

Д. Г. ГРЯЗИН, М. Д. КУДРЯВЦЕВ

МЕТОД СРАВНЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДВУХ СОПОСТАВИМЫХ ПО ТОЧНОСТИ УГЛОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ, ИСПОЛЪЗУЕМЫХ ПРИ ИСПЫТАНИЯХ НАВИГАЦИОННОЙ АППАРАТУРЫ

Рассмотрена задача предварительного оценивания уровня динамических погрешностей углоизмерительного устройства в условиях отсутствия доступных эталонов для динамических измерений углов и угловых скоростей требуемого уровня точности. Предложен метод ее решения на основе сравнения с близким по статической точности устройством. Полученные результаты проиллюстрированы на примере исследования стенда Acutronic типа AC3367-TCC и стенда бесконтактного измерения углового положения объекта.

Введение

Калибровка гироскопических приборов непосредственно связана с использованием испытательных поворотных стендов. Такие стенды выпускаются серийно или специально разрабатываются для оценивания отдельных характеристик приборов [1–3].

Как правило, испытуемый датчик или прибор устанавливается на платформу стенда, которая совершает вращательные или угловые колебательные движения в одной или нескольких плоскостях. Положение платформы определяется с помощью штатных датчиков угла стенда, имеющих погрешность в статическом режиме от 1" до единиц угловых минут. Следует отметить, что испытания приборов могут проводиться как на постоянных угловых скоростях – до 3000°/с, так и на переменных – до 100°/с, возникающих при угловых колебаниях с амплитудами до 30° и частотами до 10 Гц. При этом масса испытуемых приборов может достигать до 200 кг. В связи с этим информация от штатных датчиков, размещенных на осях вращения платформы стенда, может не соответствовать действительному угловому положению платформы по причине недостаточной жёсткости конструкции испытательного стенда и инерционных свойств указанных датчиков. Ориентировочные расчеты показывают, что подобная динамическая погрешность может достигать десятков угловых секунд. В настоящее время методы оценивания данной погрешности для поворотных стендов не получили должного развития в отличие от общих методов, подробно изложенных в ряде работ [4–6] и нормативных документов [7, 8]. Одновременно с этим в документации производителей стендов характеристики динамической погрешности по углу и угловой скорости либо отсутствуют вообще, либо представлены не в полной мере.

Грязин Дмитрий Геннадиевич. Доктор технических наук, главный метролог – начальник отдела ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург). Действительный член Международной общественной организации «Академия навигации и управления движением».

Кудрявцев Михаил Дмитриевич. Кандидат технических наук, старший научный сотрудник ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор».

Следует отметить и тот факт, что согласно требованиям нормативных документов [9, 10] аттестация испытательного оборудования должна производиться с помощью независимых внешних средств, никак не связанных со штатными датчиками аттестуемого стенда. В связи с этим для решения задач аттестации испытательного оборудования, имитирующего качку, получили распространение методы на основе резистивных, магнитных, индуктивных, емкостных датчиков [11, 12], к которым помимо точностных требований предъявляется также и требование мобильности. В то же время при аттестации высокоточного испытательного оборудования с абсолютной погрешностью углового позиционирования на уровне 1" зачастую недоступны мобильные эталоны переменного угла и угловой скорости соответствующего уровня точности. В этом случае представляется целесообразным применять оптические методы измерений на основе автоколлиматоров, теодолитов, тахеометров и аналогичных им по принципу действия устройств. Однако эти приборы наряду со своей высокой точностью имеют диапазон измерений углов, ограниченный их полем зрения, т.е. менее 1°. Для его расширения требуется разработка и применение косвенных методов измерений, например основанных на использовании плоских зеркал достаточной протяженности с нормированным отклонением от плоскостности. Альтернативой этому является создание конструктивно обособленных специализированных оптических систем, имеющих при сохранении высокой точности диапазон измерений углов в несколько десятков градусов.

Постановка задачи и выбор моделей входных сигналов

Рассмотрим задачу сравнения метрологических характеристик двух устройств, независимо измеряющих угол поворота платформы и имеющих одинаковый уровень статической точности, в целях исследования и сопоставления между собой их динамических погрешностей. При этом отсутствие внешнего эталонного прибора для измерения угла поворота платформы в динамическом режиме делает затруднительным количественное оценивание динамических погрешностей платформы, воспроизводящей колебания с разными частотами и амплитудами. В связи с этим ограничимся предварительными исследованиями, позволяющими оценить отличие известной статической погрешности от динамической. Очевидно также, что отсутствие эталонного устройства обуславливает необходимость применения косвенных методов при сравнении устройств различных конструкций и принципов действия. При этом метод сравнения должен быть основан на выборе соответствующих моделей входных сигналов и моделей погрешностей регистрируемых первичных данных, которые следует адаптировать к динамическому режиму функционирования сравниваемых устройств, а также на изучении особенностей применяемых алгоритмов обработки первичных данных [13, 14].

Предположим, что имеется два конструктивно обособленных *углоизмерительных устройства* (УУ), аттестованных в статическом режиме на сопоставимом уровне точности, посредством которых возможен контроль углового положения движущейся платформы, причем одно из УУ является внешним (по отношению к платформе), а второе – ее штатным датчиком угла. Каждое из указанных УУ выполняет автоматическую регистрацию на электронный носитель (в файл протокола измерений) текущего углового положения платформы с частотами опроса F_1 и F_2 соответственно. При этом подсистема движения плат-

формы имеет возможность осуществлять ее поворот на угол α согласно заданному закону $\alpha = \alpha(t)$ как функции текущего времени t . Будем считать также, что спектр качки платформы ограничен ее инерционными свойствами. Из этого следует, что при нахождении оценок полных динамических характеристик УУ нельзя применять прямые методы, предполагающие воздействие на исследуемое средство измерений входного сигнала, который с достаточной точностью можно считать ступенчатым или δ -импульсом ([4, 7]).

Для решения поставленной задачи придадим платформе синусоидальные угловые колебания вида: $\alpha(t) = A \sin(2\pi t/T)$ при различных сочетаниях заданных значений амплитуды $A \in \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ и периода $T \in \{T_1, T_2, \dots, T_m\}$. При этом ограничимся диапазоном угловых колебаний $\pm 30^\circ$ при периодах не менее 0,1 с. Таким образом, во время исследований в текущем режиме колебаний от каждого УУ на запись поступают пары значений $\{\alpha_i^{(k)}, t_i^{(k)}\}$ углов $\alpha_i^{(k)}$ и соответствующих им моментов времени $t_i^{(k)}$, где i – номер дискретного отсчета, $k = 1, 2$ – номер УУ. Синхронизация записи двух УУ предполагается достаточно грубой, допускающей наличие сдвига Δt моментов начала отсчета относительных шкал времени двух реализаций при условии, что $|\Delta t| < T/2$.

Длительность промежутка времени испытаний $t_{\text{исп}}$ определяется текущим периодом колебаний T и наименьшей из двух частот опроса $F_{\min} = \min(F_1, F_2)$. При этом можно рекомендовать следующее правило выбора данного параметра. Если количество отсчетов на период более медленного УУ приближается к двум (т.е. период T оказался одного порядка с критическим периодом $1/2F_{\min}$), то устанавливаем $t_{\text{исп}} \approx (30 \div 100)T$. Если же период T значительно больше указанного критического значения, то устанавливаем $t_{\text{исп}} \approx (10 \div 30)T$. Следует отметить также, что допускается выбор периода колебаний T , меньшего, чем указанный критический период (но при условии, что $T > 1/2F_{\max}$) в силу того, что зарегистрированные двумя УУ данные будут обрабатываться совместно.

