

ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
ИМЕНИ Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА

6/vii-43

ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ

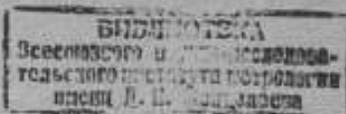
ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 205/265/





ВСЕСОЮЗНЫЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ МЕТРОЛОГИИ
имени Д. И. МЕНДЕЛЕЕВА



ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ

ТРУДЫ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ИНСТИТУТОВ СССР

Выпуск 205 (265)

Под редакцией А. Е. Сичельникова



«ЭНЕРГИЯ»
ЛЕНИНГРАД-1977

Сборник посвящен вопросам создания средств воспроизведения постоянных и низкочастотных линейных ускорений, в том числе эталонов и образцовых средств. Дается описание этих средств и входящих в них систем, приводятся результаты их исследования, описываются методы определения метрологических характеристик этих средств и оцениваются погрешности воспроизведения постоянных и низкочастотных линейных ускорений. Показано, что применяемые методы могут быть использованы при разработке новых средств воспроизведения параметров движения. Описана конструкция гравиметрического маятника и проводится исследование некоторых его погрешностей. Оценивается зависимость точности акселерометра от способа определения его измерительной оси. Рассматривается вопрос надежного определения параметров движения твердого тела по результатам измерений.

Сборник рассчитан на инженерно-технических и научных работников.

*И. М. Артемьев, Б. Э. Блантер,
С. А. Ковчин, А. Е. Симельников,
Г. А. Смирнов, С. А. Шейнберг*

ВНИИМ

КОМПЛЕКС ЭТАЛОННЫХ И ОБРАЗЦОВЫХ СРЕДСТВ ДЛЯ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ ПОСТОЯННЫХ И НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ

Широкое использование в различных отраслях науки и техники низкочастотных линейных акселерометров, повышение требований к их точности, надежности и быстродействию обусловило дальнейшее развитие системы метрологического обеспечения этой важной области приборостроения.

В связи с этим во ВНИИМ проводились работы по созданию комплекса образцовых средств и эталонов, методов поверки акселерометров и соответствующей нормативной документации. Учитывая нужды промышленности и перспективы развития акселерометрии, были разработаны поверочные схемы для средств измерений постоянных и низкочастотных линейных ускорений, а также определены требования к метрологическим характеристикам соответствующих эталонов и образцовых средств. Были проанализированы различные методы воспроизведения ускорения и выбраны наиболее перспективные для решения поставленной задачи.

Проведенные исследования методов позволили разработать принципиальные схемы установок, обеспечивающие высокие метрологические характеристики. При разработке этих схем использовались последние достижения науки и техники. В создании установок также принимали участие такие организации, как ЛПИ им. М. И. Калинина, разработавший прецизионные электромеханические системы, ЭНИМС, разработавший гамму аэростатических опор. В результате было создано два комплекса образцовых средств: эталонная установка для воспроизведения единицы ускорения при колебательном движении твердого тела (ГОСТ 8.138—75) и образцовый комплекс для воспроизведения постоянного линейного ускорения.

Эталонная установка ДЦ-1. Предназначена для воспроизведения и хранения единицы ускорения и передачи размера единицы образцовым акселерометрам и наиболее точным акселерометрам, применяемым в народном хозяйстве страны. Передача размера единицы производится методом прямых измерений.

Эталонная установка ДЦ-1 обеспечивает воспроизведение единицы ускорения: при задании постоянных ускорений от 10 до 100 м/с²; при задании гармонических ускорений с амплитудой 10—100 м/с² на любой частоте в диапазоне 0,5—30 Гц; при одновременном задании гармонических ускорений с теми же параметрами и постоянных ускорений до 200 м/с².

Для воспроизведения единицы ускорения используется двойная центрифуга с независимым приводом поворотного стола, принцип действия которой описан в работе [1].

При вращении ротора и при неподвижном столе воспроизводимое постоянное ускорение

$$a = \Omega^2 (R \pm r), \quad (1)$$

где Ω — угловая скорость вращения ротора; R — расстояние между осями вращения платформ; r — расстояние от оси вращения стола до базовой плоскости установочного приспособления.

При одновременном вращении платформ ускорение

$$a(t) = \Omega^2 R \cos \omega t + (\Omega + \omega)^2 r, \quad (2)$$

где ω — угловая скорость вращения стола.

Схема эталонной установки ДЦ-1 изображена на рис. 1. Ротор 8 установлен в аэростатической опоре 3, укрепленной на станине 7. На расстоянии R от оси вращения ротора в аэростатической опоре 37 установлен поворотный стол 27. Сжатый воздух подается в опоры 3 и 37 от компрессора 4 через систему осушки и очистки.

Ротор и стол снабжены независимыми замкнутыми системами электропривода, включающими в себя соответственно электродвигатели 1 и 38, системы управления 35 и 14, преобразователи угла поворота платформ. Якорь двигателя 1 соединен со шпинделем ротора муфтой 2. Якорь двигателя 38 жестко соединен со шпинделем опоры стола, при этом стол, шпиндель и якорь образуют единый узел, вращающийся во втулке аэростатической опоры.

Ртутные токосъемники 20 и 22 используются для передачи электрических сигналов на неподвижное основание.

Балансировка вращающихся узлов осуществляется противовесами 11 и 31. Для обеспечения постоянства моментов сил аэродинамического сопротивления все вращающиеся узлы закрыты кожухом 10.

Межосевое расстояние измеряют в статике (при неподвижных платформах) с помощью съемных калибров 12 и 30, установленных в центре ротора и стола. Колебания межосевого расстояния в динамике определяют при помощи измерительной системы, в которую входят измерительные емкостные преобразователи 5 и 33 и блоки индикации 6 и 17. Чувствительные элементы преобразователей установлены в опорах 3 и 37. Эту же измерительную систему применяют для контроля качества балансировки узлов ротора и стола и определения пространственной ориентации обеих платформ в динамике.

Ускорение на двойной центрифуге направлено вдоль горизонтальной оси шпонки 26, проходящей через центр стола. Исследуемый акселерометр 23 укрепляют на приспособлении 24 таким образом, чтобы его измерительная ось была параллельна оси шпонки и пересекла ось вращения стола.

При задании постоянных ускорений стол разворачивают так, чтобы шпонка была направлена вдоль радиуса ротора, и стопорят стол в этом положении фиксатором 36.

Значения угловых скоростей ротора и поворотного стола вычисляют по результатам многократных измерений времени поворота платформы на заданный угол. Измерительная система состоит из двух каналов, идентичных по принципу действия. В каналы измерения Ω и ω входят измерительные индукционные преобразователи угла поворота ротора и стола, делители 28 и 18 и частотомеры 25 и 19. Каждый преобразователь состоит из магнитного барабана и считывающего устройства. Барабан 9 жестко связан с ротором, барабан 29 — со столом.

Считывающие устройства 34 и 13 установлены на станине и роторе. На каждый барабан нанесена сигналограмма, представляющая собой последовательность магнитных меток с постоянным углом φ_0 между соседними метками. В качестве задающего при нанесении меток использован кольцевой оптический квантовый генератор [2].

При вращении платформы сигнал со считывающего устройства поступает через делитель на вход частотомера, работающего в режиме измерения периода. Результаты измерения интервала времени T между импульсами с выхода делителя вводятся в регистрирующее устройство 21. Угловые ско-

рости Ω и ω определяются по формуле $\frac{k\varphi_0}{T}$, где k — коэффициент деления соответствующего делителя.

Сигналы с преобразователей 9, 13, 29, 34 поступают также в системы управления электроприводами соответствующих платформ и используются в этих системах в качестве сигналов обратной связи при стабилизации угловой скорости.

