

УДК 621.396

Р. И. Сольнищев, Е. П. Казаков
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

Д. С. Положенцев
Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического
приборостроения

Методика снижения погрешности измерения средней угловой скорости вращения подвеса гиromотора силового гироскопического комплекса

Получена зависимость погрешности измерения средней угловой скорости вращения подвеса гиromотора от его реальной скорости вращения и начального углового положения. Представлена оценка погрешности измерения средней угловой скорости вращения по информации измерителя углового положения реального образца силового гироскопического комплекса. Предложена методика снижения погрешности измерения средней угловой скорости вращения подвеса гиromотора путем выбора оптимальных параметров начального углового положения и задаваемой угловой скорости вращения. Результаты, полученные в ходе исследования, могут быть использованы для снижения погрешности измерения угловой скорости вращения подвеса гиromотора силовых гироскопических комплексов на различных этапах их жизненного цикла. Представленная методика может быть применена для оценки погрешности измерения средней угловой скорости вращения любого электропривода, в состав которого входит датчик угла, погрешность измерения углового положения которого может быть разбита на систематические гармонические составляющие.

Силовой гироскопический комплекс, исполнительный электропривод, угловая скорость вращения, погрешность измерения угловой скорости вращения, индукционный датчик угла, погрешность измерения углового положения

Силовой гироскопический комплекс (СГК) – это устройство, применяемое, как правило, в качестве исполнительного органа в системах ориентации (СО) космических аппаратов (КА) дистанционного зондирования Земли, обеспечивающее правильную ориентацию КА в полете и предотвращающее его беспорядочное вращение. Как правило, СГК состоит из силового гироскопического прибора (СГП) – силового гироскопа в кардановом подвесе с двумя степенями свободы (гиродина) и электронного прибора – устройства, обеспечивающего обработку заданных СО КА команд управления и передачу телеметрической информации [1]–[2].

Момент, создаваемый СГК на КА, зависит от кинетического момента ротора гиromотора и угловой скорости поворота его подвеса [3]. Качество управляющего момента СГК зависит от работы исполнительного электропривода (ИЭП), поскольку стабильность значений кинетического момента равна десятым долям процента. ИЭП должен обеспечить необходимую точность и динамику обработки угловой скорости вращения

подвеса гиromотора (ПГ) СГП. Чаще всего СГК работает в двух режимах: программные повороты и стабилизация. В режиме программных поворотов задаваемые угловые скорости вращения ПГ достигают десятков градусов в секунду при больших значениях нагружающего гироскопического момента, действующего по оси ПГ. В режиме стабилизации задаваемые угловые скорости могут достигать тысячных долей градуса в секунду и иметь высокие требования к точности их реализации [4].

Разрабатываемые в настоящее время ИЭП СГК работают в режиме обратной связи по угловому положению ПГ, а в их основе лежит вентильный двигатель. Датчик угла типа индукционный редуктосин (ИР), расположенный на валу ПГ, и электронный преобразователь (ЭП) образуют измеритель углового положения (ИУП), передающий информацию об угловом положении ПГ в СО КА. Индукционный редуктосин представляет собой бесконтактный многополюсный поворотный трансформатор с точным и грубым типами отсчета, состоящий из ротора и статора, выход-

ными сигналами которого являются переменные напряжения, сдвинутые друг относительно друга на 90° . ЭП служит для преобразования выходных напряжений редуктосина в соответствующий цифровой код и формирования синусоидального напряжения питания обмоток возбуждения статора. В настоящее время известны ИУП космического применения, способные формировать до 19 стабильных двоичных разрядов кода углового положения.

Информация с этого же ИУП необходима для формирования обратной связи по угловому положению ПГ и управления вентильным двигателем. Система управления ИЭП также может быть построена с использованием датчика угла, расположенного на валу двигателя, однако такое исполнение не исключает из состава ИЭП датчик, расположенный на оси ПГ [5], [6].

Описание проблемы. Зачастую в технических заданиях на разработку ИЭП СГК предъявляются требования к качеству обеспечения средней угловой скорости вращения ПГ:

$$\omega_3(1 - k_\Delta) \leq \omega \leq \omega_3(1 + k_\Delta),$$

где ω_3 – заданная угловая скорость вращения ПГ; k_Δ – допустимая величина относительной погрешности обеспечения угловой скорости вращения ПГ; ω – средняя угловая скорость вращения ПГ.

При этом оговаривается, за какое время производится измерение средней угловой скорости вращения ПГ ($t_{\text{изм}}$). В зависимости от параметров разрабатываемого КА – требуемого быстродействия, момента инерции и т. п. – значения $t_{\text{изм}}$ и k_Δ могут быть различными.