Допустим также, что качание платформы происходит относительно некоторого среднего углового положения α_0 (условного нуля). Кроме того, начальный момент шкалы времени не фиксирован, а значит, для привязки к указанному условному нулю требуется учитывать сдвиг шкалы t_0 ($|t_0| < T/2$). Таким образом, входные сигналы УУ принадлежат к следующему функциональному семейству:

$$f_0(t) = f_0(t, A, T, t_0, \alpha_0) = \alpha_0 + A \cdot \sin[2\pi(t - t_0)/T]. \quad (1)$$

Реальное угловое движение платформы будет не вполне соответствовать точному синусоидальному сигналу (1), а степень его отличия заранее неизвестна. Однако при условии сбалансированности качающейся платформы и, как следствие, пренебрежимой малости ее упругих деформаций, этот реальный входной сигнал будет одинаков для каждого из двух УУ, что дает основу для извлечения информации о динамических свойствах данных устройств.

Выбор моделей погрешностей первичных данных

Представим реальный входной сигнал, который формируется с некоторыми искажениями по сравнению с (1)

$$f_r(t) = f_0(t) + \varepsilon_0(t) = f_0(t) + \xi_0(t) + \mu_0(t), \quad (2)$$

где $f_0(t)$ – модельный входной сигнал (1); $\varepsilon_0(t)$ – искажение (полная погрешность формирования) входного сигнала; $\xi_0(t)$ – случайная составляющая погрешности $\varepsilon_0(t)$; $\mu_0(t)$ – систематическая составляющая погрешности $\varepsilon_0(t)$.

Следует обратить внимание, что составляющие погрешности в (2) понимаются в соответствии с терминологией, принятой в метрологии [4, 13], которая несколько отличается от традиционно используемой в навигационной практике. В том числе случайная составляющая $\xi_0(t)$ интерпретируется как высокочастотная часть полной погрешности $\varepsilon_0(t)$, а систематическая $\mu_0(t)$ – как низкочастотная. При этом необходимо учесть, что разбиение полной погрешности на указанные составляющие в определенной степени носит условный характер. Следовательно, для теоретического выделения составляющей $\mu_0(t)$ допустимо применить к полной погрешности какую-либо сглаживающую фильтрацию, например процедуру скользящего среднего с подходящей полушириной окна усреднения τ , а составляющую $\xi_0(t)$ считать равной соответствующему остатку:

$$\mu_0(t) = \frac{1}{2\tau} \int_{t-\tau}^{t+\tau} \varepsilon_0(s) ds, \quad \xi_0(t) = \varepsilon_0(t) - \mu_0(t). \quad (3)$$

Предполагается, что априорная информация о составляющих (3) либо отсутствует, либо ограничена расчетными оценками их спектров $S[\xi_0(t)]$, $S[\mu_0(t)]$, полученными путем анализа конструкции платформы. Кроме того, полная погрешность и ее составляющие зависят от параметров входного сигнала (1), среди которых в первую очередь следует выделить амплитуду A и период T :

$$\varepsilon_0(t) = \varepsilon_0(t; A, T), \quad \xi_0(t) = \xi_0(t; A, T), \quad \mu_0(t) = \mu_0(t; A, T). \quad (4)$$

Модели погрешностей выходных сигналов аналогично (2) можно представить в следующем общем виде:

$$\begin{aligned} \text{первое УУ: } f_{n1}(t) &= f_r(t) + \varepsilon_1(t) = f_r(t) + \xi_1(t) + \mu_1(t), \\ \text{второе УУ: } f_{n2}(t) &= f_r(t) + \varepsilon_2(t) = f_r(t) + \xi_2(t) + \mu_2(t), \end{aligned} \quad (5)$$

где $f_r(t)$ – реальный входной сигнал (2); $\varepsilon_k(t)$ – полная инструментальная погрешность k -го УУ ($k = 1, 2$); $\xi_k(t)$ – случайная составляющая погрешности $\varepsilon_k(t)$; $\mu_k(t)$ – систематическая составляющая погрешности $\varepsilon_k(t)$.

Аналогично (4) полная погрешность каждого УУ и ее составляющие будут зависеть от A и T . Соответствующие части полных погрешностей двух УУ, вид которых как функций времени изменяется по мере изменения амплитуды A и периода T входного сигнала, являются искомыми динамическими погрешностями, которые мы и хотим сопоставить между собой.

Далее, учитывая выражение (2), для выполнения последующей обработки запишем зарегистрированные сигналы (5):

$$\begin{aligned} \text{первое УУ: } f_{n1}(t) &= f_0(t) + [\varepsilon_1(t) + \varepsilon_0(t)] = f_0(t) + \tilde{\varepsilon}_1(t), \\ \text{второе УУ: } f_{n2}(t) &= f_0(t) + [\varepsilon_2(t) + \varepsilon_0(t)] = f_0(t) + \tilde{\varepsilon}_2(t), \end{aligned} \quad (6)$$

где $f_0(t)$ – модельный входной сигнал (1); $\tilde{\varepsilon}_k(t) = \varepsilon_k(t) + \varepsilon_0(t)$ – погрешность k -го УУ, приведенная к сигналу $f_0(t)$.

Таким образом, если выполнить аппроксимацию зарегистрированных сигналов (6) модельной синусоидой $f_0(t)$, единой для обоих сигналов, то появляется возможность оценить погрешности $\tilde{\varepsilon}_k(t)$. При этом в силу соотношения

$$\varepsilon_1(t) - \varepsilon_2(t) = \tilde{\varepsilon}_1(t) - \tilde{\varepsilon}_2(t), \quad (7)$$

которое имеет место независимо от искажений $\varepsilon_0(t)$, вносимых во входной сигнал $f_0(t)$, мы всегда можем получить непосредственные оценки разности динамических погрешностей двух рассматриваемых УУ, включая оценки любых характеристик этих разностей. Сопоставляя их с оценками характеристик приве-

денных погрешностей $\tilde{\varepsilon}_k(t)$, можно оценить интересующее нас в конечном итоге соотношение уровней динамических погрешностей двух УУ. Кроме того, можно извлечь начальную информацию и о полной погрешности $\varepsilon_0(t)$ путем сравнения оценок амплитуды и периода, соответствующих полученной оптимальной синусоиде, с заданными значениями A и T .

Алгоритмы обработки данных

На основе рассмотренных моделей входных сигналов (1) и погрешностей данных (6), а также в связи с отказом от требования точной синхронности входных сигналов для двух УУ, выходные дискретные сигналы $\{\alpha_i^{(1)}\}$ и $\{\alpha_j^{(2)}\}$, регистрируемые двумя УУ, могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} \alpha_i^{(1)} = f_{n1}(t_i^{(1)}) = a_1^{(1)} + a_2 \sin(2\pi a_3 t_i^{(1)} + a_4^{(1)}) & (i = 1, 2, \dots, N^{(1)}), \\ \alpha_j^{(2)} = f_{n2}(t_j^{(2)}) = a_1^{(2)} + a_2 \sin(2\pi a_3 t_j^{(2)} + a_4^{(2)}) & (j = 1, 2, \dots, N^{(2)}), \end{cases} \quad (8)$$

где $t_i^{(k)}$ – относительные моменты времени регистрации сигнала k -м УУ ($k=1, 2$); $N^{(k)}$ – длины дискретных реализаций (могут различаться для двух УУ вследствие несовпадения их частот опроса F_1 и F_2); $a_1^{(k)}$ – средние уровни регистрируемых колебаний платформы (могут различаться для двух УУ); a_2 – амплитуда колебаний (основной искомый параметр, единый для двух УУ); a_3 – частота колебаний (единая для двух УУ); $a_4^{(k)}$ – фазы регистрируемых сигналов (могут различаться для двух УУ, поскольку допускается несовпадение начальных точек шкал времени УУ в пределах до полупериода колебаний). Заметим также, что в уравнениях системы (8) не отражены погрешности $\tilde{\varepsilon}_1(t_i^{(1)})$ и $\tilde{\varepsilon}_2(t_j^{(2)})$.