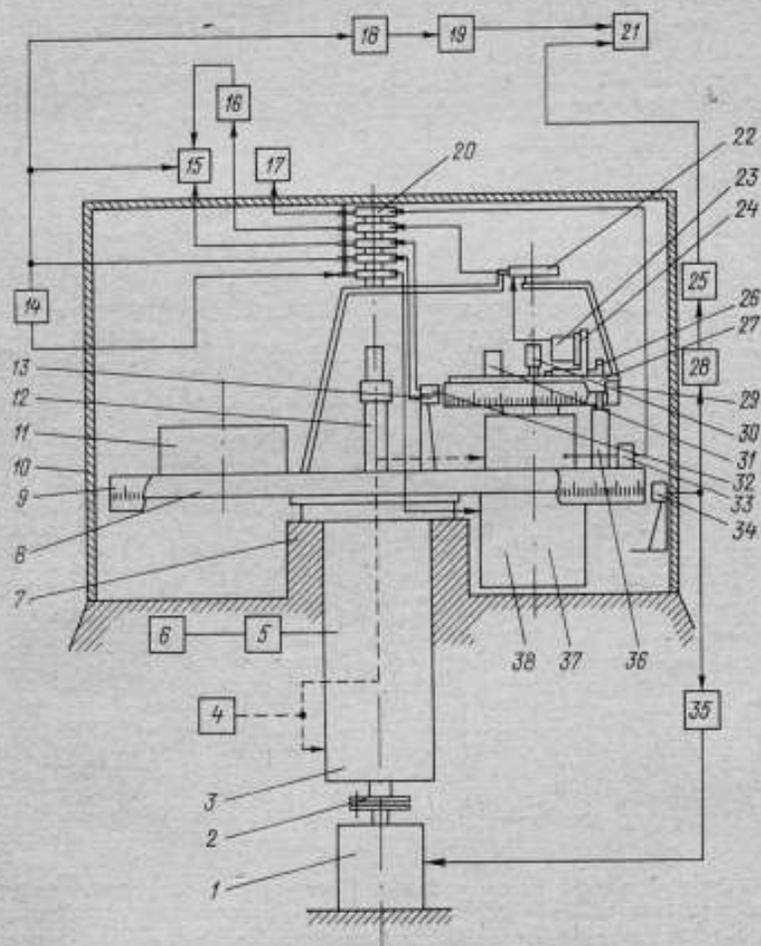


Рис. 1. Схема эталонной установки ДЦ-1

Сдвиг фаз θ определяется как угол поворота стола от положения, когда ускорение равно нулю, до положения, когда выходной сигнал акселерометра равен нулю.

В момент перехода ускорения через нуль магнитная метка, нанесенная предварительно на одну из дорожек барабана 29, проходит мимо считывающего устройства 32, сигнал которого включает блок измерения сдвига фаз

15. Измерение θ завершается в момент поступления на второй управляющий вход блока 15 стоп-импульса, сформированного формирователем 16 при прохождении через нуль сигнала акселерометра. Блок 15 обеспечивает определение θ двумя способами — преобразованием измеряемого угла во временной интервал и путем прямых измерений.

В состав эталонной установки ДЦ-1 входят двойная центрифуга, системы управления электроприводами и система измерения угловых скоростей платформ. Двойная центрифуга установлена на виброизолирующем фундаменте в термостатированном помещении, все остальные системы размещены в зале управления.

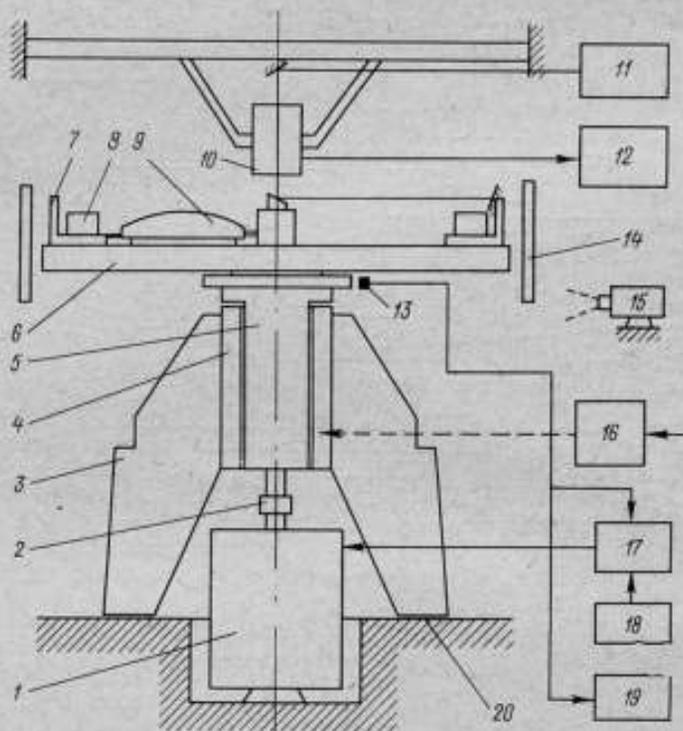


Рис. 2. Образцовый комплекс

Образцовый комплекс. Обеспечивает воспроизведение ускорений в диапазоне $5-200 \text{ м/с}^2$ с неисключенной систематической погрешностью $1 \cdot 10^{-4}$ и средней квадратической погрешностью результата измерений менее $3 \cdot 10^{-5}$. Воспроизведение ускорения осуществляется путем использования ротационной платформы с вертикальной осью вращения (центрифуги). Схема, поясняющая принцип действия установки, представлена на рис. 2.

В станции 3 установлена аэростатическая опора 4, обеспечивающая плавность и точность вращения. Сжатый воздух подается в опору через пневмупульт 16. На верхнем торце шпинделя 5 воздушной опоры укреплена вращающаяся платформа-ротор 6 со столами 7 для установки исследуемых приборов 8. Электрические сигналы от приборов с вращающегося ротора передаются к системе измерения 12 через ртутный многоконтактный токосъемник 10.

Для уменьшения аэродинамического сопротивления ротор закрыт обтекателем и охвачен аэродинамическим кольцом 14. Вращение ротора осуществляется электродвигателем 1, связанным со шпинделем аэростатической опоры муфтой 2. Для задания необходимого режима вращения используется система фазового регулирования 17, исходными сигналами для которой являются последовательности импульсов с преобразователя угловой скорости 13 и опорного генератора 18. Угловая скорость измеряется преобразователем 13 и двухканальной электронной измерительной системой 19 с регистрацией результатов измерения с помощью ЦПМ и перфоратора.

Для периодического контроля угловой ориентации стола с установленным акселерометром в процессе вращения при снятом токоємнике предусмотрена оптическая измерительная система 11. Расстояние от оси вращения до установочной плоскости столов измеряется системой 9. Электромеханическая система комплекса располагается на массивном виброизолирующем фундаменте 20. Визуальный контроль за вращением центрифуги осуществляется с помощью телевизионной установки 15. В помещении, где установлена электромеханическая часть, поддерживается постоянная температура и влажность.

В состав разработанных комплексов входит ряд систем и узлов, которые могут использоваться при разработке новых образцовых и поверочных установок. Аэростатические опоры, включающие в себя радиальный подшипник и осевой подпятник, обеспечивают радиальную жесткость 600 Н/мкм, угловую жесткость до 100 Н/угл. с и некрутость вращения порядка 0,2 мкм при осевой нагрузке 1,5 т.

Измерительный преобразователь угла, состоящий из магнитного барабана и устройства записи-считывания, обеспечивает воспроизведение угловой шкалы с ценой деления до 2,6 угл. мин при погрешности около 1". Шкала магнитного барабана наносится по методу, изложенному в [2]. Система задания и поддержания угловой скорости вращения, являющаяся замкнутой системой фазового регулирования, обеспечивает воспроизведение средних за 1 оборот угловых скоростей в диапазоне (1—10) рад/с со средним квадратическим отклонением результата измерения менее $(3-5) \cdot 10^{-6}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блантер Б. Э., Бордиловский А. Ф., Синельников А. Е., Шкалик В. С. Государственный специальный эталон единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот от 0,5 до 10^6 Гц. — «Измерительная техника», 1975, № 10, с. 14—18.
2. Блантер Б. Э. Устройство для нанесения магнитных меток. Заявка № 1195517/25—28.

