

Электронный научный журнал "Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках" <http://mathmod.esrae.ru/>

URL статьи: mathmod.esrae.ru/26-99

Ссылка для цитирования этой статьи:

Ермаков Р.В., Львов А.А., Серанова А.А., Кондратов Д.В. Результаты численного моделирования алгоритма оптимального оценивания угловой скорости поворотного стенда по показаниям датчиков различной физической природы // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. 2019. №3 *Результаты, представленные в данной статье, получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проект 9.2108.2017/4.6.*

УДК 681.2.088

РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ АЛГОРИТМА ОПТИМАЛЬНОГО ОЦЕНИВАНИЯ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ ПОВОРОТНОГО СТЕНДА ПО ПОКАЗАНИЯМ ДАТЧИКОВ РАЗЛИЧНОЙ ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЫ

Ермаков Р.В.¹, Львов А.А.², Серанова А.А.³, Кондратов Д.В.⁴

¹Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, roma-ermakov@yandex.ru

²Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, alvova@mail.ru

³Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов, seranova.anna@gmail.com

⁴Поволжский институт управления имени П.А. Столыпина – филиал
Российской академии народного хозяйства и государственной службы при
Президенте Российской Федерации, Россия, Саратов,
Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.,
Россия, Саратов,

Саратовский национальный исследовательский государственный университет
им. Н.Г. Чернышевского, Россия, Саратов, kondratovdv@yandex.ru

RESULTS OF NUMERICAL SIMULATION OF THE ALGORITHM FOR THE OPTIMAL EVALUATION OF ANGLE ANGLE SPEED OF A TURNBOARD STAND BY THE SENSORS OF DIFFERENT PHYSICAL NATURE

Ermakov R.V.¹, L'vov A.A.², Seranova A.A.³, Kondratov D.V.⁴

¹Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,
Saratov, roma-ermakov@yandex.ru

²Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,
Saratov, alvova@mail.ru

³Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia,
Saratov, seranova.anna@gmail.com

⁴Volga Management Institute named after P.A. Stolypin - a branch of Federal State-Funded Educational Institution of Higher Education Russian Presidential Academy of National Economy and Public Administration, Russia, Saratov
Yuri Gagarin State Technical University of Saratov, Russia, Saratov,
Saratov State University, Russia, Saratov, kondratovdv@yandex.ru

Аннотация. В статье приведены результаты численного моделирования точности измерения и воспроизведения угловой скорости прецизионным поворотным стендом, по совокупности входящих в его состав датчиков. Проведено сравнение оценки угловой скорости поворотной платформы стенда тремя различными методами. Результаты моделирования динамики поворотного стенда демонстрируют значительное отличие погрешности определения угловой скорости платформы стенда по измерениям различных датчиков, входящих в его состав.

Ключевые слова: угловая скорость, прецизионный поворотный стенд, оценка, метод максимального правдоподобия.

Abstract. The article presents the results of numerical modeling of the accuracy of measuring and reproducing angular velocity with precision rotary stand, based on the totality of the sensors included in it. A comparison of the estimates of the angular velocity of the turntable of the stand with three different methods is performed. The results of modeling the dynamics of the rotary bench demonstrate a significant difference between the errors in determining the angular velocity of the platform of the stand by measuring various sensors included in its composition.

Keywords: angular velocity, precision rotary table, estimation, maximum-likelihood method.

Введение

Прецизионные поворотные стенды для воспроизведения угловых скоростей создаются, как правило, с использованием датчика плоского угла [1-9]. Главный недостаток подобных стендов состоит в невозможности точного воспроизведения низких угловых скоростей [1,2,10-25]. В качестве альтернативного варианта ряд авторов предлагает использовать в качестве датчика, осуществляющего контроль скорости поворота платформы стенда, инерциальных датчиков. Подобные стенды рассмотрены в работах [1,2,11-25]. В работах [1,2,10-29] рассматриваются некоторые вопросы построения погрешностей датчиков первичной информации. В перечисленных работах, однако, уделяется недостаточно внимания вопросам оценки погрешности определения угловой скорости поворотной платформы стенда.

В данной работе приводятся результаты численного моделирования алгоритма оптимального оценивания угловой скорости поворотного стенда по показаниям датчиков различной физической природы, приведённого в [30].

1. Конструкция измерительного стенда

Обобщённая схема стенда [30] представлена на рис. 1.