В целом, СГК – технически сложное изделие, которое проходит значительное количество проверок на различных этапах своего жизненного цикла – предъявительские и приемосдаточные испытания на предприятии-изготовителе, входной контроль на предприятии-изготовителе КА, наземная экспериментальная отработка в составе КА, летные испытания и т. д. Испытания могут проводиться для изучения воздействия различных внешних факторов: пониженной и повышенной температуры, вакуума, электростатических разрядов и помех. Все это значительно затрудняет установку каких-либо внешних технологических измерительных средств на ось ПГ. Как следствие, появляется необходимость измерения средней угловой скорости вращения ПГ с использованием технических подсистем, входящих в состав самого СГК.

Стоит также отметить отсутствие измерителей угловой скорости вращения, предназначенных для оценки угловых скоростей вращения ПГ в режиме стабилизации. Использование понижающего редуктора в прямой цепи может позволить применить датчик измерения скорости. Однако неравномерность хода, ограниченная жесткость и люфт редуктора, повышенный износ деталей, работающих на высоких скоростях, приводят к потере точности и уменьшению срока службы прибора. Результаты анализа факторов, оказывающих влияние на характеристики высокоточных ЭП, вынуждают разработчиков максимально упрощать кинематические передачи или полностью исключать их [7]. Кроме того, введение дополнительного устройства, не участвующего в основной работе СГК и предназначенного только для проведения технологических проверок, видится избыточным и негативно сказывается на габаритно-массовых характеристиках изделия. В целом, в большом количестве задач управления и проектирования современных прецизионных электроприводов прослеживается тенденция к применению в системе только углового датчика обратной связи [8].

Учитывая вышесказанное, а также то, что единственным источником информации об угловом положении ПГ в СГК служит ИУП, значение средней угловой скорости вращения ПГ определяют как изменение углового положения за единицу времени:

$$\omega_{\text{изм}} = \frac{\alpha_{\text{изм}_2} - \alpha_{\text{изм}_1}}{t_{\text{изм}}},$$

где $\alpha_{\text{изм}_1}$ – начальное измеренное угловое положение ПГ ($t = 0$); $\alpha_{\text{изм}_2}$ – угловое положение ПГ, измеренное через время $t_{\text{изм}}$.

Основной недостаток данного способа оценки угловой скорости – наличие погрешности в выходной информации ИУП и ее влияние на значение $\omega_{\text{изм}}$.

Погрешность ИУП определяется параметрами ИР и ЭП – несинусоидальностью коэффициента взаимной индукции, разными значениями активных и индуктивных сопротивлений вторичных обмоток и их неперпендикулярностью, несинусоидальностью напряжений питания и смещения, емкостной связью между вторичными обмотками и др. Указанные погрешности редуктосина возникают вследствие несовершенства технологической оснастки, необходимости иметь

технологические зазоры для сборки пакетов, из-за заусенцев, эллиптичности пластин, неизбежных операций по шлифовке и притирке внешней и внутренней поверхностей пакета статора [9]. Погрешности, вносимые ЭП, определяются в основном применяемой в нем электронной компонентной базой.

Определение математических моделей отдельных составляющих погрешности весьма трудоемко. Однако известно, что в спектре погрешности ИР доминируют гармоники с номерами, пропорциональными коэффициенту электрической редукции [10].

Анализ погрешности измерения скорости. Оценим погрешность описанного способа измерения средней угловой скорости вращения. Поскольку абсолютная погрешность представляет собой разность между измеренным ($X_{изм}$) и истинным (X_p) значениями физической величины [11], [12]:

$$\delta X = X_{изм} - X_p,$$

значение средней угловой скорости вращения ПГ может быть преобразовано следующим образом:

$$\begin{aligned} \omega_{изм} &= \frac{\alpha_{изм_2} - \alpha_{изм_1}}{t_{изм}} = \\ &= \frac{(\alpha_2 + \delta\alpha_2) - (\alpha_1 + \delta\alpha_1)}{t + \delta t} = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t + \delta t} + \frac{\delta\alpha_2 - \delta\alpha_1}{t + \delta t}, \end{aligned}$$

где $\delta\alpha_1, \delta\alpha_2$ – погрешности измерения угловых положений ПГ α_1 и α_2 , соответственно; t – реальное время, за которое произошло измерение угловых положений α_1 и α_2 ; δt – погрешность измерения времени t .

В соответствии с определением абсолютной погрешности можно записать:

$$\omega_p + \delta\omega = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t + \delta t} + \frac{\delta\alpha_2 - \delta\alpha_1}{t + \delta t},$$

где ω_p – реальное значение средней угловой скорости вращения ПГ; $\delta\omega$ – погрешность измерения средней угловой скорости вращения ПГ.