Поступила в редакцию 19/XII—1975 г.

УДК 531.768.088/.089;620.168.336

*И. М. Артемьев, Я. М. Кандель,
А. В. Лебедев, А. Е. Синельников*

ВНИИМ

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВОЙ ЦЕНТРИФУГИ

Образцовая центрифуга предназначена для воспроизведения постоянного линейного ускорения в диапазоне 5—200 м/с². Установка представляет собой одностороннюю центрифугу, описание которой дано в статье И. М. Артемьева, Б. Э. Блантера и др. (см. настоящий сборник, стр.3).

Центростремительное ускорение, воспроизводимое на установке,

$$a = \omega^2 R, \quad (1)$$

где ω — угловая скорость ротора центрифуги; R — расстояние от оси вращения ротора до базовой плоскости установочного стола.

Для определения погрешности воспроизведения ускорения образцовой центрифугой необходимо оценить погрешности задания входящих в выражение (1) величин, а также погрешности, определяемые отклонением базовой плоскости установочного стола от вертикали. Пренебрегая другими составляющими погрешности, выражение (1) преобразуем к виду

$$a = \omega^2 R + g \sin \beta, \quad (2)$$

где β — угол отклонения базовой плоскости установочного стола от вертикали; g — ускорение свободного падения.

Исследуем и оценим три основные группы составляющих погрешности воспроизведения ускорения, вызванных погрешностями задания ω , R , а также наличием угла β ; погрешности можно рассматривать как некоррелированные.

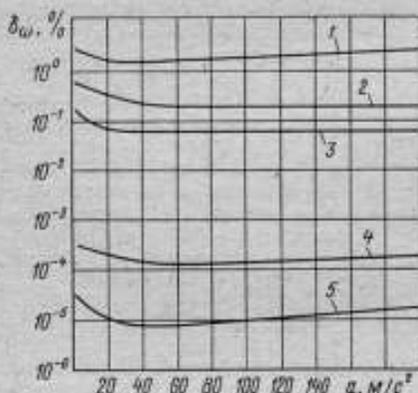


Рис. 1. Зависимость погрешности δ_ω от воспроизводимого ускорения a

ми, равном $2\pi/8192$. Измерение времени поворота методом с погрешностью не более $1 \cdot 10^{-7}$ с. Погрешность δ_ω в диапазоне воспроизводимого ускорения $5-200$ м/с² (см. рис. 1) определялась по формуле

$$\delta = \frac{\sigma_T}{T_k}, \quad (3)$$

где σ_T — среднее квадратическое отклонение результата наблюдения; T_k — среднее значение времени поворота на фиксированный угол φ_0 .

Измерения проводились при $\varphi_0 = k2\pi/8192$ ($k = 1; 10; 100$) и $\varphi_0 = 2\pi; 20\pi$ (см. кривые 1-5 на рис. 1).

На рис. 2, а, б представлены зависимости погрешности δ_ω от $\varphi_0/2\pi$. Зависимости δ_ω от $\varphi_0/2\pi$ усреднены в диапазоне воспроизводимых уско-

Измерение угловой скорости ротора

Оценка погрешности задания угловой скорости производилась при измерении времени поворота ротора центрифуги на фиксированный угол φ_0 . В качестве измерительного преобразователя угла использовался магнитный барабан, на образующей которого нанесено 8192 метки, с соответствующей системой считывания показаний. Случайная погрешность нанесения меток у подобного преобразователя не превосходит 1 угл. с* при угловом расстоянии между соседними метками

* См. статью Б. Э. Блантера, В. Н. Кудрявцева, В. Н. Повстьева в настоящем сборнике, стр. 39

рений ($a = 5; 50; 200 \text{ м/с}^2$). Снижение погрешности δ_{ω} по мере увеличения угла поворота объясняется уменьшением погрешности преобразователя угла.

Произведена оценка погрешности воспроизведения угловой скорости ротора центрифуги при длительной непрерывной работе и с перерывами на несколько дней. В каждой серии выполнено по 30 измерений. Оценка среднего квадратического отклонения результата измерений по ряду серий (более 15) находится в пределах $(3 + 5) \cdot 10^{-6}$.

Исследования показали, что наряду с погрешностями системы привода центрифуги к основным следует отнести погрешности измерительного преобразователя угла, определяемые неравномерностью распределения магнитных меток на барабане и погрешностями системы формирования и считывания меток.

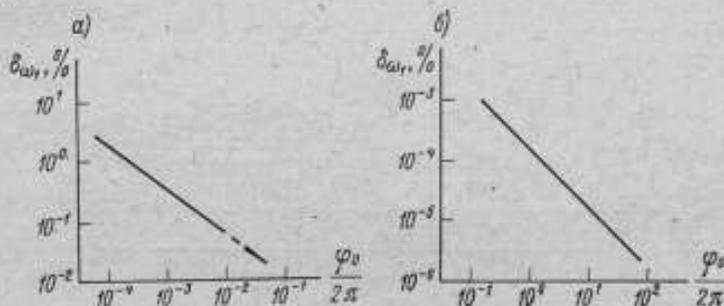


Рис. 2. Зависимость погрешности δ_{ω} от угла поворота $\varphi_0/2\pi$

Измерения линейных размеров

Расстояние R может быть представлено в виде

$$R = R_0 + \Delta R(t),$$

где R_0 — постоянная составляющая

$$R_0 = R'_0 + \frac{D}{2};$$

$\Delta R(t)$ — переменная составляющая, определяемая центробежными и тепловыми удлинениями плеча центрифуги, а также радиальными перемещениями вала ротора и подшипнике, изгибной деформацией плеча; R'_0 — расстояние от базовой плоскости шпинделя до базовой плоскости установочной площадки; D — диаметр шпинделя.

Диаметр шпинделя измерен рычажной скобой с погрешностью не более 2 мкм. Для измерения R'_0 разработан измеритель длины плеча (рис. 3), состоящий из двух инварных стержней 1 длиной 1200 мм каждый. На концах стержней укреплены два зеркала 2 и индикаторы 4. Стержни установлены на регулируемых по высоте опорах 3, закрепленных на плече 3 центрифуги. Установка стержней перпендикулярно вертикальной базовой плоскости шпинделя (пл. Б) и проверка параллельности плоскости и базовой плоскости (пл. А) установочного стола производилась с помощью автоколлиматора. Предварительная установка индикаторов на размер (отсчеты n_1, n_2, n_3) производилась с помощью установочной плитки. После монтажа измерителя на плече и выдержки в течение 3 ч снимались показания трех индикаторов (n_1, n_2, n_3) и измерялась температура θ .

Расстояние R_0 вычислялось по формуле

$$R_0' = L_1 + L_2 + \alpha (L_1 + L_2) (\theta - 20^\circ \text{C}) + (n_1' - n_1'') + (n_2' - n_2'') + (n_3' - n_3''),$$

где L_1, L_2 — длина двух стержней; α — коэффициент температурного удлинения плеча центрифуги.

Погрешность аттестации длины каждого стержня составила не более ± 5 мкм, погрешность измерения индикаторами ± 4 мкм, общая инструментальная погрешность измерителя — не более ± 20 мкм.

Среднее квадратическое отклонение результата измерений не превышает ± 10 мкм при неисключенной систематической погрешности около 20 мкм. Относительная погрешность определения величины R_0 не превышает $1,1 \cdot 10^{-5}$.

Так как помещение, где расположена центрифуга, термостатировано (колебание температуры порядка $0,8-0,9^\circ \text{C}$) относительное удлинение при измерении температуры не превышает $1 \cdot 10^{-5}$.