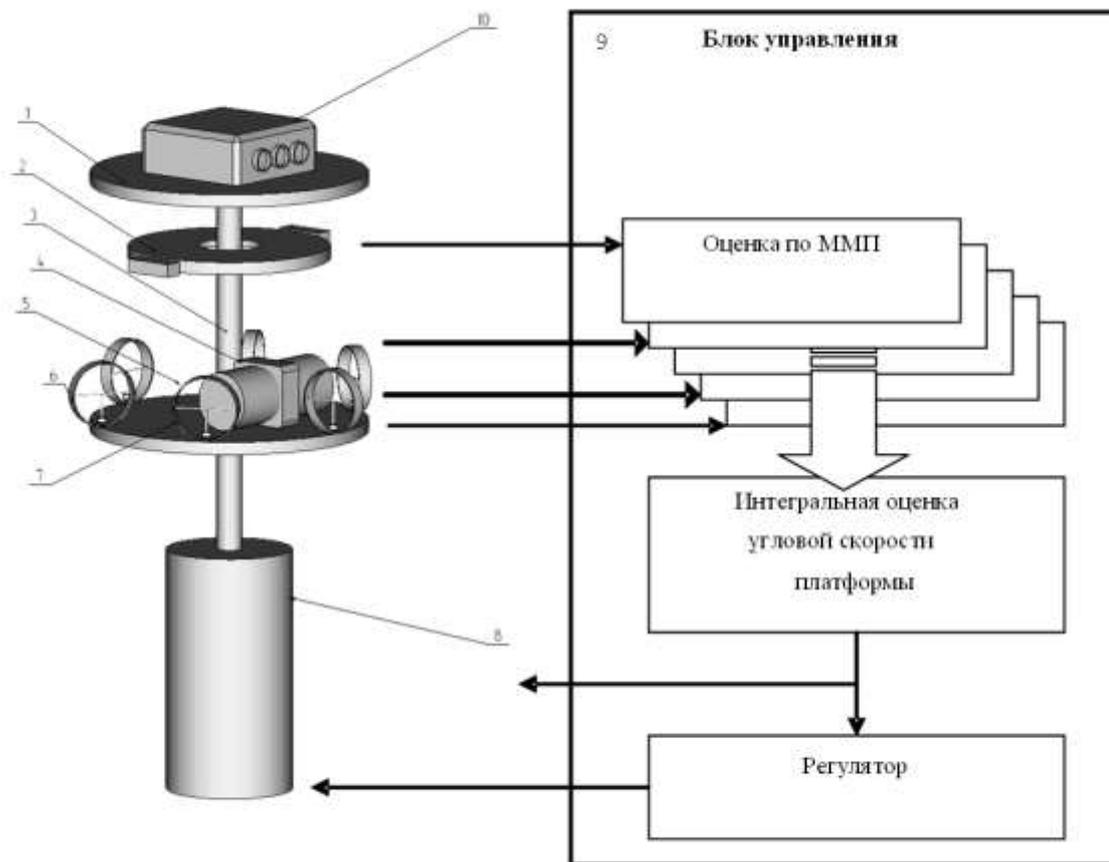


Рис 1 - Обобщённая схема стенда

Стенд состоит из датчиков: угла (2), угловой скорости (4), тангенциального (6) и центростремительного (7) ускорений, которые жёстко связаны со вспомогательной платформой (5), соединённой с главной платформой (1), к которой крепится испытуемый прибор (10), с помощью жёсткого вала (3), который вращается при помощи электродвигателя (8), управляемого блоком управления (9). Информация об угловой скорости, её производной и интеграле, поступающая с соответствующих датчиков, преобразуется блоком управления в сигналы управления электродвигателем.

В работах [1,2,11-25] практически не рассматриваются вопросы оценки неопределённости определения угловой скорости платформы поворотного стенда. Например, оценка, приведённая в [14] имеет качественный характер, в остальных работах исследуется неопределённость показаний единственного датчика, по сигналам которого производится управление поворотной платформой. В [3,4,6,9] проведён достаточно подробный анализ неопределённости воспроизведения и измерения плоского угла. Однако, как было показано в [30-34], невозможно достоверное определения малых угловых скоростей по показаниям датчика угла.

В связи с вышесказанным в [30] была предложена методика оптимальной оценки угловой скорости поворотной платформы стенда, приведённого на рис. 1. Для нахождения асимптотически эффективной оценки угловой скорости в [30,33,344,355,366] были построены модели погрешностей датчиков и исследованы их свойства.

2. Оптимальное оценивание угловой скорости поворотного стенда по методу максимального правдоподобия

В [30] продемонстрировано несоответствие законов распределения погрешностей датчиков нормальному закону, что ограничивает применимость метода наименьших квадратов (МНК) для определения оценки угловой скорости платформы стенда. В работах [30-32] предлагается находить оптимальную оценку угловой скорости поворотной платформы стенда методом максимального правдоподобия (ММП) [37]. Приведём далее вкратце суть предлагаемого в упомянутых выше работах метода.

Пусть y_k – измерения датчиков. Тогда

$$y_k = M_k g_k(\omega_k) + \xi_k = M_k g_k(\omega_k) + (\zeta_k + \xi_k^0), \quad (1)$$

где ω – угловая скорость, $g(\omega)$ – передаточная функция датчика, M – масштабные коэффициенты датчиков, ξ – аддитивная составляющая погрешности датчиков, включающая в себя систематическую ξ^0 и случайную ζ составляющие, $k=1\dots m$ – порядковый номер датчика. Представим оценку угловой скорости по данным с k -го датчика как:

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

где функции $f_k(y_k, z_1, z_2, z_3, \dots)$ определяются выражениями, приведёнными в [30].

