Nahov S. F., Turkin V. A., Lvov A. A., Sadomtsev Iu. V., Krivtsov E. P., Yankovskiy A. A. *Fundamentals of developing integrated digital control of precision stands with inertial sensors using signals from an angular rate sensor, accelerometer, and an optical angle sensor*. *Proc. of the 23 St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, Russia, IEEE, 2016, pp. 361–365.

32. Ermakov R. V., Lvov A. A., Sokolov D. N., Kalihman D. M. *Angular Velocity Estimation of Rotary Table Bench Using Aggregate Information From the Sensors of Different Physical Nature*. *Proc. of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conf.* St. Petersburg, Russia, IEEE, 2017, pp. 585–589.

33. Gill P. E., Murrey W., Wright M. H. *Practical optimization*. Elsevier Academic Press, 1981. 395 p.

34. Havlicek H. S., Zana L. *Improving real-time communication between host and motion system in a HWIL simulation*. *SPIE Defense and Security Symposium*, Acutronic, USA, Pittsburgh, 2004. DOI: 10.1117/12.542637.

35. Just A., Krause M., Probst R., Bosse H., Haunerding H., Spaeth Ch., Metz G., Israel W. *Comparison of angle standards with the aid of a high-resolution angle encoder*. *Precision Engineering*, 2009, vol. 3 (10), pp. 530–533.

36. Kalikhman D. M., Kalikhman L. Ya., Deputatova E. A., Krainov A. K., Krivtsov E. P., Yankovskiy A. A., Ermakov R. V., Lvov A. A. *Ways of extending the measurement range and increasing the accuracy of rotary test benches with inertial sensory elements for gyroscopic devices*. *Proc. of the 25-th Anniversary St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*. St. Petersburg, CSRI Elektropribor, 2018, pp. 460–465. DOI: 10.23919/ICINS.2018.8405929.

37. Kalihman D. M., Kalihman L. Ya., Sadomtsev Yu. V., Polushkin A. V., Deputatova E. A., Ermakov R. V., Nahov S. F., Izmailov L. A., Molchanov A. V., Chirkin M. V. *Multi-Purpose Precision Test Simulator With a Digital Control System For Testing Rate Gyroscopes of Different Types*. *Proc. of the 17th St. Petersburg Int. Conf. on Integrated Navigation Systems*, St. Petersburg, IEEE, 2010, pp. 151–156.

38. Krause M., Just A., Geckeler R. D., Bosse H. *Angle metrology at the PTB: current status and developments*. *Proc. of the 9-th Int. Symp. on Measurement Technology and Intelligent Instruments*. St. Petersburg, Russia, 2009, pp. 2/092–6/092/.

39. Šiaudinytė L. *Research and development of methods and instrumentation for the calibration of vertical angle measuring systems of geodetic instruments: doctoral dissertation, technological sciences, measurement engineering*. Vilnius Gediminas Technical University, 2014. 134 p.

40. Marrison W. The Evolution of the Quartz Crystal Clock. *Bell System Technical Journal*, 1948, iss. 27 (3), pp. 510–588. DOI:10.1002/j.1538-7305.1948.tb01343.x.
41. Masuda T., Kajitani M. High accuracy calibration system for angular encoders. *Journal of robotics and mechatronics*, 1993, vol. 5 (5), pp. 448–452.
42. Mokros J., Vu K. X. Kruhovy laser a mereni uhlu. *Jemna Mechanika a Optika*, 1993, no. 9 (203), pp. 203–205 (in Czech).
43. Probst R., Krause M. A Primary Standard for Angle Measurement. *Proc. of the 2-nd Int. EUSPEN Conf.* Turin, Italy, 2001, pp. 327–329.
44. Probst R., Wittekopf R., Krause M., Dangschat H., Ernst A. The new PTB angle comparator. *Measurement Science and Technology*, 1998, no. 9, pp. 1059–1066.
45. Sim P. J. Angle standards and their calibration. *Modern Techniques in Metrology*. Singapore, World Scientific, 1984, pp. 102–121.
46. Velikoseltsev A., Boronachin A., Tkachenko A., Schreiber K. U., Yankovsky A., Wells J.-P. R. On the Application of Fiber Optic Gyroscopes for Detection of Seismic Rotations. *Journal of Seismology*, 2012, vol. 16, no. 4, pp. 623–637.
47. Watanabe T., Fujimoto H., Nakayama K., Masuda T., Kajitani M. Automatic high precision calibration system for angle encoder. *Proc. of SPIE*, 2001, vol. 4401, pt. 1, pp. 267–274; 2003, vol. 5190, pt. 2, pp. 400–409.

DOI 10.21672/2074-1707.2019.48.4.164-175

УДК (621.396+004.2):621.317.75:621.372.8

СВЧ-ИЗМЕРИТЕЛЬ НА ОСНОВЕ МНОГОКАНАЛЬНОГО ВЕКТОРНОГО ВОЛЬТМЕТРА В СИСТЕМАХ РАДИОЧАСТОТНОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ

Статья поступила в редакцию 10.09.2019, в окончательном варианте – 26.11.2019.

Николаенко Артем Юрьевич, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, аспирант, e-mail: anikolaenosstu@gmail.com

Львов Алексей Арленович, Саратовский государственный технический университет имени Ю.А. Гагарина, 410054, Российская Федерация, г. Саратов, ул. Политехническая, 77, доктор технических наук, профессор, e-mail: alvova@mail.ru

Юрков Николай Кондратьевич, Пензенский государственный университет, 440026, Российская Федерация, г. Пенза, ул. Красная, 40, доктор технических наук, профессор, e-mail: yurkov_nk@mail.ru

Предложен новый подход к построению измерителя параметров приборов на СВЧ, основанный на применении многоканального векторного вольтметра. Предлагаемый измеритель можно с успехом использовать в качестве считывателя системы радиочастотной идентификации для повышения дальности действия считывателя. Обосновано использование выбранной структурной схемы измерителя-считывателя, когда в качестве измерительного блока используется комбинированный многополюсный рефлектометр, к измерительным выходам которого подсоединяются схемы понижения частоты измерения. В работе описаны разработанные алгоритмы проведения измерения и калибровки предлагаемого измерителя, оптимальные в смысле минимума среднего квадрата погрешностей измерения или калибровки соответственно. Важной особенностью предлагаемой процедуры калибровки является отсутствие прецизионных калибровочных эталонов отражения или передачи, что существенно упрощает и удешевляет измеритель. Приведены результаты имитационного моделирования процессов измерения и калибровки описанного измерителя, подтвердившие высокую эффективность его применения в качестве считывателя в системах радиочастотной идентификации.

Ключевые слова: радиочастотная идентификация, измеритель на СВЧ, считыватель, векторный вольтметр, многополюсный рефлектометр, многозондовая измерительная линия, блок понижения частоты, метод наименьших квадратов