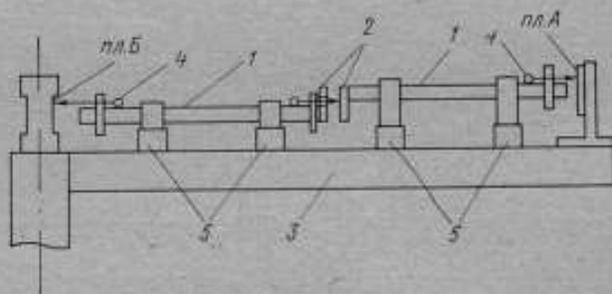


Рис. 3. Измеритель длины плеча

Центробежное удлинение плеча центрифуги в пределах упругих деформаций было вычислено по формуле

$$\delta_{ц} = \frac{a}{g} \frac{P_{ст} + \frac{1}{3} P_{пл}}{E S}, \quad (4)$$

где $P_{ст}$ — вес установочного стола; $P_{пл}$ — вес плеча центрифуги; E — модуль упругости материала плеча; S — площадь поперечного сечения плеча.

В диапазоне ускорений $5-200 \text{ м/с}^2$ относительная погрешность $\delta_{ц}$ колеблется в пределах от $0,7 \cdot 10^{-6}$ до $2,8 \cdot 10^{-5}$. Относительная погрешность за счет изгибной деформации при практических изменениях угловой ориентации плеча центрифуги, не превышающих 2 угл. мин, не более $2 \cdot 10^{-7}$. Установлено, что изменение R_0 за счет перемещения шпинделя по втулке эрозионной опоры не превышает 10 мкм, при этом $\delta_{ш} \leq 3,7 \cdot 10^{-5}$.

Измерения угловых параметров

Отклонение базовой плоскости установочного стола от вертикали в процессе работы установки определяется следующими параметрами:

α_0 — постоянной составляющей угла наклона оси вращения ротора центрифуги, обусловленной неточностью юстировки при выставлении оси вращения в вертикаль; $\Delta\alpha$ — изменением угла α_0 при вращении; β_0 — постоянной составляющей угла наклона базовой плоскости установочного стола от вертикальной плоскости; $\Delta\beta$ — изменением угла β_0 под влиянием динамической нагрузки в процессе вращения.

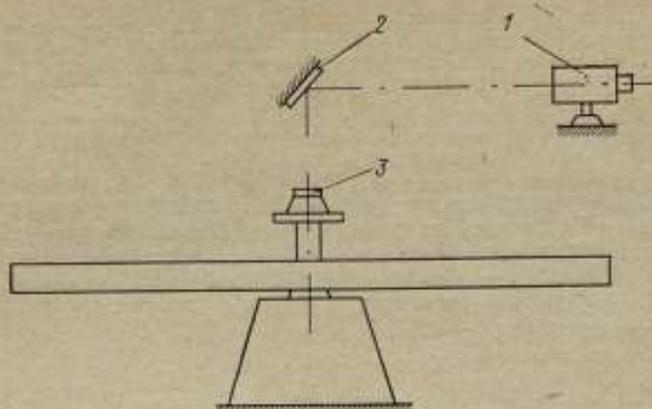


Рис. 4. Угломер динамический. Измерение угла $\Delta\alpha$
 1 — автоколлиматор; 2 — зеркало; 3 — торцевое зеркало

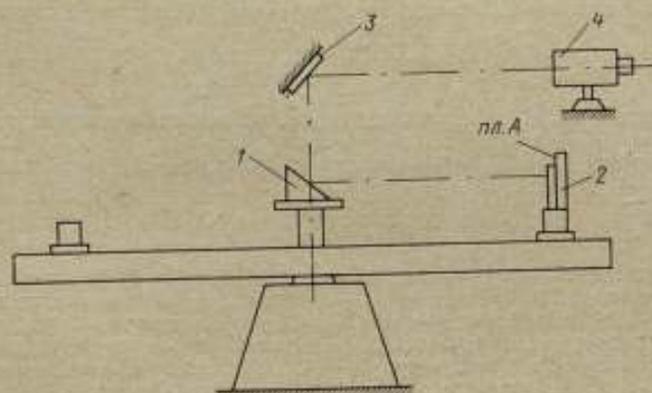


Рис. 5. Угломер динамический. Измерение угла $\Delta\beta$
 1 — призма; 2, 2 — зеркала; 4 — автоколлиматор

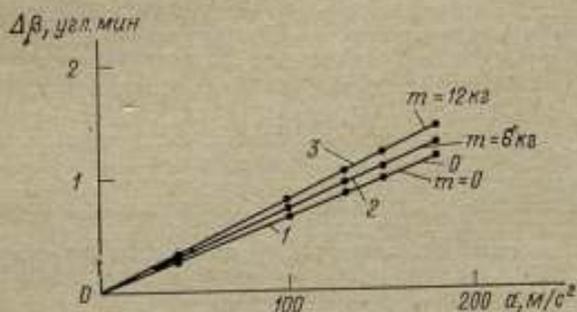


Рис. 6. Зависимость угла $\Delta\beta$ от воспроизводимого ускорения

Угол наклона оси α_0 измерялся с помощью уровня с ценой деления 2 угл. с. Уровень устанавливают на горизонтальную плоскость установочного стола и, поворачивая плечо центрифуги на угол $45 \pm 5^\circ$, измеряют угол наклона α_k ($k = 1, \dots, 8$). Угол α_0 определяется по формуле

$$\alpha_0 = \left| \frac{1}{2} (\alpha_k - \alpha_{k+1}) \right| \quad (5)$$

и выбирается максимальное из четырех значений.

Исследования показали, что юстировочное устройство для выставления оси вращения в вертикаль позволяют получить значение α_0 не более 3 угл. с ($\delta\alpha \leq 1,5 \cdot 10^{-5}$). При этом уход оси вращения за год от первоначального положения не превышает $\pm 3-5$ угл. с. Измерение угла $\Delta\alpha$ осуществлялось с помощью оптического устройства — угломера (см. рис. 4). Угол $\Delta\alpha$ определяется по формуле

$$\Delta\alpha = \frac{1}{2} (m_0 - m_\omega), \quad (6)$$

где m_0 — диаметр окружности, описываемой автоколлимационным бликом при малой скорости; m_ω — диаметр окружности при скорости ω . Погрешность измерения m_0 и m_ω будет не более 0,5 угл. с., $\Delta\alpha$ не превышает 1–2 угл. с ($\delta\Delta\alpha \leq 1 \cdot 10^{-5}$). Угол β_0 измерялся таким же образом, как и угол α_0 , с той лишь разницей, что для расчета использовалась формула

$$\beta = \left| \frac{1}{2} (\beta_k + \beta_{k+1}) \right|_{\max} \quad (7)$$

Экспериментальная проверка установила, что значение β_0 не превышает 10 угл. с.

Измерение угла $\Delta\beta$ производилось по схеме рис. 5. Угол наклона определялся по формуле

$$\Delta\beta = \frac{1}{2} (k_0 - k_\omega), \quad (8)$$

где k_0 — диаметр окружности, описываемой автоколлимационным бликом при малой скорости вращения; k_ω — диаметр окружности при угловой скорости ω . Погрешность определения k_0 и k_ω не превышает 1–2 угл. с.

Поскольку на центрифуге предусмотрена проверка приборов различного веса и конфигурации, измерение углов $\Delta\beta$ производилось с грузами массой 0,6 и 12 кг, имитирующими реально возможные нагрузки. Результаты измерения представлены на рис. 6. Как видно (кривая 3), наибольшее значение угла $\Delta\beta$ достигает 2 угл. мин. Определение составляющих угла β позволило ввести поправки в значение воспроизводимого ускорения в соответствии с выражением (2).