Для определения общей оценки угловой скорости $\tilde{\omega}_{ML}$ по ММП, согласно методике, приведённой в [26], вначале определяются ММП-оценки угловой скорости каждого датчика.

В [30, 34, 35, 36] приводятся выражения распределений погрешностей измерений датчиков, входящих в состав поворотного стенда. Обозначим $x_k = g_k(\omega_k)$ и представим (1) в виде:

$$\xi_{ki} = y_{ki} - M_k x_k; \quad (2)$$

Будем полагать погрешности ξ_{ki} – независимыми. Полученные в [30] системы нормальных уравнений для каждого из входящих в состав стенда датчиков, приведены ниже.

Оценка максимального правдоподобия угловой скорости по показаниям датчика угловых скоростей.

Для датчика угловых скоростей (ДУС) с учетом того, что $x = \omega$, в [30] приводится следующее выражение для совместной плотности вероятностей выборки из N измерений угловой скорости:

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

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

В дальнейшем удобнее использовать логарифм этой функции правдоподобия [37]:

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

$$= N \ln \left(\frac{1}{4d} \right) + \sum_{i=1}^N \ln \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right). \quad (3)$$

Видно, что (2) зависит от двух параметров ω и σ . Оценка параметра ω в дальнейшем используется для получения общей оценки, а оценка параметра σ определяет вес, с которым полученная оценка ω входит в общую оценку угловой скорости.

Окончательно, в [30] приводится следующая система нормальных уравнений для определения оценки угловой скорости по показаниям датчика угловой скорости и её дисперсии:

$$\frac{dL(\omega, \sigma)}{d\omega} = \sum_{i=1}^N \frac{M_\omega \left(\exp \left(-\frac{(y_i - M_\omega \omega - d)^2}{2\sigma_i^2} \right) - \exp \left(-\frac{(y_i - M_\omega \omega + d)^2}{2\sigma_i^2} \right) \right)}{\sqrt{\pi}\sigma_i \left(\operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega + d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] - \operatorname{erf} \left[\frac{y_i - M_\omega \omega - d}{\sqrt{2}\sigma_i} \right] \right)} = 0. \quad (4)$$

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

$$- \frac{\exp \left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_\omega \omega + d)^2}{\sigma_i^2} \right) (y_i - M_\omega \omega + d) \sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma_i^2} = 0. \quad (5)$$

Там же предлагается решать систему с помощью численных методов, основанных на квазиньютоновских методиках [38].

Оценка максимального правдоподобия угловой скорости по показаниям датчиков тангенциального и центростремительного ускорений

Для датчиков центростремительного и тангенциального ускорений в [30] приводятся выражения для определения оценок угловой скорости по показаниям датчиков центростремительной и тангенциальной составляющих линейного ускорения:

$$\frac{dL(\omega)}{d\omega} = \sum_{i=1}^N \frac{M_{\omega} \left(\exp\left(-\frac{(y_i - M_k g_k(\omega_k) - d)^2}{2\sigma_i^2}\right) - \exp\left(-\frac{(y_i - M_k g_k(\omega_k) + d)^2}{2\sigma_i^2}\right) \right)}{\sqrt{\pi}\sigma \left(\operatorname{erf}\left[\frac{y_i - M_k g_k(\omega_k) + d}{\sqrt{2}\sigma_i}\right] - \operatorname{erf}\left[\frac{y_i - M_k g_k(\omega_k) - d}{\sqrt{2}\sigma_i}\right] \right)} \cdot \frac{dg_k(\omega_k)}{d\omega} = 0. \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{dL(\omega, \sigma)}{d\sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_{\omega}\omega - d)^2}{\sigma_i^2}\right) (y_i - M_{\omega}\omega - d)\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma_i^2} - \\ - \frac{\exp\left(-\frac{1}{2} \frac{(y_i - M_{\omega}\omega + d)^2}{\sigma_i^2}\right) (y_i - M_{\omega}\omega + d)\sqrt{2}}{\sqrt{\pi}\sigma_i^2} = 0. \end{aligned} \quad (7)$$