Следовательно, решаемая задача оптимальной аппроксимации двух несинхронных дискретных сигналов одной общей синусоидой свелась к решению избыточной системы из $N^{(1)}+N^{(2)}$ уравнений (8) с шестью неизвестными $\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_2, a_3, a_4^{(1)}, a_4^{(2)}\}$, причем по трем последним неизвестным данная система является нелинейной. При этом имеется следующая особенность: полная совокупность регистрируемых моментов времени $\{t_i^{(1)}, t_j^{(2)}\}$ не является равномерной, так как частоты опроса F_1 и F_2 не предполагаются равными.

Поскольку УУ сопоставимы по статической точности, то в условиях отсутствия априорной информации о соотношении уровней их динамической точности в основу поиска решения системы (8) положим следующий критерий:

$$\sum_i [\alpha_i^{(1)} - a_1^{(1)} - a_2 \sin(2\pi a_3 t_i^{(1)} + a_4^{(1)})]^2 + \sum_j [\alpha_j^{(2)} - a_1^{(2)} - a_2 \sin(2\pi a_3 t_j^{(2)} + a_4^{(2)})]^2 \rightarrow \min. \quad (9)$$

Как известно, для решения нелинейных избыточных систем, подобных (8), в соответствии с критерием оптимальности (9) обычно используют итерационную схему, основанную либо на стандартном *методе наименьших квадратов* (МНК), применяемом к предварительно линеаризованной в окрестности некоторого начального приближения искомых параметров системе (с последующим его пересчетом), либо на различных обобщениях МНК в сочетании с градиентными методами (например, методом наискорейшего спуска), в том числе и с использованием параметра регуляризации [15]. Сходимость итераций при использовании обоих указанных подходов сильно зависит от начального приближения, правильный выбор которого не всегда удается формализовать. При неудачном выборе начального приближения скорость сходимости может существенно замедлиться, вплоть до остановки итерационного процесса вследствие

его зацикливания. В общем случае существует также риск нахождения не глобального, а локального минимума [15]. Следует особо подчеркнуть, что применение МНК в данном контексте имеет не столько вычислительную, сколько стохастическую направленность, наиболее полно развитую в работах акад. А. Н. Колмогорова [16] и акад. Ю. В. Линника [17], позволяющую выполнить полный анализ погрешностей измерений. Кроме того, если зарегистрированные дискретные сигналы содержат резко выделяющиеся данные (выбросы), то для их корректного учета вместо описанных выше разновидностей МНК может потребоваться применение других методов, обладающих существенно большей робастностью. К их числу можно отнести *метод наименьших модулей* (МНМ) [18], а также различные варианты МНК с усечением сомнительных данных или со сглаживающей фильтрацией [19], основанные по сравнению с (9) на видеоизмененных критериях оптимальности.

Учитывая сказанное, для эффективного нахождения аппроксимирующего сигнала рассматриваемого вида (1) предлагается следующая процедура выбора начальных приближений его параметров. Для средних уровней сигнала $a_1^{(1)}$, $a_1^{(2)}$ и амплитуды a_2 за начальные приближения следует взять полусумму и полуразмах усредненных локальных максимумов/минимумов двух зарегистрированных реализаций сигналов, вычисленных по полным реализациям $\{\alpha_i^{(1)}\}$ и $\{\alpha_i^{(2)}\}$. При этом усреднение следует выполнять с отбрасыванием некоторой доли экстремальных значений на уровне 1–10%, который должен уточняться в зависимости от наличия и количества выбросов.

Особо тщательно следует выбирать начальное приближение частоты a_3 , что предлагается осуществлять в следующем порядке. На первом шаге по каждой из двух реализаций определяют моменты времени пересечения сигналом полученной выше начальной оценки среднего уровня $a_1^{(k)}$ ($k=1, 2$) на основе линейной интерполяции двух ближайших к нему значений сигнала, не достигающих и превышающих указанный уровень. На втором шаге вычисляют скользящие оценки длительности полупериодов как разности найденных соседних моментов времени пересечения сигналом среднего уровня. На третьем шаге на основе усреднения полупериодов получают частные оценки частоты a_3 колебаний (для каждой из двух реализаций). При этом четные/нечетные полупериоды усредняют по отдельности, а по 10 % самых больших и самых малых значений отбрасывают. На четвертом шаге за начальное приближение частоты a_3 колебаний принимают взвешенное среднее двух полученных на предыдущем шаге частных оценок с весами $N^{(1)}/(N^{(1)}+N^{(2)})$ и $N^{(2)}/(N^{(1)}+N^{(2)})$ соответственно, с учетом того, что оба УУ обладают статической точностью одного уровня.

Следует обратить внимание, что такой достаточно сложный порядок выбора начального приближения частоты обусловлен главным образом тем, что большинство распространенных оценок этого параметра обладают следующим существенным недостатком. Например, часто применяемое в подобных случаях быстрое преобразование Фурье дает целочисленную оценку несущей частоты в ее дискретах, обратных дискретам времени. Тем самым получаем смещенную оценку, что особенно заметно при малом числе отсчетов на период. Подобным дефектом обладают и другие часто применяемые алгоритмы (например, основанных на моментах достижения сигналом максимума). Как следствие, из-за указанного смещения начального приближения частоты аппроксимирующая синусоида оказывается рассогласованной с исходными данными. Это приведет к появлению «биения» разностного сигнала и к неконтролируемым погрешно-

стям оценок основных параметров (как минимум – к потере оптимальности алгоритма, а в ряде случаев – даже к его «срыву»).

В то же время предложенный алгоритм оценивания частоты (периода) обладает целым рядом факторов, характеризующих его повышенную устойчивость к возможным искажениям входного сигнала, а именно:

- построение оценки через усреднение полупериодов в пределах полной реализации сигнала никоим образом не может привести к ее заметному смещению;
- возможный вертикальный сдвиг условного нуля сигнала приведет к некоторому уменьшению (либо увеличению) четных полупериодов и одновременно к точно такому же по величине, но противоположному по знаку изменению нечетных полупериодов, что приведёт к компенсации сдвига после усреднения;
- разброс полупериодов позволяет оценить точность данной оценки;
- алгоритм нечувствителен к погрешностям датирования, возникающим при непостоянном приращении времени между моментами считывания сигнала;
- алгоритм применим к сигналам, начиная с двух отсчетов на период.