Исследование и оценка метрологических характеристик образцовой центрифуги показали, что постоянное линейное ускорение в диапазоне 5–200 м/с² (среднее значение за один оборот ротора) воспроизводится со средним квадратическим отклонением не более $3 \cdot 10^{-5}$ при неисключенной систематической погрешности $1 \cdot 10^{-4}$.

В целях повышения точности воспроизведения ускорения целесообразно дальнейшие работы проводить в следующих направлениях:

— создание автоматизированных систем измерения длины плеча, углов наклона в процессе работы установки, что позволит исключить ряд составляющих погрешности воспроизведения ускорения;

— создание более точных средств измерения основных параметров установки; это дает возможность снизить, в частности, неисключенную систематическую погрешность воспроизведения ускорения;

— совершенствование конструкции установки и отдельных ее систем.

Поступила в редакцию 19/XII 1975 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕТРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЭТАЛОННОЙ УСТАНОВКИ ДЦ-1

Эталонная установка ДЦ-1 входит в состав государственного специального эталона единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот 0,5—10⁴ Гц. Она предназначена для воспроизведения и хранения единицы ускорения и передачи размера единицы при помощи образцовых средств измерений рабочим средствам измерений, применяемым в народном хозяйстве страны, с целью обеспечения единства измерений в стране. Установка ДЦ-1 представляет собой двойную центрифугу [1].

Как известно, ускорение произвольной точки поворотного стола двойной центрифуги

$$a(t) = a_0 \cos(\omega_0 t + \varphi_0) + a_c, \quad (1)$$

где

$$a_0 = -\Omega_0^2 R_0; \quad a_c = -(\Omega_0 + \omega_0)^2 r_0.$$

При выводе этой формулы было принято, что стол вращается в горизонтальной плоскости, а угловые скорости платформ Ω и ω и линейные размеры R и r постоянны. На практике эти условия не выполняются, и выражение (1) принимает вид

$$a(t) = (\ddot{R} - \dot{\varphi}_1^2 R) \cos \varphi_{21} + (2\dot{R}\dot{\varphi}_1 + \ddot{\varphi}_1 R) \sin \varphi_{21} + \ddot{r} - (\dot{\varphi}_1 + \dot{\varphi}_{21})^2 r, \quad (2)$$

где φ_1 — угол поворота ротора; φ_{21} — угол поворота стола относительно ротора.

Погрешность воспроизведения ускорения из-за отклонения плоскости стола от горизонтального положения [2]

$$\Delta a_g(t) \approx g \{ \xi + \alpha \cos [(\Omega + \omega)t + \varphi_\alpha] + \beta \cos(\omega t + \varphi_\beta) \}, \quad (3)$$

где g — ускорение свободного падения; α — угол отклонения оси вращения ротора от вертикали; β — угол перекоса осей вращения платформ; ξ — угол отклонения плоскости стола от нормали к оси его вращения.

Из анализа выражений (2) и (3) следует, что воспроизводимое ускорение является амплитудно-фазо-частотно-модулированным; при этом имеют место и систематические, и случайные составляющие погрешности задания амплитуды, фазы и постоянной составляющей ускорения.

Для оценки погрешности воспроизведения ускорения проведен комплекс метрологических исследований установки, включающий исследования неустойчивости межосевого расстояния R , негоризонтальности плоскости поворотного стола, колебаний угловых скоростей ротора и стола и вибрационных шумов, возникающих при вращении платформ*. В данной работе оценены погрешности воспроизведения гармонического и постоянного линейных ускорений.

* См. в настоящем сборнике статья Б. Э. Блантера и др., стр. 39.

Оценка погрешности воспроизведения гармонического ускорения

Как показал анализ, величины, входящие в выражения (2), (3), можно представить в таком виде

$$\begin{aligned} R &= R_0 + \Delta R_0 + \Delta R + \Delta R_n; \quad r = r_0 + \Delta r_0; \\ \dot{\varphi}_1 &= \Omega_0 + \Delta\Omega_c + \Delta\Omega; \quad \dot{\varphi}_{21} = \omega_0 + \Delta\omega_c + \Delta\omega; \\ \alpha &= \alpha_0; \quad \beta = \beta_0 + \Delta\beta_1 + \Delta\beta_2 + \Delta\alpha_1 + \Delta\alpha_2; \quad \zeta = \zeta_0 + \Delta\zeta, \end{aligned} \quad (4)$$

где $R_0, r_0, \Omega_0, \omega_0$ — заданные (номинальные) значения соответствующих величины; $\Delta R_0, \Delta r_0$ — максимальные значения погрешностей измерения R_0 и r_0 в статике;

$$\Delta R = \sum_{i=1}^{i=4} \Delta R_i;$$

ΔR_i ($i = 1 + 4$) — изменение межосевого расстояния из-за упругих деформаций элементов конструкции, нестабильности температуры и податливости опор стола и ротора соответственно; ΔR_n — периодические колебания межосевого расстояния; $\Delta\Omega_c, \Delta\omega_c$ и $\Delta\Omega, \Delta\omega$ — систематические и случайные колебания угловых скоростей Ω и ω ; $\alpha_0, \beta_0, \zeta_0$ — начальные значения углов α, β, ζ ; $\Delta\alpha_1, \Delta\beta_1, \Delta\zeta$ — изменение углов α, β, ζ из-за упругих деформаций; $\Delta\alpha_2, \Delta\beta_2$ — изменение углов α, β из-за податливости соответствующих опор.

Значение R_0 было измерено с помощью аттестованных съемных калибров, установленных в центральные отверстия ротора и стола, и скобы-микрометра. Изменение R из-за перемещения шпинделей ротора и стола в своих опорах исследовалось экспериментально, оценки частных погрешностей ΔR_1 и ΔR_2 определялись расчетным путем. При вычислении ΔR_2 учитывалось, что максимальное изменение температуры в термостатированном помещении, где установлена двойная центрифуга, не превышает 1 град. При расчетах было принято, что масса акселерометра, установленного на столе, не превышает 6 кг. Изменение межосевого расстояния при вращении платформ вычислено для условно выбранной точки, расположенной на высоте 50 мм над плоскостью стола. В результате установлено: $R_0 = 0,38076$ м; $\Delta R_0 < 4 \cdot 10^{-5}$ м; $\Delta R_1 < 2 \cdot 10^{-7} a_0$ м; $\Delta R_2 < 5 \cdot 10^{-6}$ м; $\Delta R_3 < 5 \cdot 10^{-6}$ м; $\Delta R_4 < 3 \cdot 10^{-6}$ м.

При исследовании погрешностей задания угловых скоростей ротора и поворотного стола установлено, что максимальная разность между заданным и средним за время одного оборота платформ значениями угловой скорости не превосходит $2 \cdot 10^{-6}$ от заданной скорости. При этом оценка среднего квадратического отклонения результата наблюдения не превышает $8 \cdot 10^{-6}$ от заданной скорости. Проведенные исследования показали, что периодические колебания угловой скорости платформ не превышают неслучайной систематической погрешности измерения этих колебаний, равной $6 \cdot 10^{-4}$ от заданной скорости.

Начальные значения углов α, β и ζ были измерены по завершении юстировки установки. Периодические контрольные измерения показали, что изменение этих углов в течение длительного (более года) промежутка времени пренебрежимо мало. Изменение углов из-за упругих деформаций элементов конструкции двойной центрифуги оценено расчетным путем, изменение углов из-за податливости опор исследовано экспериментально.

В результате установлено: $\alpha_0 = 1,6 \cdot 10^{-4}$; $\beta_0 = 5 \cdot 10^{-4}$; $\zeta_0 = 1,4 \cdot 10^{-4}$; $\Delta\alpha_1 < 2 \cdot 10^{-7} a_0$; $\Delta\beta_1 < 10^{-6} a_0$; $\Delta\zeta < 4 \cdot 10^{-7} a_0$; $\Delta\beta_2 < 4 \cdot 10^{-8} a_0$ (все углы в радианах). Изменение угла β при вращении платформ зависит от массы m акселерометра. При отсутствии акселерометра $\Delta\beta_2 \approx 4 \cdot 10^{-7} a_0$ рад, с увеличением m значение $\Delta\beta_2$ уменьшается и при $m = 6$ кг $\Delta\beta_2 < 3 \cdot 10^{-7} a_0$ рад в области $a_0 < 40$ м/с², а в области $a_0 > 40$ м/с² $\Delta\beta_2 < 10^{-5}$ рад. Случайные составляющие изменения всех углов пренебрежимо малы.