Использование элементов современной электронной базы позволяет задавать и измерять временные интервалы с высокой точностью и стабильностью [13]. Таким образом, влияние величины δt на погрешность измерения скорости будет незначительно ($\delta t \rightarrow 0$):

$$\omega_p + \delta\omega = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t} + \frac{\delta\alpha_2 - \delta\alpha_1}{t}.$$

Очевидно, что

$$\omega_p = \frac{\alpha_2 - \alpha_1}{t}.$$

Следовательно, погрешность $\delta\omega$ будет определяться значениями $\delta\alpha_1, \delta\alpha_2$ и временем осреднения t :

$$\delta\omega = \frac{\delta\alpha_2 - \delta\alpha_1}{t}.$$

Как уже было отмечено, систематические составляющие погрешности ИР имеют гармонический характер:

$$\delta\alpha_i \text{ сист} = \sum_{j=1}^n A_j \sin(j\alpha_i + \varphi_j),$$

где i – номер измеряемого углового положения; j – номер гармонической составляющей погрешности, а A_j и φ_j – ее амплитуда и начальная фаза соответственно.

Введем величину, описывающую разность погрешностей при двух угловых положениях ПГ:

$$\Delta\alpha_{\text{сист}} = \Delta\alpha_{2 \text{ сист}} - \Delta\alpha_{1 \text{ сист}},$$

тогда

$$\Delta\alpha_{\text{сист}} = \sum_{j=1}^n A_j [\sin(j\alpha_2 + \varphi_j) - \sin(j\alpha_1 + \varphi_j)].$$

Последнее выражение, исходя из определения средней угловой скорости, можно записать как

$$\Delta\alpha_{\text{сист}} = \sum_{j=1}^n A_j [\sin(j(\alpha_1 + \omega_p t) + \varphi_j) - \sin(j\alpha_1 + \varphi_j)].$$

Получившееся выражение устанавливает зависимость между систематической погрешностью измерения углового положения ПГ и средней угловой скоростью ПГ. Стоит отметить, что при малом $\omega_p t$ значение $\Delta\alpha_{\text{сист}}$ стремится к нулю.

Как правило, среднеквадратическое отклонение случайной составляющей погрешности измерения стремится к нулю. Практика показывает, что в случае использования ИУП на основе ИР шумовая составляющая погрешности минимум на порядок меньше систематической составляющей. Таким образом, выражение $\delta\omega$ можно представить в следующем виде:

$$\delta\omega = \frac{\Delta\alpha_{\text{сист}}}{t}$$

или, раскрывая $\Delta\alpha_{\text{сист}}$,

$$\delta\omega = \frac{1}{t} \sum_{j=1}^n A_j [\sin(j(\alpha_1 + \omega_p t) + \varphi_j) - \sin(j\alpha_1 + \varphi_j)].$$

Полученная формула показывает зависимость погрешности измерения угловой скорости вращения ПГ от угловой скорости вращения ПГ, времени ее измерения и начального углового положения и позволяет находить их оптимальные, с точ-

ки зрения минимального значения погрешности измерения угловой скорости вращения ПГ, соотношения. Однако предварительно необходимо получить зависимость систематической погрешности измерения углового положения от текущего углового положения ПГ.

Оценка погрешности измерения скорости реального образца СГК. При проверках образцов СГК обычно не требуется проводить тесты всех возможных задаваемых скоростей вращения.