И наконец, начальные приближения фаз $a_4^{(k)}$ ($k=1, 2$) вычисляются по нескольким начальным точкам каждой из двух реализаций на основе уже полученных приближений трех параметров $\{a_1^{(k)}, a_2, a_3\}$, а также значений каждой реализации $\alpha_i^{(k)}$ в начальные моменты времени $t = t_i^{(1)}$ и $t = t_j^{(2)}$ ($i, j \leq 5$). Можно показать, что такие начальные приближения указанных шести параметров позволяют за малое число итераций вычислить их оптимальные МНК-оценки [15].

Отметим также, что с учетом особенностей гармонических функций, выбранных нами в качестве входных сигналов, имеется возможность повышения достоверности оценок их параметров. Для этого следует дополнительно применить альтернативный алгоритм обработки первичных данных [15], основанный на следующей нелинейной репараметризации сигналов вида (1):

$$f_0(t) = f_0(t; A_1, A_2, \alpha_0, T) = \alpha_0 + A_1 \cdot \sin(2\pi t/T) + A_2 \cdot \cos(2\pi t/T), \quad (10)$$

где $A_1 = A \cdot \cos(2\pi t_0/T)$; $A_2 = -A \cdot \sin(2\pi t_0/T)$, причем каждый из параметров $\{A_1, A_2\}$ может иметь отрицательный знак.

Обратное преобразование имеет вид: $A = \sqrt{A_1^2 + A_2^2}$; $t_0 = (T/2\pi) \cdot \arctg(-A_2/A_1)$. Таким образом, сигнал (1) оказывается линейно параметризованным по трем параметрам $\{A_1, A_2, \alpha_0\}$ из четырех. Соответственно, эти параметры допускают стандартное одношаговое МНК-оценивание [15]. Остается нелинейность только по периоду T , который, как показано выше в ходе выбора начального приближения частоты a_3 , допускает предварительное (до применения МНК) эмпирическое несмещенное и устойчивое оценивание, если путем правильного выбора длительности $t_{\text{исп.}}$ обеспечена достаточная длина реализаций $N^{(1)}$, $N^{(2)}$. При этом, как нетрудно видеть, допущение о возможном различии фаз двух выходных сигналов (8) не является препятствием для их совместной линейаризации указанным способом (если период T уже известен).

Отметим также, что приведенные погрешности (точнее, их конкретные реализации $\{\tilde{\epsilon}_1(t_i^{(1)})\}$ и $\{\tilde{\epsilon}_2(t_j^{(1)})\}$) могут быть вычислены как невязки уравнений системы (8) при подстановке в них найденных МНК-оценок параметров $\{a_1^{(1)}, a_1^{(2)}, a_2, a_3, a_4^{(1)}, a_4^{(2)}\}$. При этом разность полученных оценок фаз $a_4^{(1)}$, $a_4^{(2)}$ двух УУ позволяет найти взаимный сдвиг Δt их относительных шкал времени и, тем самым, выполнить точную синхронизацию зарегистрированных сигналов и их погрешностей.

Кроме того, ввиду значительной избыточности исходных данных вычислительный алгоритм МНК позволяет также получить для каждой из двух реализаций достоверные показатели точности. В их число входят оценки интегральной дисперсии $\sigma_k^2 = \sigma^2[\tilde{\varepsilon}_k(t)]$ приведенных погрешностей $\tilde{\varepsilon}_k(t)$ двух УУ, а также матрица ковариаций полученных МНК-оценок параметров, причем можно найти также и их зависимости от амплитуды A и частоты F входного сигнала. Сопоставляя между собой оценки интегральных дисперсий σ_1^2 и σ_2^2 для двух УУ, мы можем проверить положенное в основу критерия (9) предположение об одинаковом уровне точности УУ. А именно, если указанные дисперсии существенно различаются (более чем вдвое), следует выполнить повторную обработку данных, используя вместо (9) взвешенный критерий:

$$(1/\sigma_1^2) \sum_i [\alpha_i^{(1)} - a_1^{(1)} - a_2 \sin(2\pi a_3 t_i^{(1)} + a_4^{(1)})]^2 + \\ + (1/\sigma_2^2) \sum_j [\alpha_j^{(2)} - a_1^{(2)} - a_2 \sin(2\pi a_3 t_j^{(2)} + a_4^{(2)})]^2 \rightarrow \min. \quad (11)$$

Для обратного перехода от приведенных погрешностей $\tilde{\varepsilon}_1(t)$, $\tilde{\varepsilon}_2(t)$ к собственным инструментальным погрешностям $\varepsilon_1(t)$, $\varepsilon_2(t)$ необходимо учесть, что второе из УУ является штатным датчиком угла платформы. Из этого следует, что силовой привод подсистемы управления ее движением «отрабатывает» не только собственно текущий угол поворота, но и погрешность штатного датчика, от которого поступает информация о текущем угловом положении платформы. Таким образом, в первом приближении искажения $\varepsilon_0(t)$, вносимые силовым приводом в синусоидальный сигнал в соответствии с (2), определяются переменными инструментальными погрешностями $\varepsilon_2(t)$ штатного датчика

$$\varepsilon_0(t) = \varepsilon_2(t) + \delta(t), \quad (12)$$

где $|\delta(t)| \ll \max(|\varepsilon_2(t)|)$, $0 \leq t \leq t_{\text{исп.}}$.

Из (12) следуют тождественные соотношения между приведенными (6) и собственными (5) погрешностями двух УУ:

$$\begin{cases} \varepsilon_1(t) = \tilde{\varepsilon}_1(t) - \tilde{\varepsilon}_2(t)/2 - \delta(t)/2 & \text{(погрешность внешнего УУ),} \\ \varepsilon_2(t) = \tilde{\varepsilon}_2(t)/2 - \delta(t)/2 & \text{(погрешность штатного датчика),} \\ \frac{\varepsilon_1(t)}{\varepsilon_2(t)} = 2 \frac{\tilde{\varepsilon}_1(t) - \delta(t)}{\tilde{\varepsilon}_2(t) - \delta(t)} - 1 & \text{(отношение погрешностей),} \\ \varepsilon_0(t) = \tilde{\varepsilon}_2(t)/2 + \delta(t)/2 & \text{(искажения входного сигнала).} \end{cases} \quad (13)$$

Таким образом, если можно пренебречь составляющей $\delta(t)$ либо имеется некоторая первичная информация о ее свойствах, то для погрешностей $\varepsilon_k(t)$ двух УУ и их отношения $\varepsilon_1(t)/\varepsilon_2(t)$ могут быть получены аналитические оценки, которые являются функциями синхронного времени t с формой, зависящей от основных параметров входного сигнала $\{A, F\}$. При этом главный интерес в контексте решаемой задачи представляет третье из выражений (13), которое может быть записано в виде

$$\frac{\varepsilon_1(t)}{\varepsilon_2(t)} \approx 2 \frac{\tilde{\varepsilon}_1(t)}{\tilde{\varepsilon}_2(t)} - 1 \quad (0 \leq t \leq t_{\text{исп.}}). \quad (14)$$

Тем самым достигается обозначенная цель сопоставления между собой уровней динамических погрешностей двух УУ в условиях отсутствия эталона требуемой точности. При этом следует иметь в виду, что в случае различия частот опроса F_1 и F_2 для реализации выражений (13) и (14) в дискретной форме потребуются переквантование одной из погрешностей $\tilde{\varepsilon}_k(t)$ по времени.