Оценка максимального правдоподобия угловой скорости по показаниям датчика угла

Для датчика угла в [30] приведена следующая система нормальных уравнений:

$$W_N = \prod_{i=1}^N \sum_{j=1}^R \rho_j \cdot N_x\{\mu_j, \sigma_j\}$$

$$L(\alpha) = \ln(W_N) = \ln\left(\prod_{i=1}^N \sum_{j=1}^R \rho_j \cdot N_x\{\mu_j, \sigma_j\}\right) = \sum_{i=1}^N \ln\left(\sum_{j=1}^R \rho_j \cdot N_x\{\mu_j, \sigma_j\}\right)$$

$$\frac{dL}{d\alpha} = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j=1}^R \frac{\rho_j (y_i - \alpha) \exp\left\{\frac{(y_i - \alpha)^2}{2\sigma_{ij}^2}\right\}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ij}^3}}{\sum_{j=1}^R \frac{\rho_j \exp\left\{\frac{(y_i - \alpha)^2}{2\sigma_{ij}^2}\right\}}{\sqrt{2\pi}\sigma_{ij}}} = 0 \quad (8)$$

$$\frac{dL(\alpha, \sigma)}{d\sigma} = \sum_{i=1}^N \frac{\sum_{j=1}^R \left[\frac{1}{2} \frac{\rho_i \exp\left\{\frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}}\right\} (2\pi)^N \left(\frac{\partial}{\partial \sigma_{ij}} \det(\sigma_{ij})\right) \rho_i (y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha) \exp\left\{\frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}}\right\}}{\left(\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})}\right)^3} + \frac{\rho_i (y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha) \exp\left\{\frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}}\right\}}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})} \sigma_{ij}^2} \right]}{\sum_{j=1}^R \frac{\rho_i \exp\left\{\frac{(y_i - \alpha)^T (y_i - \alpha)}{\sigma_{ij}}\right\}}{\sqrt{(2\pi)^N \det(\sigma_{ij})}}} \quad (9)$$

На практике, как правило, масштабные коэффициенты M_k . известны неточно и могут изменяться в процессе работы станда. Методика их оценки также приводится в [30].

3 Методика определения угловой скорости платформы поворотного станда

Методика определения оценки угловой скорости платформы поворотного станда по совокупности измерений всех входящих в его состав датчиков включает два этапа, в ходе первого из которых производится калибровка станда, после чего, в ходе второго этапа, станд может использоваться для воспроизведения и измерения угловой скорости. Далее кратко приведём суть изложенной в [30] методики.

На этапе калибровки:

1) Для неподвижной платформы станда определяются средние значения величин ζ_{ω_T} , a_u^0 , a_τ^0 . которые затем используются как начальные приближения.

2) Производится поворот платформы на фиксированные углы α_i с фиксированными угловыми скоростями ω_i , $i=1, \dots, M$. Продолжительность разворотов T_i фиксируется.

3) Для всех датчиков взвешенным МНК [38] вычисляются масштабные коэффициенты M_k .

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

в качестве оценок постоянных составляющих ξ_k^0 берутся значения, определённые в момент, когда платформа станда была неподвижна.

На этом калибровка стенда заканчивается. На втором этапе, во время работы стенда:

4) По ММП, путём численного решения систем уравнений (4),(5); (6),(7); (8),(9) определяются оценки угловой скорости $\hat{\omega}_k$ и дисперсии σ_k^2 по показаниям каждого из датчиков.

5) Весовые коэффициенты p_k определяются по формуле $p_k=1/\sigma_k^2$.

6) Далее находится общая оценка угловой скорости, как средневзвешенная сумма ранее найденных оценок $\hat{\omega}_k$ [37,38]:

$$\tilde{\omega}_{ML} = \frac{\sum_{k=1}^M p_k \hat{\omega}_k}{\sum_{k=1}^M p_k} . \quad (10)$$

4 Результаты моделирования работы стенда для задания угловых скоростей

На рис. 2 приведены результаты численного моделирования погрешностей оценки угловой скорости стенда для каждого и использованных типов датчиков как функции угловой скорости. Параметры датчиков, использованные при моделировании, были взяты из [14, 33].