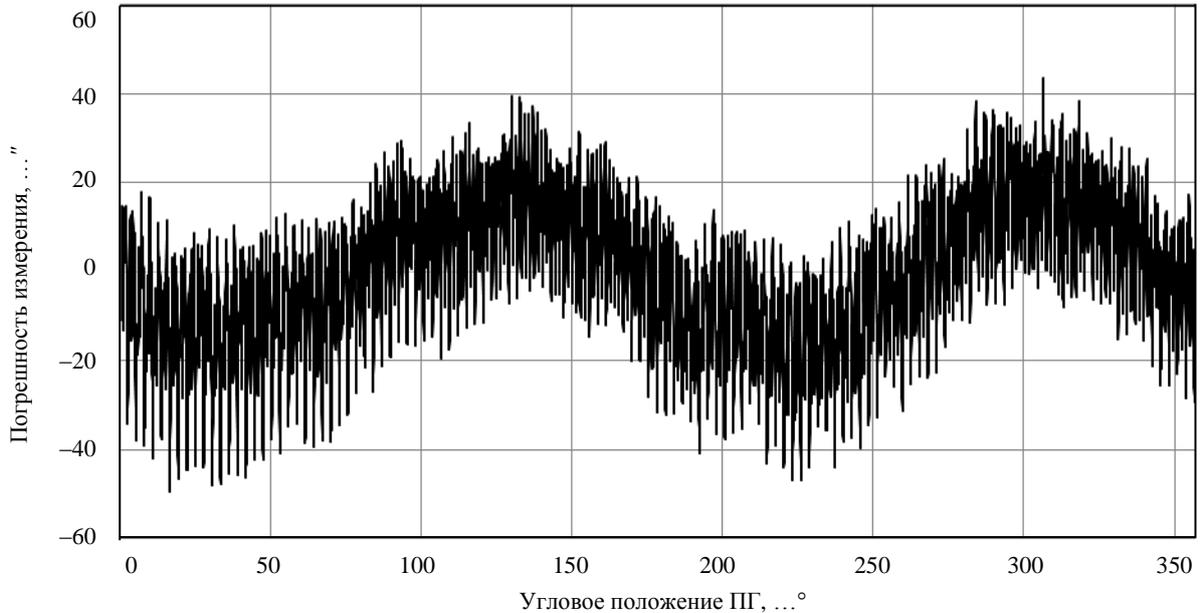


Рис. 1

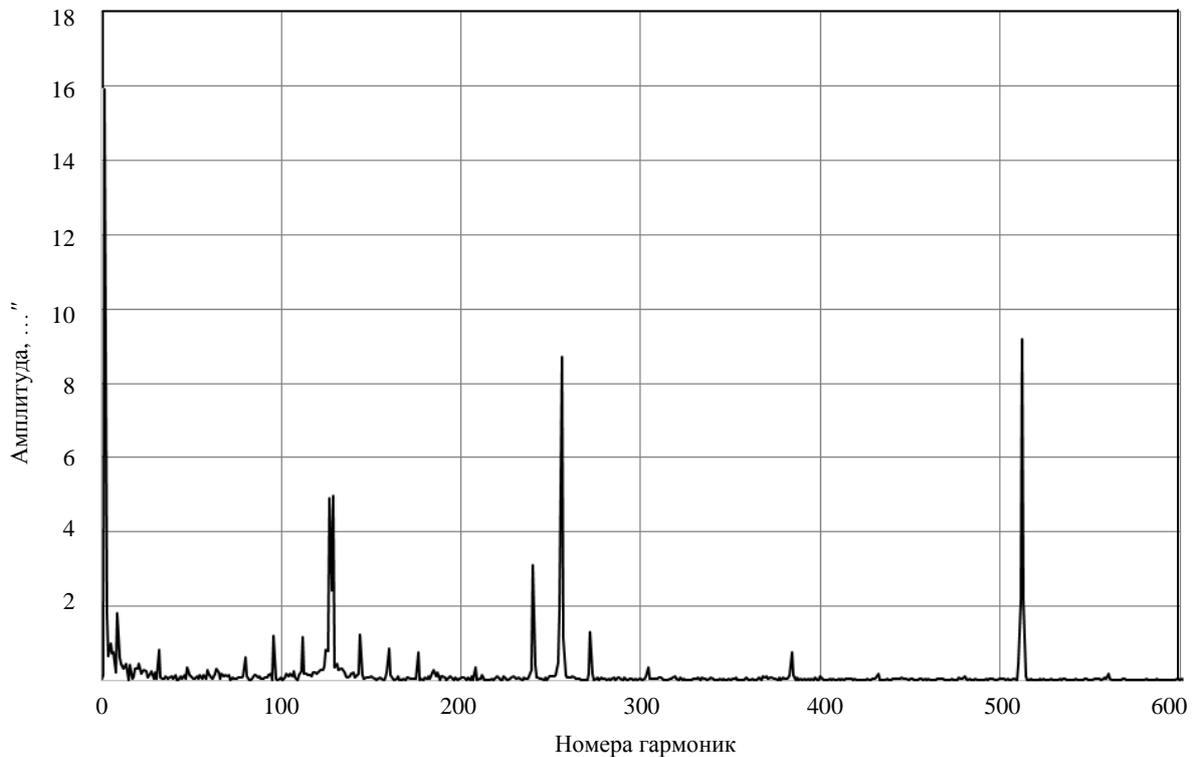


Рис. 2

Как правило, проводится 15–30 тестов на отработку средней угловой скорости вращения ПГ. Таким образом, для определения средних угловых

скоростей вращения, при которых погрешность $\delta\omega$ минимальна, была определена зависимость погрешности измерения углового положения ПГ