Практическая реализация разработанного метода

Предложенный формализованный подход был использован при исследовании динамических характеристик *стенда бесконтактного измерения углового положения* объекта (СБИУП), который был создан в СПбГЭТУ «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина) по заказу ОАО «Концерн «ЦНИИ «Электроприбор» (С.-Петербург) [20]. Данный стенд предназначен для контроля положения платформы, совершающей угловые перемещения или колебания относительно вертикальной оси с размахом не более 15° при условии, что удаленность стенда от указанной оси не превосходит 400 мм. В качестве основных характеристик точности данного стенда нормирован предел статической погрешности измеряемого углового положения контролируемого объекта, составляющий $0,5''$ (что подтверждено сертификатом ВНИИМ им. Д. И. Менделеева), а также предел относительной погрешности измерений постоянной угловой скорости $0,01\%$ при времени осреднения 10 мин. В качестве второго углоизмерительного устройства, был выбран штатный датчик поворотного стенда известной фирмы Acutronic [1], при этом последний выполнял и вторую функцию, поскольку его силовой привод задавал требуемые угловые колебания.

Следует особо подчеркнуть, что до проведения данных исследований практически отсутствовала какая-либо априорная информация о динамических погрешностях обоих стендов, в том числе отсутствовали перечни возможных источников указанных погрешностей и модели их формирования, что не позволило применить принятый при анализе точности навигационных систем общий подход на основе оптимальной фильтрации.

Таким образом, главной целью проведенных исследований было получение первичной информации о соотношении уровней и характере поведения динамических погрешностей двух рассмотренных стендов. Отметим также, что имеется ряд существенных различий в подходах к изучению навигационных и измерительных систем. Эти различия главным образом обусловлены тем, что первые предназначены для *выработки* параметров движения в процессе *управления* подвижными объектами с использованием *контура обратной связи* [21, 22]. В то же время одним из основных требований к измерительным системам является достижение тем или иным способом *пренебрежимо малого воздействия* на объект измерения [4, 13]. Сказанное касается и измерительных систем, входящих в состав испытательного оборудования, такого как рассматриваемый стенд Acutronic. Блок-схема СБИУП представлена на рис. 1.

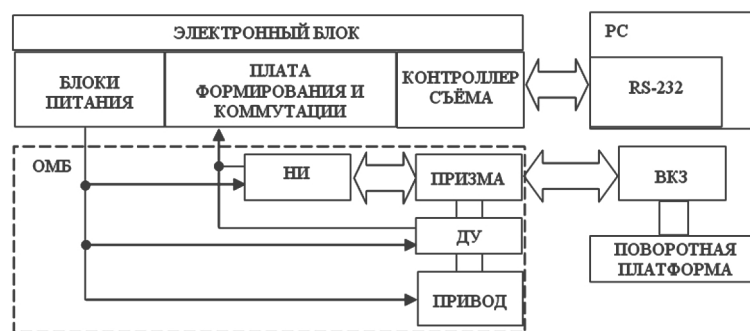


Рис.1. Блок-схема СБИУП

Данный стенд состоит из *оптико-механического блока* (ОМБ), управляющего электронного блока и *внешнего контрольного зеркала* (ВКЗ), которое уста-

навливают в центральной части контролируемой поворотной платформы с вертикальной осью вращения [20]. Электронный блок сопрягается по интерфейсу RS-232 с внешним компьютером (PC), на котором установлено соответствующее программное обеспечение.

Оптическая схема СБИУП, поясняющая принцип действия и составные части ОМБ, а также его расположение относительно поворотной платформы, показаны на рис. 2 [20]. В состав ОМБ входят нуль-индикатор (НИ), являющийся источником/приемником сканирующего лазерного излучения, вращаемая с помощью привода правильная восьмигранная призма и опорное зеркало. На оси привода установлен датчик угла (ДУ).

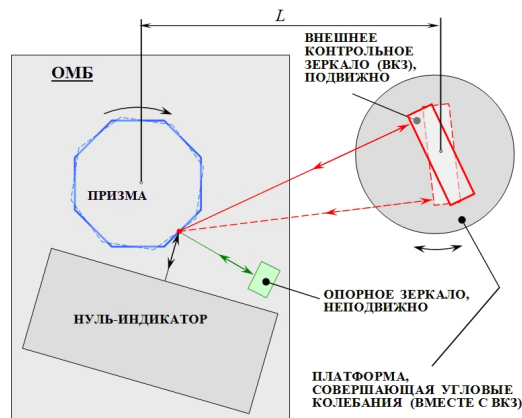


Рис. 2. Оптическая схема СБИУП (вид сверху)

Грани вращающейся призмы поочередно направляют сканирующий луч лазера в сторону ВКЗ, совершающего заданное угловое движение вместе с платформой. Отражаясь от граней призмы, сканирующий луч совершает пилообразные угловые колебания в горизонтальной плоскости. В основу работы СБИУП положен метод определения углового перемещения поворотной платформы (по выходному сигналу датчика угла (ДУ) на оси привода) за интервал между моментами времени, соответствующими регистрации световых импульсов от двух зеркал: внешнего контрольного и встроенного опорного. Регистрация приемником нуль-индикатора пары световых импульсов от контрольного и опорного зеркал составляет один такт измерения. Частота следования измерительных тактов определяется числом граней призмы и скоростью ее вращения, которая составляет около 2 об/с при нестабильности не более 1 % [20]. С учетом числа граней призмы и ее угловой скорости на приемник нуль-индикатора за 1 с поступает 16 пар световых импульсов от подвижного контрольного и неподвижного опорного зеркал. Это позволяет достичь частоты опроса 13–14 Гц.

Нетрудно видеть, что размах пилообразных колебаний сканирующего луча может доходить до удвоенного угла между нормальными к смежным граням призмы, который при 8 гранях равен 90° . При этом реальный размах меньше указанного значения, поскольку имеют место краевые эффекты: диаметр луча составляет около 3 мм при ширине грани 50 мм. Кроме того, опорное зеркало создает «тень», которая также уменьшает размах указанных колебаний.

Следует отметить, что ширина ВКЗ в указанной схеме определяет диапазон измеряемых углов колеблющейся платформы и составляет 175 мм. Такой выбор обусловлен тем, что ВКЗ должно «работать» различными своими участками в

зависимости от текущего угла поворота платформы, что показано на рис. 2. Это накладывает повышенные требования к качеству поверхности зеркала: отклонению от плоскостности, шероховатости и др.

Особенностью оптической схемы СБИУП является также требование ограничить расстояние L между осями вращения платформы и призмы (см. рис. 2), поскольку при его увеличении пропорционально уменьшается диапазон контролируемых угловых колебаний платформы. Штатный диапазон 15° гарантирован при $L = 400$ мм.

Для экспериментальных исследований был использован трехосный поворотный стенд Acutronic типа AC3367-TCC [1] в качестве второго устройства, осуществляющего задание и параллельную регистрацию угловых положений закрепленного на его планшайбе ВКЗ. Диаметр планшайбы D равен 660 мм, удаленность L оси ее вращения от блока ОМБ равна 700 мм, а ось вращения планшайбы (являющаяся внутренней осью стенда) была выставлена вертикально. Паспортные пределы погрешности позиционирования штатных датчиков угла на осях стенда Acutronic составляют $\pm 3''$ в диапазоне $0-360^\circ$ (в статическом режиме) при нестабильности задания угловой скорости $0,005\%$ в диапазоне от 10 до $50^\circ/\text{с}$. При этом моменты времени, регистрируемые в штатном протоколе одновременно с показаниями датчиков угла, задаются встроенным кварцевым генератором с нестабильностью не более 10^{-6} , а частота обмена по системной шине контроллера, управляющего работой приводов, составляет 2 кГц.