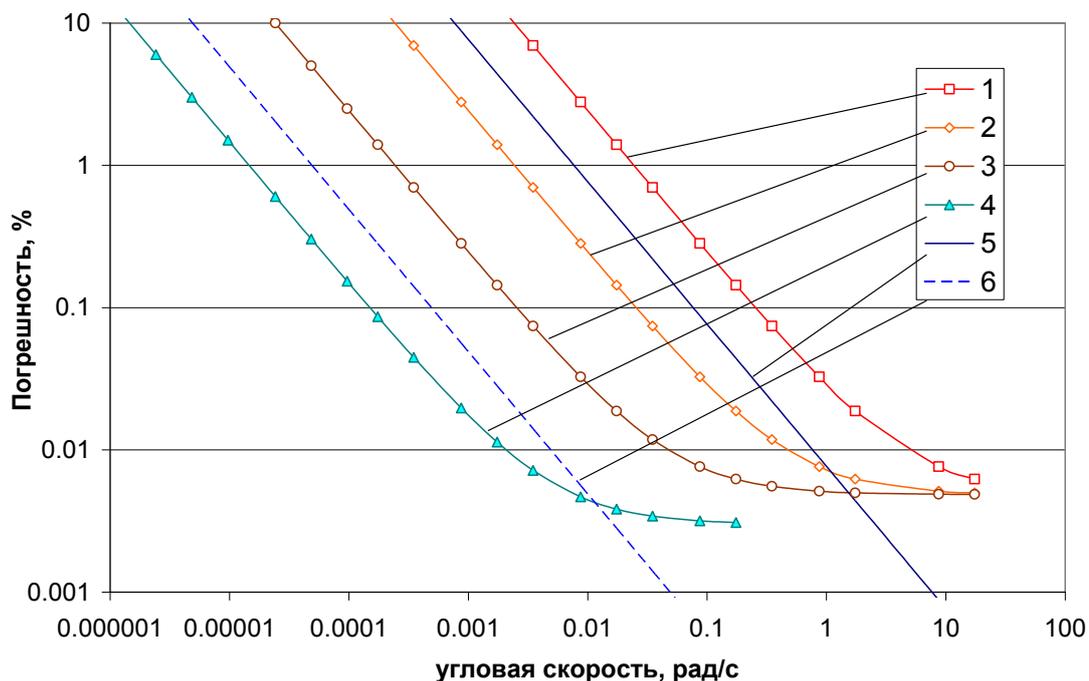


Рис. 2 - Зависимость погрешностей отдельных датчиков от угловой скорости стенда

На рис. 2 введены следующие обозначения: 1) неопределённость оценки угловой скорости по показаниям датчика угла, период усреднения составляет 1с; 2) неопределённость оценки угловой скорости по показаниям датчика угла, период усреднения составляет 0,1с; 3) неопределённость оценки угловой скорости по показаниям датчика угла, период усреднения составляет 0,01с;

4) неопределённость оценки угловой скорости по показаниям ДУС; 5) неопределённость оценки угловой скорости по показаниям датчика центростремительного ускорения; 6) неопределённость оценки угловой скорости по показаниям датчика тангенциального ускорения.

Заметно значительное превосходство по точности оценки угловой скорости по информации с ДУС. Также следует отметить, что точность определения скорости вращения по информации с датчика угла в значительной степени зависит от времени усреднения. Для прецизионных стендов необходимые точности достижимы когда период усреднения составляет единицы секунд. Современные датчики, испытания которых проводятся с использованием поворотных стендов, обеспечивают полосы пропускания на уровне десятков-сотен герц [39-47], поэтому поворотные стенды для испытаний подобных приборов невозможно построить на основе одного только датчика угла.

Результаты численного моделирования погрешностей общей оценки угловой скорости поворотной платформы стенда представлены на рис 3. На рисунке цифрами обозначены: 1) метод оценки угловой скорости по информации одного датчика с переключением используемого датчика в зависимости от режима работы стенда, предложенный в [14]; 2) метод оценки угловой скорости как среднего арифметического данных всех датчиков; 3) приведенная в [30] методика оценки угловой скорости стенда.