Подставив (4) в (2) и (3) и пренебрегая членами, меньшими $10^{-5} a_0$, для систематической части относительной погрешности воспроизведения амплитуды ускорения получим

$$\delta_a = \frac{\Delta a_0}{a_0} < \sum_{i=1}^{i=6} \delta_i = \frac{\Delta R_0}{R_0} + \frac{\Delta R}{R_0} + \frac{\Delta \dot{R}_{2n}}{\Omega_0 R_0} + \frac{\Delta \ddot{R}_{2n}}{2a_0} + \frac{\Delta \omega_2}{4\omega_0} + \frac{g\beta}{a_0}, \quad (5)$$

где $\Delta \dot{R}_{2n}$ и $\Delta \ddot{R}_{2n}$ — амплитуды вторых гармоник скорости и ускорения периодического колебания межосевого расстояния; $\Delta \omega_2$ — амплитуда второй гармоники периодического колебания угловой скорости стола.

При этом сумма неучтенных слагаемых δ_0 не превышает $5 \cdot 10^{-5}$. Графики $\delta_0 = f(a_0)$ для разных областей частотного диапазона ускорений приведены на рис. 1. Как показали расчеты, значения δ_0 в области $a_0 < 30 \text{ м/с}^2$ на ча-

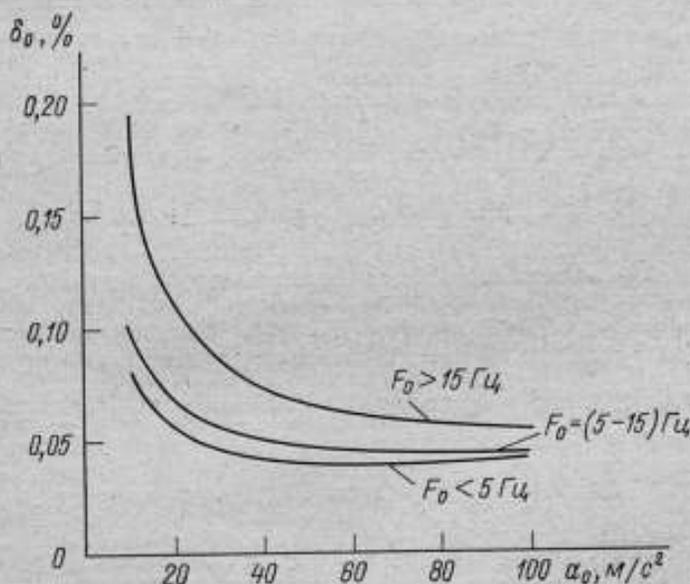


Рис. 1. Систематическая составляющая погрешности воспроизведения амплитуды ускорения

стотах $F_0 \leq 15 \text{ Гц}$ определяются главным образом составляющей δ_a , а в верхней части диапазона частот при $a_0 \leq 60 \text{ м/с}^2$ — составляющей δ_4 . Как видно, во всем диапазоне ускорений систематическая погрешность амплитуды ускорения не превышает 0,2%, причем с ростом амплитуды и уменьшением частоты ускорения она быстро уменьшается.

Отметим, что наряду с составляющими (5), при неточном совмещении центра инерции чувствительного элемента акселерометра с осью вращения стола ($r_0 \neq 0$) появляется дополнительная погрешность передачи размера единицы ускорения

$$\delta_v = \frac{2\Delta\omega_1 (\Omega_0 + \omega_n) r_0}{a_0}, \quad (6)$$

где $\Delta\omega_1$ — амплитуда первой гармоники периодического колебания угловой скорости стола.

Например, при $r_0 = 1$ мм и $F_0 = 30$ Гц максимальное значение этой погрешности $\delta_{7m} \approx 0,4 + 0,04\%$ в диапазоне амплитуд $a_0 = 10 + 100$ м/с². С уменьшением частоты F_0 значение δ_{7m} быстро падает. Равенство (6) в значительной мере определяет требования к точности установки поверяемого акселерометра.

Оценка погрешности воспроизведения постоянной составляющей ускорения

Одновременное задание гармонического и постоянного ускорений является одним из возможных, но не основных режимов работы двойной центрифуги. В этом режиме требования к точности воспроизведения параметров ускорения существенно ниже, чем при задании только гармонического ускорения.

При задании ускорения с постоянной составляющей значение δ_0 практически не изменяется, а значение погрешности δ_7 зависит не только от частоты F_0 , но и от отношения a_c/a_0 . В этом режиме $\frac{a_c}{a_0} \leq 20$ и, в частности, при $F_0 > 10$ Гц и $a_c = 200$ м/с² значение δ_{7m} изменяется от 2% (при $a_0 = 10$ м/с²) до 0,2% (при $a_0 = 100$ м/с²).

Систематическая погрешность задания постоянной составляющей ускорения (без учета членов, меньших 10^{-3} м/с²) может быть представлена в виде

$$\Delta a_c < \sum_{i=1}^{i=5} \Delta a_{ci} = \frac{\Delta r_0}{r_0} a_c + g_c^* + \Omega_0 \Delta \dot{R}_{1n} + \frac{1}{2} \Delta \ddot{R}_{1n} + \frac{\Delta \omega_1}{2\omega_0} a_0, \quad (7)$$

где $\Delta \dot{R}_{1n}$, $\Delta \ddot{R}_{1n}$ — амплитуда первых гармоник скорости и ускорения периодического колебания межосевого расстояния.

В случае, когда $r_0 = (1 + 100)$ мм и $\Delta r_0 = 10^{-2}$ мм, первое слагаемое (7) $\Delta a_{c1} = (10^{-2} + 10^{-4}) a_c$. Расчеты показали, что во всем диапазоне ускорений $\sum_{i=1}^{i=5} \Delta a_{ci} < 0,1$ м/с², а сумма неучтенных в выражении (7) составляющих Δa_c не превышает 0,02 м/с².

Основные параметры гармонического ускорения

Диапазон:

частота ускорения F_0 , Гц	0,5—30
амплитуда гармонической составляющей ускорения a_0 , м/с ²	10—100
постоянная составляющая ускорения a_c , м/с ²	0—200

Шаг дискретности:

частота, Гц, не более	$6 \cdot 10^{-5}$
амплитуда, м/с ² , не более	$3 \cdot 10^{-3}$

Неисключенная систематическая погрешность задания амплитуды ускорения δ_0 , %, менее

0,2

в том числе в области:

$a_0 > 25$ м/с ² при $F_0 > 15$ Гц, менее	0,1
$a_0 > 11$ м/с ² « $F_0 < 15$ Гц, »	0,1
$a_0 > 40$ м/с ² « $F_0 < 15$ Гц, »	0,05

Относительная амплитуда высших гармоник

a_i ($3 < i < 6$), %, менее	0,5
---	-----

Параметры ускорения в вертикальном направлении:

относительная амплитуда a_i/a_0 гармонических составляющих на кратных частотах $f > 20$ Гц, %, менее	0,3
оценка среднего квадратического отклонения случайной составляющей, м/с ² , не более	0,05

Оценка погрешности воспроизведения постоянного ускорения

В режиме задания постоянного ускорения при $r_0 = 0$ формула измерения ускорения может быть представлена в таком виде

$$a(t) = -\dot{\varphi}_1^2 R \cos(\gamma - \alpha_c \cos \varphi_1) + g \sin \gamma, \quad (8)$$

где γ — угол отклонения от горизонта направления, по которому задается ускорение; α_c — постоянная составляющая угла между осью вращения ротора и вертикалью.