Блок-схема стенда Acutronic представлена на рис. 3.

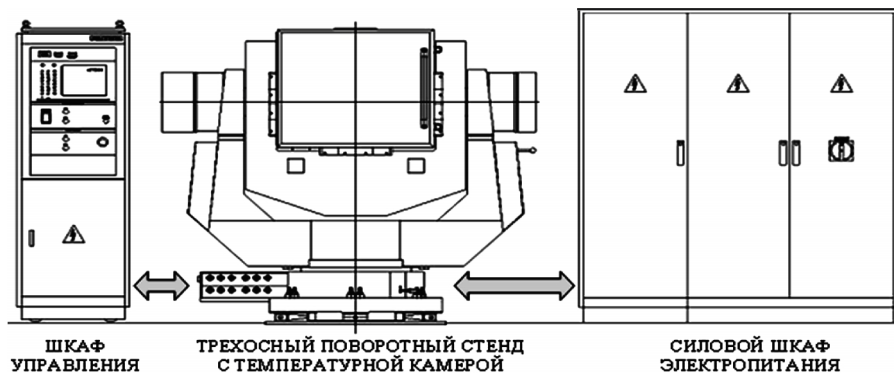


Рис. 3. Блок-схема стенда Acutronic типа AC3367-TCC

Следует также отметить, что в режимах вращения планшайбы стенда Acutronic с переменной угловой скоростью имеется два ограничения: на максимальную угловую скорость ($60^\circ/\text{с}$) и максимальное угловое ускорение ($200^\circ/\text{с}^2$), обусловленные необходимостью обеспечения безопасности конструкции.

Использование стенда Acutronic для выработки угловых колебаний предполагало, что данный стенд без установленного на него массивного оборудования является полностью сбалансированной механической системой с нормированной погрешностью углового позиционирования. При этом анализ данных, получаемых при ежегодной аттестации стенда Acutronic, позволяет предположить, что указанная погрешность имеет преимущественно систематический характер.

Для совместного изучения динамических погрешностей двух рассматриваемых стендов планшайба стенда Acutronic с закрепленным на ней ВКЗ поочередно совершала заданные синусоидальные колебания с амплитудами A от $0,5$ до $1,3^\circ$ и частотами F от $0,1$ до 4 Гц (в различных сочетаниях). Частота съема ин-

формации для стендов СБИУП и Acutronic равнялась $F_1 = 13$ Гц и $F_2 = 100$ Гц соответственно при длительности $t_{\text{исп.}}$ каждой пары реализаций от 80 до 105 с. Синхронизация шкал времени двух стендов выполнялась вручную путем одновременного запуска их систем регистрации (по команде оператора). При этом отсутствовали какие-либо управляющие связи между стендами, вследствие чего имела место полная взаимная независимость параллельной регистрации, осуществляемой каждым из стендов.

Совместная обработка полученных массивов данных по описанным в первой части статьи алгоритмам позволила получить предварительные оценки динамических погрешностей стендов СБИУП и Acutronic как функций времени, причем было выявлено их существенное различие по величине (до двух порядков), и по характеру поведения. Кроме того, особенности поведения указанных массивов данных потребовали разработки и применения двух дополнительных алгоритмов их обработки: а) оценивания уровня стабильности шкал времени каждого из стендов, составившего 0,05–0,3 % для СБИУП и 0,0001–0,001 % для Acutronic; б) обнаружения и соответствующей сглаживающей фильтрации одиночных и сдвоенных выбросов, которые имели место в отсчетах по СБИУП на уровне от 100" до 2,4°.

Следует особо подчеркнуть, что полученные оценки носят ориентировочный характер, поскольку лежащее в их основе соотношение (14) принято, во-первых, исходя из 20-кратного превышения частоты обмена по системной шине контроллера силового привода стенда Acutronic над частотой съема данных, а во-вторых – с учетом бесспорно лидирующих позиций фирмы Acutronic на мировом рынке производителей подобного испытательного оборудования.

После устранения обнаруженных выбросов, точной синхронизации и приведения к единому началу отсчета (по углу) было установлено, что расхождение результатов измерений текущих углов поворота планшайбы $\alpha_1(t)$ и $\alpha_2(t)$ посредством двух стендов увеличивалось по мере роста амплитуды и частоты колебаний, достигая ~100" (рис. 4, а), что составило ~2 % от амплитуды колебаний A . Средняя квадратическая погрешность (СКП) в пределах всей реализации $0 < t < t_{\text{исп}}$ аналогично возростала до 45" (СБИУП) и 0,7" (Acutronic) (рис. 4, б).

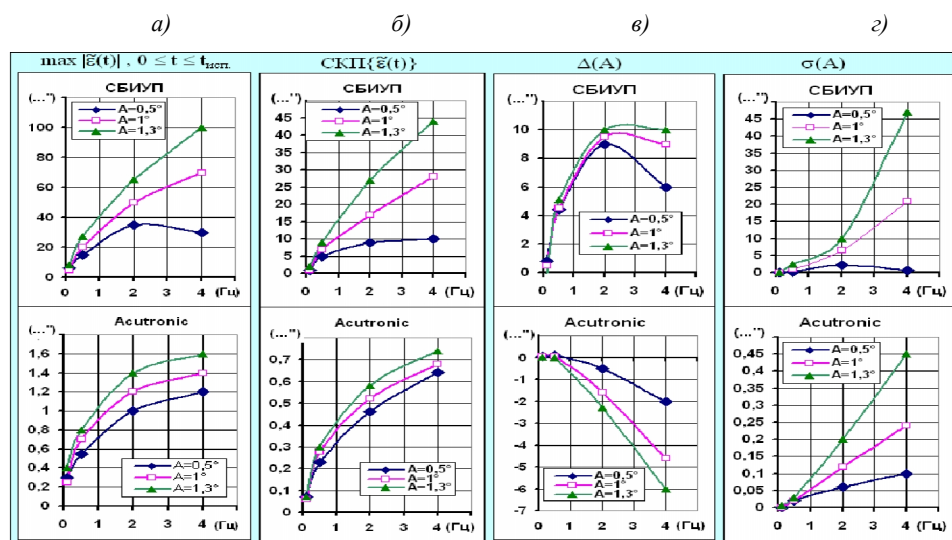


Рис. 4. Основные характеристики динамических погрешностей стендов СБИУП и Acutronic

Представляют интерес зависимости от основных параметров следующих двух показателей точности. Первым из указанных показателей является наблюдавшееся смещение $\Delta(A)$ полученных МНК-оценок амплитуды относительно номинальных (предписанных стенду Acutronic) значений (рис. 4, в). Вторым показателем, характеризующим достоверность этих МНК-оценок, является соответствующие им оценки среднего квадратического отклонения $\sigma(A)$ (СКО), (рис. 4, г). Для стенда Acutronic $\Delta(A)$ и $\sigma(A)$ являются ярко выраженными линейными функциями частоты колебаний F с наклоном, возрастающим по мере увеличения амплитуды A . Это свидетельствует о том, что стенд Acutronic является полностью сбалансированной механической системой с апериодической частотной характеристикой. В то же время СБИУП имеет отчетливо наблюдаемый резонанс на частоте 2 Гц, который обусловлен, по всей видимости, конструктивными особенностями стенда, в частности, вращением призмы со скоростью 2 об/с. Кроме того, на рис. 5, а, б показаны примеры временных реализаций приведенных погрешностей $\tilde{\varepsilon}_k(t)$ двух стендов, полученных как невязки уравнений (8) при подстановке в них найденных МНК-оценок параметров.