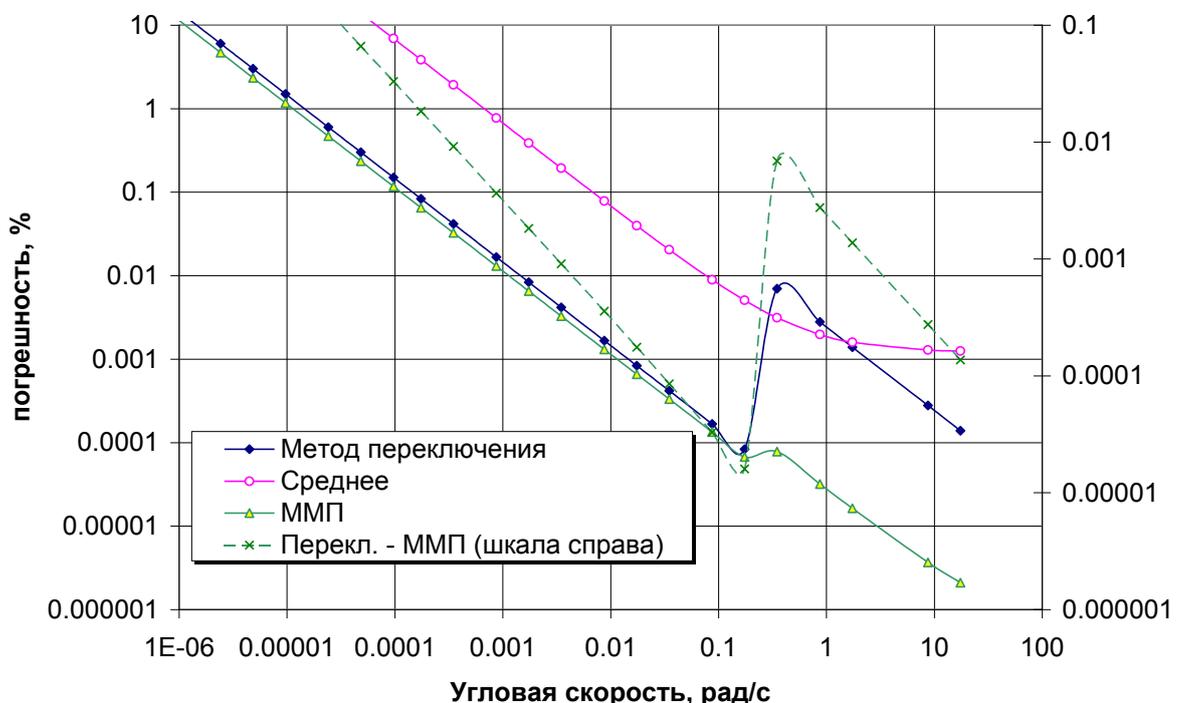


Рис. 3 - Сравнение погрешности оценки угловой скорости различными методами

Из рис. 3 видно, что среднее арифметическое 2) информации всех датчиков имеет наименьшую точность, т.к. точностные характеристики разнотипных

датчиков существенно отличаются при различных значениях угловой скорости. Методы переключения и предложенная в [30] методика на основе ММП демонстрируют близкие результаты в диапазоне низких угловых скоростей, где эффективно работает ДУС, и значительно разнятся в диапазоне высоких угловых скоростей, в котором основной вклад вносят датчики угла и линейных ускорений. В диапазоне низких угловых скоростей превосходство предложенного метода 3) над методом переключения 1) составляет 25-30% (пунктирная кривая на рис. 3 показывает разницу между погрешностями двух методов, значения отсчитываются по дополнительной оси y), а в диапазоне высоких угловых скоростей – более порядка.

Заключение

В статье приведены результаты численного моделирования точности измерения и воспроизведения угловой скорости прецизионным поворотным стендом, по совокупности входящих в его состав датчиков. Проведено сравнение оценки угловой скорости поворотной платформы стенда тремя различными методами. Результаты моделирования динамики поворотного стенда демонстрируют значительное отличие погрешности определения угловой скорости платформы стенда по измерениям различных датчиков, входящих в его состав.

Методика, основанная на методе максимального правдоподобия, позволяет снизить погрешность оценки угловой скорости платформы стенда по сравнению с другими известными методами. Величина снижения погрешности в зависимости от режима работы стенда может составить от 20% до 10 раз.

Результаты, представленные в данной статье, получены при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ, проект 9.2108.2017/4.6.

Литература

1. Синельников А.Е., Кудрявцев В.Н., Павлов П.А. Новый эталон России в области измерения низкочастотных параметров движения. // Сборник материалов IX Санкт-Петербургской международной конференции по инерциальным навигационным системам. СПб.: ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор», 2002. С. 221-229.
2. Синельников, А.Е. Принципы построения нового комплексного эталона в области измерений низкочастотных параметров движения // Механика и навигация. СПб, 1999. С. 59-61.
3. R. Probst, R. Wittekopf, M. Krause, et al. The new PTB angle comparator // Measurement Science and Technology. 1998. №9. P. 1059-1066.
4. Watanabe, T. et al. Automatic high precision calibration system for angle encoder // Proceeding of SPIE. 2001. Vol. 4401. Pt. 1. P. 267-274; 2003. Vol. 5190. Pt. 2. P. 400-409.
5. 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. T. 16. № 4. PP. 623-637.

6. Krause, M. Just A., Geckeler R.D., Bosse H., Angle metrology at the PTB: current status and developments / // Proceeding of the 9-th ISMTII, Saint- Petersburg, Russia, 2009. Saint-Petersburg, 2009.
7. Sim, P.J. // Modern Techiques in Metrology. Singapore: World Scientific, 1984. P. 102-121
8. Бурнашев, М.Н. Лукьянов Д.П., Павлов П.А., Филатов Ю.В. Развитие методов и средств лазерной динамической гониометрии // Квантовая электроника, 2000. Т. 30, №2. С. 141-146
9. Bournashev M.N., Filatov Y.V., Loukianov 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 // Proceedings of 2-nd EUSPEN international conference, Turin, Italy, 2001. Turin, 2001. P . 322-325.
10. Исаев Л.К., Синельников А.Е. Метрологические задачи в области малых и сверхмалых величин параметров движения // Измерительная техника. 1998. № 4. С. 3.
11. Kalihman D.M., Kalihman L.Y., Sadomtsev Y.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 // В сборнике: 17th Saint Petersburg International Conference on Integrated Navigation Systems, ICINS 2010 - Proceedings 17. 2010. PP. 151-156
12. 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 // В сборнике: XXIII Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам сборник материалов. Главный редактор В. Г. Пешехонов. 2016. С. 302-307.
13. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Депутатова Е.А., Крайнов А.П., Ермаков Р.В., Кривцов Е.П., Янковский А.А., Львов А.А. Пути расширения диапазона измерения и повышения точностных характеристик поворотных стендов с инерциальными чувствительными элементами для контроля гироскопических приборов // В сборнике: Юбилейная XXV Санкт-Петербургская Международная конференция по интегрированным навигационным системам Сборник материалов. Главный редактор В.Г. Пешехонов. 2018. С. 323-328.
14. Калихман, Д.М. Прецизионные управляемые стенды для динамических испытаний гироскопических приборов. Под общ ред. акад. В.Г. Пешехонова СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ «Электроприбор», 2008. 296 с. ISBN 5-900780-82-5.
15. Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Улыбин В.И. Стенд для контроля прецизионного гироскопического датчика угловой скорости Патент на изобретение RUS 2044274 27.05.1992