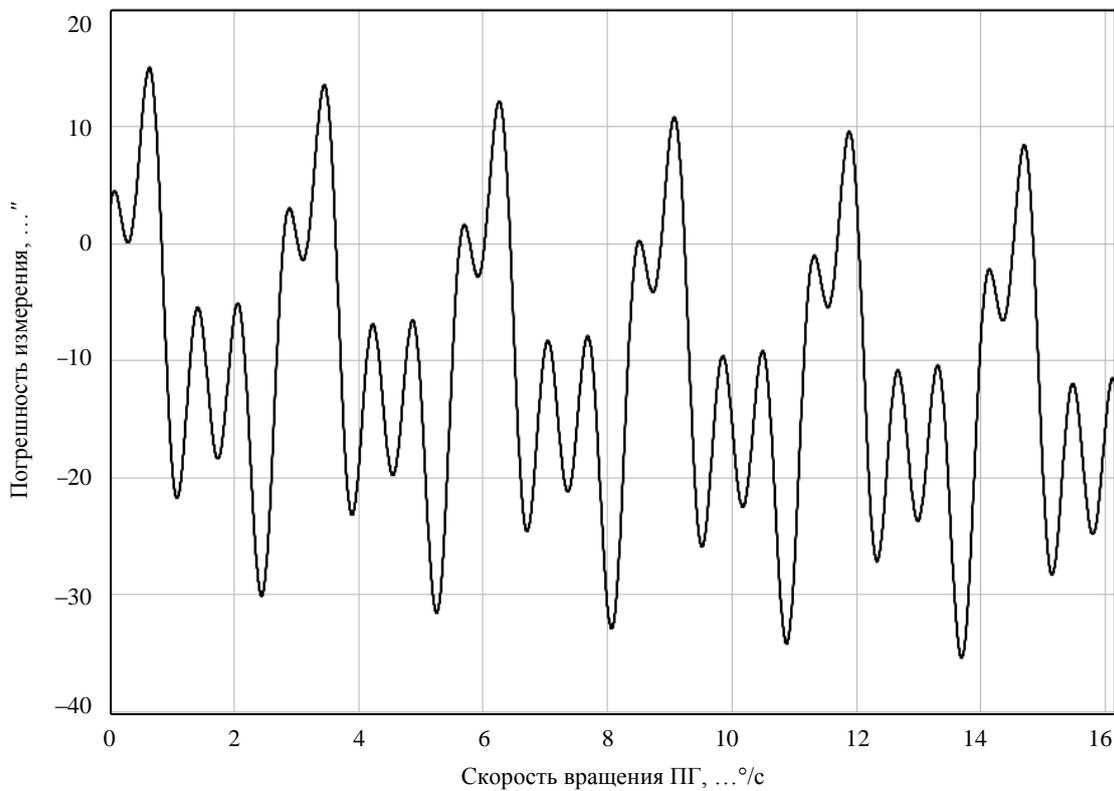


Рис. 3

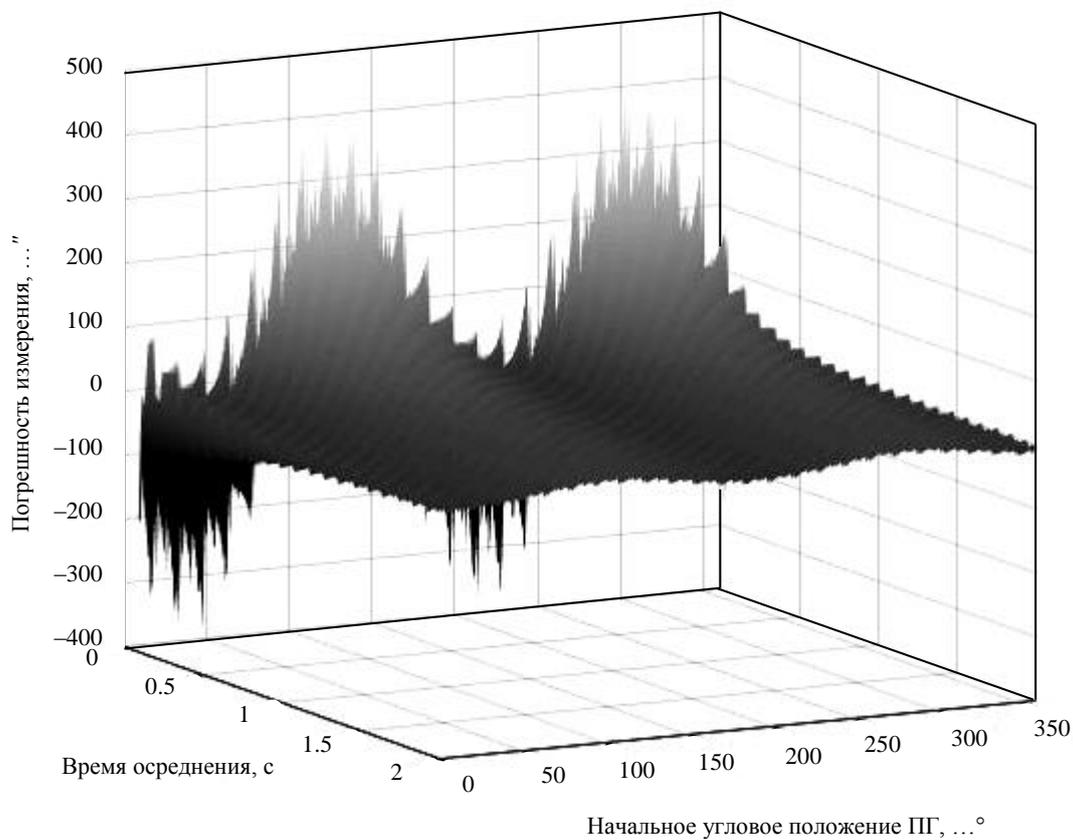


Рис. 4

от углового положения ПГ. Диаграмма погрешности измерения углового положения ПГ реального СГК представлена на рис. 1.

Для определения гармонических составляющих, оказывающих наибольшее влияние на общее значение погрешности измерения углового положения, был проведен Фурье-анализ, результаты которого представлены на рис. 2 [14], [15]. Видно, что основной «вклад» в общее значение погрешности вносят 2-, 128-, 256- и 512-я гармоники: 2-я гармоника – это следствие несоосности установки электромеханической части ИР на ось ПГ; 128-, 256- и 512-я – следствие электромагнитных процессов, протекающих в датчике угла, связанные с числом пар полюсов точного отсчета.

На рис. 3 представлена зависимость погрешности измерения средней угловой скорости вращения ПГ за время 1 с от угловой скорости вращения ПГ при значении начального углового положения $\alpha_1 = 0$. Из графика видно, что существуют значения угловой скорости вращения ПГ, при которых значение $\delta\omega \rightarrow 0$. Для определения влияния начального углового положения и времени осреднения построим зависимости погрешности измерения средней угловой скорости вращения ПГ от времени осреднения и начального углового

положения ПГ (рис. 4), а также от начального углового положения ПГ и угловой скорости вращения ПГ (рис. 5).

Таким образом, очевидно, что для снижения влияния погрешности измерения средней угловой скорости вращения ПГ во время испытаний и проверок СГК необходимо выбирать скорости, исходя из определения таких условий проведения тестов, что $\delta\omega \rightarrow 0$. Как было отмечено ранее, обычно время осреднения жестко задано в техническом задании и не подлежит свободному выбору. Однако начальное угловое положение ПГ и задаваемая угловая скорость вращения ПГ, при которых необходимо проверять отработку средней угловой скорости вращения ПГ, могут быть определены на этапе выпуска конструкторской документации на изделие и скорректированы по результатам автономно-отработочных испытаний.

Обобщая результаты исследований, можно предложить методику снижения погрешности измерения средней угловой скорости вращения ПГ посредством выбора оптимальных параметров начального углового положения ПГ и его задаваемой угловой скорости вращения. Критерием оптимума будет $\delta\omega \rightarrow 0$.