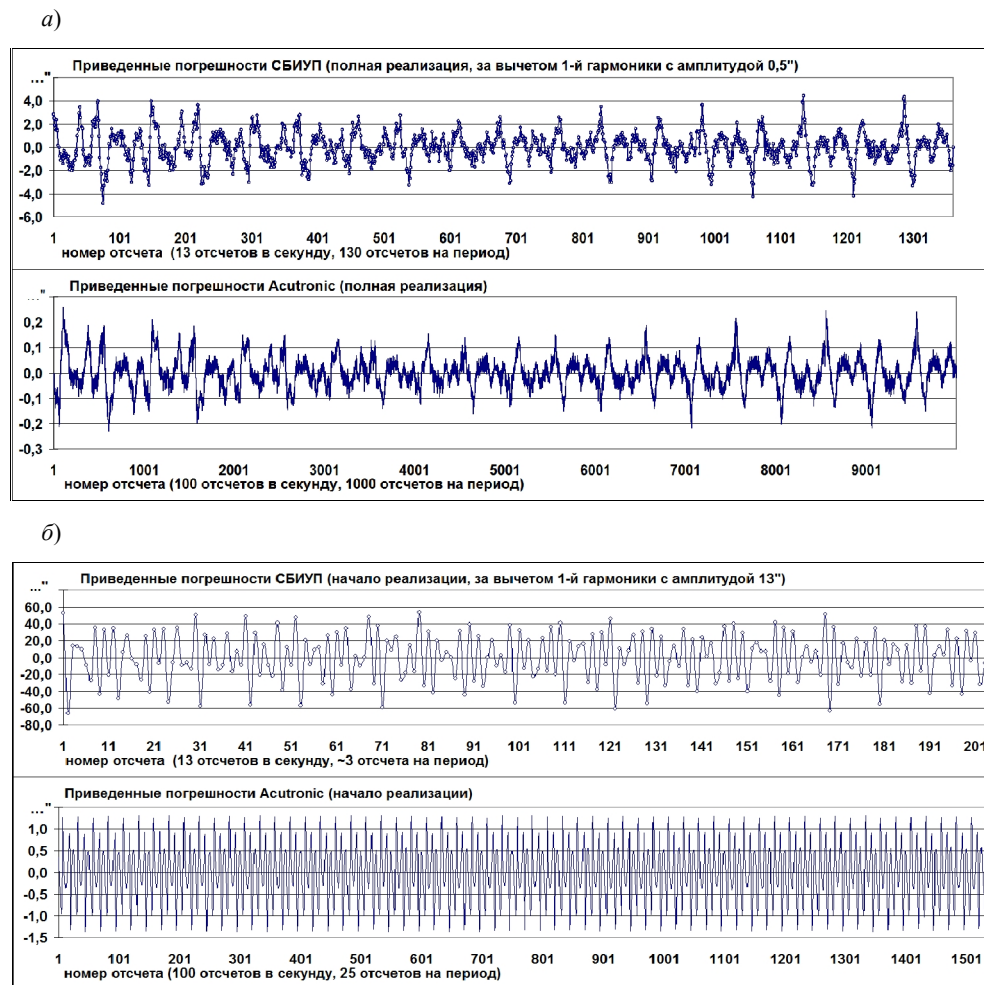


Рис. 5. Примеры реализаций приведенных погрешностей стендов СБИУП и Acutronic:
а) $A=1^\circ$, $F=0,1$ Гц; б) $A=1^\circ$, $F=4$ Гц

Анализ графиков на рис. 4–5 свидетельствует о том, что уровень динамической погрешности двух рассмотренных стендов в основном увеличивается с ростом частоты и амплитуды.

Наблюдаемые расхождения показаний двух стендов, достигающие 100", могут быть частично объяснены выявленными в ходе описанных экспериментов наведенными угловыми колебаниями внешней рамы стенда Acutronic вокруг ее оси (также вертикальной). Указанные колебания доходили до 15" при максимальных амплитудах/частотах колебаний вокруг внутренней оси. Установлено, что данные колебания были обусловлены невозможностью включить режим удержания внешней оси с помощью силового привода, поскольку для этого потребовалось бы закрыть дверь термокамеры (что перекрыло бы обзор ВКЗ). При этом значение амплитуды 15" предположительно обусловлено соотношением моментов инерции платформы стенда как таковой (включая установленное оборудование) и рамы стенда в целом.

При включенном режиме удержания (при закрытой двери термокамеры) указанные колебания не превосходили 0,15".

Предварительный вывод о возможности использования стенда Acutronic в качестве высокоточного устройства при включенном режиме удержания, задающего переменные углы, хорошо согласуется с наблюдаемым линейным видом зависимости смещения $\Delta(A)$ от частоты (рис. 4, в). Об этом же свидетельствует сходимость сигналов, регистрируемых штатным датчиком стенда Acutronic, к модельной синусоидальной форме на уровне погрешности не более 0,45" (рис. 4, з). Это потенциально позволяет вносить соответствующие поправки в показания штатного датчика угла стенда Acutronic, тем самым практически полностью компенсируя его динамическую погрешность в рассмотренном диапазоне частот.

Следует отметить, что для более детальных количественных оценок требуется совершенствование используемых при аттестации данных стендов аппаратных и методических средств. Кроме того, полученные результаты свидетельствуют о явной недостаточности частоты опроса СБИУП, равной $F_1 = 13$ Гц, для его полноценного использования при динамических испытаниях азимутальных платформ в рассмотренном диапазоне частот. Для расширения возможностей СБИУП как высокоточного средства измерений постоянных или медленно меняющихся углов следует повысить до 40–50 Гц его частоту опроса, а также увеличить до 30–60° диапазон измеряемых углов, в том числе существенно ослабить (в идеале – устранить) эффект уменьшения диапазона при увеличении расстояния от СБИУП до оси контролируемой платформы.

Заключение

На основе теоретического обоснования и результатов практической апробации предложенного метода можно сделать следующие выводы:

1. В случае отсутствия эталонных средств возможно предварительное оценивание уровня динамической погрешности платформ качки путем сопоставления с известной статической погрешностью штатного датчика угла поворота платформы. Предложенный метод оценивания основан на использовании дополнительного внешнего (конструктивно независимого от платформы) устройства, регистрирующего угол поворота платформы параллельно с ее датчиком.

2. Метод состоит в аппроксимации каждой из нескольких серий результатов измерений функцией, соответствующей виду колебаний платформы. При этом указанная аппроксимация выполняется совместно для массивов данных, зарегистрированных двумя углоизмерительными устройствами – штатным датчиком угла и внешним устройством, а аппроксимирующая функция выбирается из семейства синусоид с учетом возможного ненулевого среднего положения платформы и несовпадения начал отсчета шкал времени двух устройств. В пределах серии измерений платформа колеблется с заданными амплитудой и частотой.