16. Депутатова Е.А., Калихман Д.М., Полушкин А.В., Садомцев Ю.В. Цифровая стабилизация движений прецизионных управляемых оснований с инерциальными чувствительными элементами. II. Применение поплавкового измерителя угловой скорости и маятниковых акселерометров // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2011. № 2. С. 131-146.
17. Депутатова Е.А., Калихман Д.М., Никифоров В.М., Садомцев Ю.В. Прецизионные поворотные стенды нового поколения с инерциальными чувствительными элементами и цифровым управлением // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2014. № 2. С. 130.
18. Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Калдымов Н.А., Улыбин В.И., Андрейченко К.П., Сновалев А.Я. Широкодиапазонный стенд для контроля измерителей угловых скоростей. Патент на изобретение RUS 2142643 10.07.1996
19. Депутатова Е.А., Калихман Д.М., Полушкин А.В., Садомцев Ю.В. Цифровая стабилизация движений прецизионных управляемых оснований с инерциальными чувствительными элементами. I. Применение поплавкового измерителя угловой скорости. // Известия Российской академии наук. Теория и системы управления. 2011. № 1. С. 120-132.
20. Калихман Д.М., Калихман Л.Я., Садомцев Ю.В., Депутатова Е.А., Нахов С.Ф., Сапожников А.И., Межирицкий Е.Л., Никифоров В.М. Универсальный широкодиапазонный стенд для контроля измерителей угловой скорости Патент на изобретение RUS 2494345 16.01.2012
21. Калихман Д.М. Прецизионные стенды для контроля датчиков угловых скоростей на основе акселерометров линейных ускорений // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2001. Т. 44.
22. Калихман Д.М. Одноосное управляемое основание с датчиком угловой скорости в качестве чувствительного элемента, находящегося в режиме самоконтроля // Известия высших учебных заведений. Приборостроение. 2001. Т. 44. С. 30.
23. Янковский А.А., Плотников А.В., Савкин К.Б., Козак И.В. Вторичный эталон плоского угла: состояние и направления развития // Измерительная техника. 2012. № 7. С. 30-31.
24. Кривцов Е.П., Чекирда К.В., Янковский А.А. Современное состояние первичных эталонов в областях измерений геометрических, механических и связанных с ними величин // Измерительная техника. 2017. № 12. С. 23-27.
25. Янковский А.А., Плотников А.В., Савкин К.Б., Козак И.В. Новый эталон единицы плоского угла для области обороны и безопасности государства. // Вестник метролога. 2012. №3. С.33-35
26. Кондратов Д.В., Могилевич Л.И. Возмущающие моменты в поплавковых гироскопах и акселерометрах с упругим корпусом // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 11. С. 3-19.
27. Анциферов С.А., Кондратов Д.В., Могилевич Л.И. Возмущающие моменты в поплавковом гироскопе с упругим корпусом прибора на вибрирующем основании при несимметричном торцевом истечении // Известия Российской академии наук. Механика твердого тела. 2009. № 3. С. 25-35.