Представим входящие в выражение (8) величины в виде:

$$R = R_0 + \Delta R_0 + \Delta R; \quad \dot{\varphi}_1 = \Omega_0 + \Delta \Omega_c + \Delta \Omega; \\ \alpha_c = \alpha_0; \quad \gamma = \gamma_1 + \alpha_0 \cos \Omega_0 t; \quad (9)$$

здесь

$$\gamma_1 = \beta_0 + \xi_0 + \Delta \alpha_1 + \\ + \Delta \alpha_2 + \Delta \beta_1 + \Delta \beta_2 + \Delta \zeta.$$

Как показали исследования, оценка среднего квадратического отклонения результата наблюдения при измерении средней за 1 оборот ротора угловой скорости не превышает $3 \cdot 10^{-6} \Omega_0$, и амплитуды гармоник периодического колебания скорости составляют не более $3 \cdot 10^{-4} \Omega_0$. Значения остальных слагаемых приведены ранее.

Из (8) и (9) следует, что в общем случае воспроизводимое ускорение включает в себя постоянную и переменную составляющие. Пренебрегая членами, не превышающими $10^{-5} a_0$, для систематической относительной погрешности воспроизведения постоянного ускорения получим

$$\delta_0 < \sum_{l=1}^{l=3} \delta_l = \frac{\Delta R_0}{R_0} + \frac{\Delta R}{R_0} + \frac{g \gamma_1}{a_0}. \quad (10)$$

Сумма неучтенных слагаемых в этом случае не превышает $2 \cdot 10^{-6} a_0$. Кривая $\delta_0 = f(a_0)$ приведена на рис. 2. Характер кривой на начальном участке объясняется быстрым уменьшением δ_1 с ростом a_0 . Значение этой составляющей зависит, главным образом, от угла перекося осей вращения платформ в статике. При $a_0 < 30 \text{ м/с}^2$ она доминирует, в области $30 \text{ м/с}^2 \leq a_0 \leq 60 \text{ м/с}^2$ соизмерима с δ_1 , а при $a_0 > 80 \text{ м/с}^2$ — со слагаемым δ_2 , переменная часть которого возрастает пропорционально a_0 . Как видно, во всем диапазоне постоянных ускорений систематическая погрешность $\delta_0 < 8 \cdot 10^{-4}$.

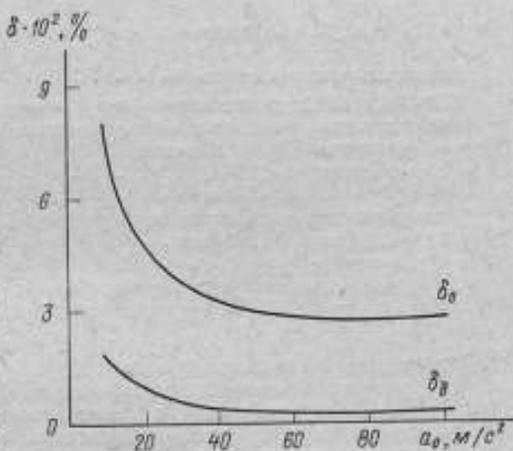


Рис. 2. Систематические погрешности воспроизведения постоянного ускорения

Кроме того, учтем гармонические составляющие ускорения

$$\Delta a_1(t) = g\alpha_0 \cos \Omega_0 t \quad (11)$$

и

$$\Delta a_{2i}(t) = 2\Delta\Omega_i \Omega_0 R_0 \cos i \Omega_0 t, \quad (12)$$

где $\Delta\Omega_i$ — амплитуда i -й гармоники Ω_0 .

Относительная амплитуда $\delta_g = \frac{g\alpha_0}{a_0}$ составляющей (11) не превышает $1,6 \cdot 10^{-4}$ при $a_0 = 10 \text{ м/с}^2$ и быстро уменьшается с ростом a_0 (см. рис. 2). Периодическая составляющая (12) в области частот $F_0 > 20 \text{ Гц}$ не обнаружена. При частотах до 20 Гц относительная амплитуда любой из гармоник этой составляющей

$$\delta_{\Omega_i} = \frac{2\Delta\Omega_i}{\Omega_0} < 6 \cdot 10^{-4}.$$

Основные параметры ускорения

Диапазон ускорения, м/с ²	10—100
Шаг дискретности значения ускорений, м/с ² , не более	$3 \cdot 10^{-3}$
Неисключенная систематическая погрешность задания ускорения δ_0 , % ,/ менее:	
в области $a_0 < 30 \text{ м/с}^2$	0,08
» » $a_0 > 30 \text{ м/с}^2$	0,04
Относительная амплитуда гармонических составляющих ускорения, %, менее	
на частоте $f_0 = \Omega_0/2\pi$	0,08
» кратных частотах $f_i = if_0 < 20 \text{ Гц}$	0,07
» » » в области $f > 20 \text{ Гц}$	0,02

Проведенные исследования показали, что эталонная установка ДЦ-1 обеспечивает высокую точность воспроизведения постоянных и гармонических ускорений. Метрологические характеристики этой установки могут быть в дальнейшем улучшены. Данный вывод основывается на том, что совершенствование измерительных систем и методов юстировки, направленное на снижение ΔR_0 и β_0 , повышение точности измерения углов и другие работы в этом направлении позволят повысить в ближайшие годы точность воспроизведения ускорений, по крайней мере, в 1,5—2 раза.



СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Блантер Б. Э., Бордюковский А. Ф., Синельников А. Е., Шкаликов В. С. Государственный специальный эталон единиц длины, скорости и ускорения при колебательном движении твердого тела в диапазоне частот от 0,5 до 10^4 Гц — «Измерительная техника», 1975, № 10, с. 3—5.
2. Лебедев В. И. Некоторые динамические погрешности при тарировке датчиков линейных ускорений на двойной центрифуге. Труды ЛПИ им. М. И. Калинина, 1970, № 314, с. 112—114.

Поступила в редакцию 19/XII—1975 г

НАДЕЖНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ДВИЖЕНИЯ ТВЕРДОГО ТЕЛА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ИЗМЕРЕНИЙ

В ряде прикладных задач управления движением, расчета инерционных нагрузок и т. д. определяют текущие значения основных кинематических параметров, характеризующих движение твердого тела, а именно: векторов линейной скорости и линейного ускорения полюса (в частности, центра масс), угловой скорости и углового ускорения. По этим параметрам находится распределение линейных скоростей и ускорений по объему тела, что необходимо, например, для расчетов на прочность. Измерения осуществляются комплексом приборов для измерения линейных и угловых ускорений, линейных и угловых скоростей. При расчете составляющих искомым векторов по взаимно ортогональным осям, жестко связанным с телом, обычно измерительные оси приборов направляют по этим осям и составляющую каждого вектора определяют независимо по сигналу каждого из приборов.

Обычно к измерительным комплексам предъявляется требование сохранения надежности при возможных отказах одного или нескольких приборов. Условие надежности при этом формируется упрощенно следующим образом. Пусть исправные приборы имеют пренебрежимо малые погрешности (при анализе надежности их можно считать равными нулю), а отказавшие приборы — большие погрешности любого знака. Надежность обеспечивается, если погрешность определения параметра по сигналам приборов пренебрежимо мала (равна нулю), и не обеспечена, если погрешность определения параметра имеет порядок погрешности отказавшего прибора.