3. Выявлено условие, при котором оценки погрешностей, получаемые согласно данному методу, могут быть детализированы. Показано, что применительно к поворотным стендам это условие можно сформулировать как незначительность дополнительных искажений $\delta(t)$, вносимых силовым приводом платформы в заданный закон изменения угла поворота как функции времени, на фоне переменных инструментальных погрешностей штатного датчика угла $\varepsilon_2(t)$. При этом определенная часть представленных в последнем разделе статьи числовых данных имеет иллюстративный характер, поскольку малость искажений $\delta(t)$ на данном этапе исследований обоснована лишь косвенно. В последующем предполагается выполнить прямую экспериментальную проверку данного условия на основе использования высокоскоростного лазерного автоколлиматора типа TA HS 500-57 фирмы TRIOPTICS (Германия), позволяющего назначить частоту съема данных до 10 кГц.

4. Независимо от уровня искажений $\delta(t)$ предложенный метод позволяет получить точные оценки разности $\varepsilon_1(t) - \varepsilon_2(t)$ полных погрешностей двух исследуемых устройств, а также отдельные оценки переменных приведенных погрешностей $\tilde{\varepsilon}_1(t)$ и $\tilde{\varepsilon}_2(t)$ двух устройств как функций синхронизированного времени. При этом указанные приведенные погрешности $\tilde{\varepsilon}_k(t)$ ($k = 1, 2$) понимаются как алгебраические суммы каждой из двух полных инструментальных погрешностей $\varepsilon_k(t)$ исследуемых устройств и искажения $\varepsilon_0(t)$, вносимого в синусоидальный сигнал силовым приводом качающейся платформы, которая является общим источником входных сигналов устройств.

Авторы выражают благодарность д. т. н. Т. Н. Сирой за ценные замечания и за идею распространить принцип взаимной калибровки двух круговых шкал на динамический режим работы двух сравниваемых углоизмерительных устройств; проф. С. П. Дмитриеву за полезные обсуждения затронутой тематики, а также проф. Ю. В. Филатову и разработчикам СБИУП за предоставленные материалы и активное участие в работах по проведению испытаний и экспериментальных исследований указанного стенда.

*Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований
(проект 13-08-00778-а).*

ЛИТЕРАТУРА

1. Веб-сайт <http://www.acutronic.com>.
2. Буравлев, А. С. Автоматизированный стенд для испытаний и входного контроля волоконно-оптических гироскопов / А. С. Буравлев, С. Б. Орлов, Ю. Н. Кириличенко, К. В. Кринкин // Сб. тез. докл. XXV науч.-техн. конф. памяти Н. Н. Острякова, СПб., 2006 (реферат опубликован в ж. «Гироскопия и навигация», №4 (55), 2006, с. 115).

3. **Корешков, К. В.** Исследование характеристик стенда «Кречет» в динамическом режиме работы / К. В. Корешков, А. В. Попов, А. И. Скалон, Л. А. Чертков // Сб. тез. докл. XXV науч.-техн. конф. памяти Н. Н. Острякова, СПб., 2006 (реферат опубликован в ж. «Гирскопия и навигация», №4 (55), 2006, с. 116).
4. **Грановский, В. А.** Динамические измерения: Основы метрологического обеспечения. – Л.: Энергоатомиздат, Ленингр. отд-ние, 1984. – 224 с.
5. **Грязин, Д. Г.** Опыт аттестации трехосного поворотного стенда фирмы Acutronic / А. И. Скалон, О. О. Величко, А. Б. Чекмарев // Механометрика, автоматизация, управление. 2011, № 4 – С. 75–78.
6. **Грязин, Д. Г.** Методика оценки метрологических характеристик стенда переменных угловых скоростей / А. И. Скалон, А. С. Ковалев, Д. И. Лычев // Гирскопия и навигация. 2010, № 1 – С. 81–90.
7. **ГОСТ 8.256-77.** ГСИ. Нормирование и определение динамических характеристик аналоговых средств измерений. Основные положения. – М.: Изд. стандартов, 1979. – 10 с.
8. **МИ 2090-90.** Рекомендация. ГСИ. Определение динамических характеристик линейных аналоговых средств измерений с сосредоточенными параметрами. Общие положения. – М.: Изд. стандартов, 1991. – 65 с.
9. **ГОСТ Р 8.568-97.** ГСИ. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. – М.: Изд. стандартов, 2003. – 8 с.
10. **ГОСТ Р 51672-2000.** Метрологическое обеспечение испытаний продукции для целей подтверждения соответствия. Основные положения. – М.: Изд. стандартов, 2003. – 16 с.
11. **United States Patent 6 836 -111.** Sensor assembly with a universal sensor module for sensing angular position of an object. Опубл. 28.12. 2004. (Delphi Technologies, Inc.).
12. **United States Patent 6 518 750.** Angular position sensor including rotor with spaced bar magnets. United States Patent 6 518 750. Опубл. 11.02.2003. (Delphi Technologies, Inc.).
13. **Лячев, В. В.** Метрологические основы теории измерительных процедур / Лячев В. В., Сирая Т. Н., Довбета Л. И. // СПб.: Элмор, 2011. – 416 с.
14. **Тарбеев, Ю. В.** Аттестация алгоритмов обработки данных при измерениях / Тарбеев Ю. В., Челпанов И. Б., Сирая Т. Н. // Измерения, контроль, автоматизация. 1991, № 2 (78) – 7 с.
15. **Кудрявцев, М. Д.** Субоптимальное оценивание параметров зашумленного дискретного гармонического сигнала / М. Д. Кудрявцев, А. Б. Чекмарев // Сб. тез. докл. XIII конф. молодых ученых «Навигация и управление движением», СПб, 2011 – 7 с.
16. **Колмогоров, А. Н.** К обоснованию метода наименьших квадратов // Успехи матем. наук, №1, вып. 1, 1946. – С. 57–70.
17. **Линник, Ю. В.** Метод наименьших квадратов и основы математико-статистической теории обработки наблюдений // Л., Физматгиз, 1962. – 352 с.
18. **Granovskiy, V.** Industrial measurements as source of methodology problems of metrology / Granovskiy V., Kudryavtsev M., Siraya T. // Abstracts of 15 Congress International de Metrologie, 3 – 6 Oct. 2011, Paris, France. – 6 pp.
19. **Кудрявцев, М. Д.** Новый способ учета выбросов как основа реализации алгоритма обработки избыточных данных совокупных измерений // Метрология, № 10, 2002. – С. 3-19.
20. **Агапов, М. Ю.** Измерение параметров углового движения сканирующего зеркала / М. Ю. Агапов, Е. А. Башиш, Е. Д. Бохман, П. А. Павлов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Сер. Приборостроение и информационные технологии (Известия Государственного электротехнического университета), – 2007. – С. 52-59.
21. **Дмитриев, С. П.** Инерциальные методы в инженерной геодезии // СПб: ГНЦ РФ – ЦНИИ «Электроприбор», 1997. – 208 с.
22. **Ривкин, С. С.** Метод оптимальной фильтрации Калмана и его применение в инерциальных навигационных системах, ч. II // Л., Изд-во «Судостроение», 1974. – 156 с.

Abstract. The article considers preliminary estimation of dynamic error of an angle-measuring instrument. Estimation is performed with no available standards for dynamic measurement of angles and angular velocities of the required accuracy. The proposed method compares the instrument with a unit of similar static accuracy. The results are exemplified by investigation of the Acutronic AC3367-TC test bench and a test bench for noncontact measurement of the object angular position.

Key words: rocking test bench, angle-measuring instrument, dynamic error, comparison method

Материал поступил 22.09.11