28. Кондратов Д.В. Гидродинамические силы, действующие на поплавок поплавкового гироскопа с упругим корпусом при несимметричном истечении жидкости в торцы // Авиакосмическое приборостроение. 2007. № 11. С. 4-11.
29. Кондратов Д.В., Кондратова Ю.Н., Могилевич Л.И. Вибрационные возмущающие моменты в поплавковом гироскопе с упругим корпусом при несимметричном истечении жидкости в торцы // Авиакосмическое приборостроение. 2008. № 7. С. 2-8.
30. Ермаков Р.В., Серанова А.А., Львов А.А., Калихман Д.М. Оптимальное оценивание параметров движения прецизионного поворотного станда по методу максимального правдоподобия // Измерительная техника. 2019. № 2. С. 39-44.
31. Ермаков Р.В., Львов А.А., Светлов М.С. Исследование методов повышения метрологических характеристик стандов для задания углов и угловых скоростей // Известия ЮФУ. Технические науки. 2017. № 3 (188). С. 6-17.
32. Ermakov R.V., Kalihman D.M., L'Vov A.A. et al. Angular Velocity Estimation of Rotary Table Bench Using Aggregate Information From the Sensors of Different Physical Nature // В сборнике: Proceedings of the 2017 IEEE Russia Section Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering Conference, ElConRus 2017 2017. С. 820-825.
33. Ермаков Р.В., Львов А.А. Анализ погрешностей углоизмерительного станда на основе оптического бесконтактного датчика угла // В сборнике: Проблемы управления, обработки и передачи информации сборник трудов IV Международной научной конференции: в 2 томах. 2015. С. 116-123.
34. Ермаков Р.В., Калихман Д.М., Львов А.А. и др. Исследование статистических свойств погрешности оптического датчика угла // Математические методы в технике и технологиях - ММТТ. 2016. № 8 (90). С. 155-158.
35. Ермаков Р.В., Калихман Д.М., Кондратов Д.В., Львов А.А. Исследование законов распределения погрешностей датчиков, входящих в состав стандов для задания угловых скоростей // Математическое моделирование, компьютерный и натурный эксперимент в естественных науках. – 2016. – № 3. С. 9-16.
36. Ермаков Р.В., Калихман Д.М., Львов А.А. Использование полигауссовской аппроксимации для описания свойств погрешностей оптического датчика угла // Труды международного симпозиума Надежность и качество. 2016. Т. 2. С. 23-25.
37. Линник, Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений. – М.: ГИФМЛ, 1958. – 334 с.
38. Гилл Ф., Мюррей У., Райт М. Практическая оптимизация. – М.: Мир, 1985. – 509 с.
39. Калихман Д.М., Туркин В.А., Платоненко Ю.А., Никифоров В.М., Садомцев Ю.В., Рязанцев А.С., Афанасьев М.Ю. Основы разработки цифровых регуляторов и программно - математического обеспечения для современных бесплатформенных инерциальных навигационных систем в условиях действия помех // В сборнике: ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ сборник трудов IV Международной научной конференции : в 2 томах. 2015. С. 14-23.

40. Межирицкий Е.Л., Сапожников А.И., Смирнов Е.С., Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф., Поздняков В.М., Скоробогатов В.В. Термоинвариантные безобогревные измерители угловой скорости и линейного ускорения // XXI Санкт-Петербургская международная конференция по интегрированным навигационным системам Сборник материалов. 2014. С. 203-219.
41. Акеев В.А., Копичева А.А., Калихман Д.М. Математическая модель прецизионного кварцевого маятникового акселерометра // Навигация и управление движением материалы докладов VIII Конференции молодых ученых. под общей редакцией В.Г. Пешехонова. 2006. С. 262-267.
42. Бранец В.Н., Дибров Д.Н., Рыжков В.С., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Полушкин А.В., Нахов С.Ф. Измеритель вектора кажущегося линейного ускорения -прибор БИЛУ КХ69-042 для су спускаемого аппарата корабля "СОЮЗ-ТМА" // Гироскопия и навигация. 2006. № 3 (54). С. 104.
43. Депутатова Е.А., Гребенников В.И., Калихман Д.М., Скоробогатов В.В., Чибирев А.С. Математическая модель чувствительного элемента кварцевого маятникового акселерометра // ПРОБЛЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, ОБРАБОТКИ И ПЕРЕДАЧИ ИНФОРМАЦИИ сборник трудов V Международной юбилейной научной конференции. Саратовский государственный технический университет. 2017. С. 54-61.
44. Гребенников В.И., Калихман Л.Я., Калихман Д.М., Нахов С.Ф., Скоробогатов В.В., Сапожников А.И., Смирнов Е.С. Виброустойчивый маятниковый акселерометр линейных ускорений с цифровой обратной связью // Сборник материалов XXII Санкт-Петербургской международной конференции по интегрированным навигационным системам Главный редактор В. Г. Пешехонов. 2015. С. 368-376.
45. Депутатова Е.А., Гнусарев Д.С., Калихман Д.М. Анализ шумовых составляющих кварцевого маятникового акселерометра с цифровым усилителем обратной связи // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. 2018. Т. 18. № 6. С. 1091-1098.
46. Депутатова Е.А., Калихман Д.М. Оценка стабильности основных параметров кварцевого маятникового акселерометра согласно российскому стандарту и методом вариаций Алана // Труды ФГУП "НПЦАП". Системы и приборы управления. 2016. № 4. С. 14-20.
47. Ермаков Р.В., Попов А.Н., Скрипаль Е.Н., Калихман Д.М., Кондратов Д.В., Львов А.А. Методы и результаты испытаний инерциальных датчиков, предназначенных для эксплуатации на летательных аппаратах вертолётного типа // В сборнике: XXIV САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКАЯ МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ИНТЕГРИРОВАННЫМ НАВИГАЦИОННЫМ СИСТЕМАМ Сборник материалов. Главный редактор В.Г. Пешехонов. 2017. С. 244-248