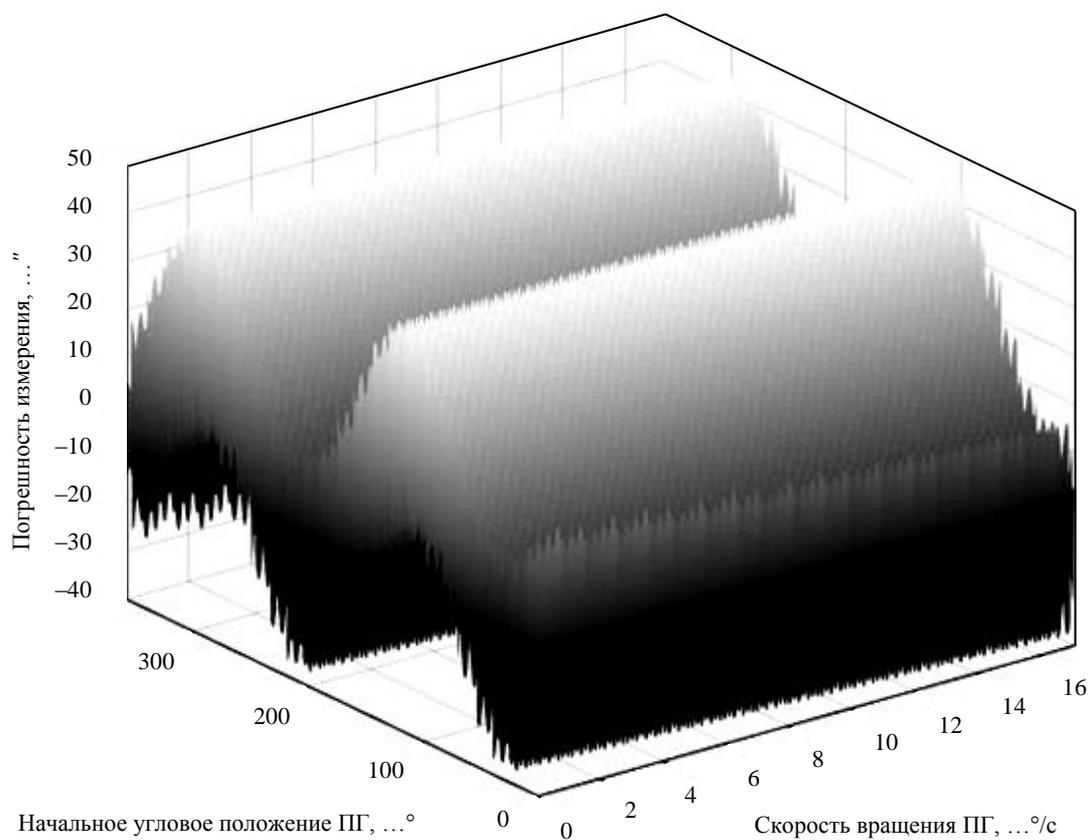


Рис. 5

На первом шаге необходимо определить зависимость погрешности измерения углового положения от углового положения на одном механическом обороте ПГ.

На втором шаге следует провести Фурье-анализ полученной зависимости и определить номера гармоник, их амплитуду и начальную фазу, оказывающие наибольшее влияние на значение погрешности измерения углового положения.

На третьем шаге требуется установить зависимость (зависимости) погрешности измерения средней угловой скорости вращения от времени осреднения, угловой скорости вращения и начального углового положения (с учетом того, что все значения аргументов можно варьировать, исходя из предъявленных к разрабатываемому изделию требований).

Завершающим шагом станет выбор конкретных значений времени осреднения, угловой скорости вращения и начального углового положения, при которых обеспечивается минимальное значение погрешности измерения средней угловой скорости вращения.

Необходимо отметить, что предложенная методика может быть применена для любого электропривода, в состав которого включен датчик углового положения, погрешность измерения которого может быть разбита на систематические гармонические составляющие.

В перспективе предполагается дополнение предложенной методики вероятностными оценками источников погрешностей ИЭП SGK и методов обработки, а также анализом погрешностей как случайных функций по обобщенной характеристике плотности вероятности распределения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фабио Ю. Т., Бруно А. А. Надежное нелинейное управление, применяемое к гироскопу контрольного момента с конфигурацией SISO // IFAC PapersOnLine. 2018. Т. 51, № 25. С. 152–157.

2. Экспериментальная проверка системы управления ориентацией для маневренного космического корабля / А. Корниенко, Дж. Рибер, Т. Отт, Р. Гешниджани, В. Фихтер, Дж. Форшоу, Г. Аглиетти // IFAC PapersOnLine. 2016. Т. 49, № 17. С. 158–163.

3. Гешниджани Р., Корниенко А., Фихтер В. Подход к управлению на основе углового момента для гироскопов с контрольным моментом // IFAC PapersOnLine. 2016. Т. 49, № 17. С. 141–145.

4. Положенцев Д. С., Смирнов К. А. Система управления исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2019. № 8. С. 31–38.

5. Проектирование исполнительного электропривода силового гироскопического комплекса с повышенными требованиями по обеспечению заданных скоростей вращения / Д. С. Положенцев, А. А. Давыдов, М. Г. Шипов, Е. П. Казаков, Б. И. Малых // Вестн. Самарского ун-та. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2020. Т. 19, № 3. С. 31–38.

6. Якимовский Д. О., Положенцев Д. С., Джукич Д. Й. Исполнительный электропривод перспективного силового гироскопического комплекса // Докл. ТУСУР. 2018. № 3. С. 103–108.

7. Овсянников Е. М., Цаценкин В. К. Следящий электропривод с малым передаточным числом редукто-

ра для систем наведения // Электротехника. 2000. № 2. С. 50–54.

8. Садовников М. А. Измерение скорости движения силового электропривода с помощью оптических датчиков угла // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51, № 6. С. 52–57.

9. Ахметжанов А. А., Лукиных Н. В. Индукционный редуктосин. М.: Энергия, 1971.

10. Разработка и калибровка преобразователей угла с микропроцессорной автокоррекцией / В. Д. Аксененко, О. К. Епифанов, Д. П. Лукьянов и др. // Гироскопия и навигация. 2005. № 4 (51). С. 72–82.

11. Кравченко Н. С., Ревинская О. Г. Методы обработки результатов измерений и оценки погрешностей в учебном лабораторном практикуме: учеб. пособие. Томск: Изд-во Томского политех. ун-та, 2011.

12. Фридман А. Э. Основы метрологии. Современный курс. СПб.: Проффессионал, 2008.

13. Привалов А. А., Руфицкий М. В. Повышение точности измерения временных интервалов средней и большой длительности электронными средствами на базе ПЛИС // Изв. ТРТУ. 2000. № 3 (17). С. 108–111.

14. Оптимизация скорости многосеточной сходимости на частично структурированных сетках с помощью локального анализа Фурье / Б. Гмайнер, Т. Градл, Ф. Гаспар, У. Рюде // Компьютеры и математика с приложениями. 2013. Т. 65, № 4. С. 694–711.

15. Ву Г., Хусейн А., Чжун Ю. Реконструкция и параметризация трехмерной драпировки на основе видео со смартфона и эллиптического анализа Фурье // Процедуры информатики. 2017. Т. 108. Р. 1552–1561.

R. I. Solnitsev, E. P. Kazakov
Saint Petersburg Electrotechnical University

D. S. Polozhentsev
Saint Petersburg State University of Aerospace Instrumentation

THE METHODOLOGY FOR DECREASING THE MEASUREMENT ERROR OF THE MEAN ANGULAR ROTATION VELOCITY OF CONTROL MOMENT GYROSCOPE GYROMOTOR SUSPENSION

The assessment of angular rotation velocity of control moment gyroscope gyromotor suspension is a challenging technical task made even more complicated by the necessity to carry out a significant number of process checks at different lifecycle stages. To develop a methodology for decreasing the measurement error of the angular rotation velocity of control moment gyroscope gyromotor suspension that would enable the engineers to take into account the effect of systematic harmonics of angle sensor error. The dependency of the measurement error of the mean angular rotation velocity of gyromotor suspension on its actual rotation velocity and initial angular position was established. This article presents an assessment of the measurement error of the mean angular rotation velocity based on the data received from the angular position sensor of an actual control moment gyroscope. A methodology is offered for decreasing the measurement error of the mean angular rotation velocity of gyromotor suspension by selecting a set of optimal initial angular position and specified angular rotation velocity parameters. The results received in the course of the research can be applied to decrease the measurement error of the angular rotation velocity of control moment gyroscope gyromotor suspension at different lifecycle stages. The presented methodology can be applied to assess the measurement error of the mean angular rotation velocity of any electric drive that includes an angular sensor for which it is possible to divide its angular position measurement error into systematic harmonics.

Control moment gyroscope, electric drive, angular rotation velocity, measurement error of angular rotation velocity, induction angle sensor, measurement error of angular position

УДК 519.7+681.51

Т. Л. Качанова, Б. Ф. Фомин, О. Б. Фомин
*Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)*

Информационный ресурс знания об открытых системах (аналитический обзор)

Открытые системы заданы эмпирическими описаниями, полученными из больших массивов полимодальных гетерогенных данных. Система с сотнями и тысячами показателей исходно представлена как «система в данных» и как «система в отношениях». Систему, представленную в таких форматах, детально характеризуют ее эмпирический, статистический и структурный портреты. Система в данных, система в отношениях, эмпирический, статистический и структурный портреты системы, взятые вместе, образуют исходный эмпирический контекст системы. Физика систем на основе эмпирического контекста реализует процесс познания, научного понимания и рационального объяснения онтологии открытой системы. Правильность, полнота и завершенность онтологического знания оцениваются в результате исследования его аксиологии и создания ресурсов знания о системе. Информационный ресурс знания характеризует систему как оформленный эмпирический факт. Интеллектуальный, когнитивный и технологический ресурсы знания характеризуют систему как оформленный, понятый, воплощенный смысл и оценивают степень научного понимания и рационального объяснения онтологии системы. Статья посвящена информационному ресурсу, его роли и значимости в процессе познания, понимания и объяснения онтологии, анализе ценности (правильности, завершенности, полноты) полученного знания об онтологии системы, важности требований полноты и представительности исходного эмпирического контекста системы.

Физика открытых систем, ресурсы системного знания, знание об онтологии систем, познание онтологии систем, научное понимание онтологии систем, рациональное объяснение онтологии систем, ценность знания об онтологии систем

Видение системы. Физика открытых систем (ФОС) изучает природные, общественные, антропогенные, киберфизические и сложные технические открытые системы, исходно заданные эм-