Основой для обеспечения надежности является избыточность: в комплекс включают дополнительные приборы сверх минимально необходимого числа. При ориентации осей всех приборов по взаимно ортогональным осям обычно осуществляется независимое резервирование каждого из приборов. Если нет косвенных признаков, по которым устанавливается отказ прибора, и информация поступает только в виде выходных сигналов приборов, то одним из самых перспективных является мажоритарное резервирование [6]. При независимом мажоритарном резервировании вместо каждого прибора устанавливается несколько приборов (минимум три); из их сигналов выбирается средний по положению в вариационном ряду (выборочная медиана). Такое преобразование называется независимым мажорированием по проекциям. Если в каждой группе имеется по три прибора, надежность обеспечивается по отношению к одному (и только одному) отказу в каждой из групп. Однако для обеспечения надежности увеличение числа приборов в комплексе в несколько раз (по крайней мере, в три раза) является необходимым.

Один из возможных путей обеспечения надежности основан на разделении задачи на три этапа: установление факта отказа одного из приборов, выявление отказавшего прибора, исключение его сигнала из дальнейших преобразований. Первый этап может быть выполнен при малой избыточности. Если измерительные оси четырех приборов ориентированы произвольно, но попарно непараллельны, то при отсутствии отказов их выходные сигналы удовлетворяют одному линейному соотношению. Если соотношение не удовлетворяется, то это свидетельствует об отказе одного из приборов (неизвестно какого). Для того чтобы установить, какой именно прибор отказал (второй этап), может быть использован метод избыточных переменных (МИП) [3]. После этого остается еще осуществить коммутацию — отключение отказавших приборов (третий этап).

Надежное определение параметров — составляющих векторных величин — может быть достигнуто не в три, а в один этап. Решение при благо-

приятных условиях математической задачи приближения по модульному критерию некоторых линейных форм к значениям выходных сигналов приборов позволяет надежно определять параметры. При этом реализуется метод наименьших модулей (МНМ), который при определении скалярных величин сводится к мажорированию.

Рассмотрим задачи надежного оценивания кинематических параметров движения твердого тела. К первой группе относятся задачи определения вектора скорости v , угловой скорости ω , линейного ω и углового ϵ ускорений по сигналам соответствующих приборов для измерения линейных и угловых скоростей, линейных и угловых ускорений.

Вторая группа — это задачи определения пространственного распределения векторных величин, т. е. определение параметров линейного векторного поля, например, поля ускорений.

Сформулируем первую группу задач в общем виде. Предполагается, что оцениваемый трехмерный вектор s и n -мерный вектор z результатов измерений связаны следующими линейными соотношениями:

$$z = As + \epsilon. \quad (1)$$

Здесь $A = [a_{ij}]_n^3$ — матрица наблюдений размерности $n \times 3$; ϵ — n -мерный вектор погрешностей измерений. Элементы строки a_i ($i = 1, \dots, n$) матрицы A являются направляющими косинусами измерительной оси i -го прибора в декартовой системе координат.

Если $n > 3$, то система уравнений $z = As$ оказывается в общем случае несовместной, и оценка s^0 величины s определяется как наилучшее в том или ином смысле приближение вектора s к вектору z результатов измерений.

Рассмотрим теперь постановку второй группы задач. Предполагается, что физическая величина F образует векторное поле

$$F(x) = F_0 + Bx. \quad (2)$$

Здесь $F(x) = \{f_i(x)\}$ — трехмерная вектор-функция; $F_0 = \{f_{i0}\}$ — постоянная составляющая поля; B — квадратная матрица размерности 3×3 ; x — вектор текущих значений координат.

Компоненты вектора F_0 и матрицы B , подлежащие оцениванию, будем называть параметрами линейного поля.

Определение линейного поля производится по сигналам приборов, т. е. по скалярным величинам z_i , связанным с компонентами оцениваемого вектора линейными соотношениями:

$$z_i = c_i F_0 + c_i B x_i + \epsilon_i. \quad (3)$$

Здесь $c_i = \{c_{ij}\}$ — трехмерный вектор-строка, компонентами которого являются косинусы углов между измерительной осью i -го прибора и осями координат; $x_i = \{x_{ij}\}$ — координаты точки пространства, в которой производятся измерения этим прибором, ϵ_i — погрешности измерений.

Введем в рассмотрение m -мерный вектор s (в нашем случае $m = 12$), компонентами которого являются элементы матрицы B и компоненты вектора F_0 . Тогда выражение (3) в векторной форме может быть переписано следующим образом:

$$z = As + \epsilon. \quad (4)$$

Отметим, что матрица наблюдений A имеет размеры $n \times m$ и элементы ее определяются векторами c_i и x_i ($i = 1, \dots, n$).

В качестве примера формулируем задачу определения распределения линейных ускорений точек твердого тела. Вектор ускорения $\omega(x_i) = \{\omega_1(x_i),$

$\omega_2(x_i), \omega_3(x_i)$ произвольной точки твердого тела, определяемой вектором x_i , задается следующим образом:

$$\begin{bmatrix} \omega_1(x_i) \\ \omega_2(x_i) \\ \omega_3(x_i) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_{01} \\ \omega_{02} \\ \omega_{03} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -(\omega_3^2 + \omega_2^2) & -\varepsilon_3 + \omega_1\omega_2 & \varepsilon_2 + \omega_3\omega_1 \\ \varepsilon_3 + \omega_1\omega_2 & -(\omega_3^2 + \omega_1^2) & -\varepsilon_1 + \omega_3\omega_2 \\ -\varepsilon_2 + \omega_3\omega_1 & \varepsilon_1 + \omega_1\omega_3 & -(\omega_2^2 + \omega_1^2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{i1} \\ x_{i2} \\ x_{i3} \end{bmatrix}, \quad (5)$$

где $\omega_0 = \{\omega_{01}, \omega_{02}, \omega_{03}\}$ — вектор линейного ускорения полюса;

$\omega = \{\omega_1, \omega_2, \omega_3\}$ — вектор угловой скорости тела;

$\varepsilon = \{\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3\}$ — вектор углового ускорения тела. Поле ускорений определено, если известны векторы $\omega_0, \varepsilon, \omega$.

Если все эти три вектора измеряются непосредственно соответствующими группами приборов, то задача надежного определения поля ускорений распадается на три задачи надежного оценивания каждого из векторов.

Если используются сигналы только линейных акселерометров и все элементы матрицы в (5) являются независимыми, то получим следующие линейные соотношения между оцениваемыми параметрами и результатами измерений:

$$z_i = a_i s + \varepsilon_i \quad (i = 1, \dots, n),$$

где

$$a_i = \{c_{i1}, c_{i2}, c_{i3}, c_{i4}, c_{i5}, c_{i6}, c_{i7}, \dots, c_{i2n}, c_{i2n+1}\};$$

$$s = \{\omega_{01}, \omega_{02}, \omega_{03}, -(\omega_1^2 + \omega_2^2), -\varepsilon_3 + \omega_1\omega_2, \dots, -(\omega_2^2 + \omega_1^2)\}.$$

Если измеряется лишь один из векторов (ε или ω), то задача распадается на задачу надежного оценивания вектора и задачу определения параметров линейного поля. При этом, как ясно из (5), при решении следует учесть, что матрица B будет либо симметричной, либо косимметрической. С математической точки зрения сформулированные группы задач эквивалентны, т. е. они являются задачами надежного оценивания векторных величин по результатам их косвенных измерений.

Надежное оценивание векторных величин обеспечивается при применении метода наименьших модулей, до сих пор не нашедшего широкого применения. Ниже показано, каким образом могут строиться вычислительные процедуры и какие преимущества имеет МНМ. Согласно этому методу, оценка вектора s должна удовлетворять соотношению

$$\sum_{i=1}^n |a_i s^0 - z_i| = \min_s \sum_{i=1}^n |a_i s - z_i|. \quad (6)$$

Оценка, удовлетворяющая условию (6), может быть получена как решение следующей задачи линейного программирования [5]:

$$\min \sum_{i=1}^n (u_i + v_i);$$

$$a_i s - u_i + v_i = z_i \quad (i = 1, \dots, n);$$

$$u_i \geq 0; \quad v_i \geq 0.$$

При этом могут быть использованы как общие методы линейного программирования, так и специальные методы, учитывающие специфику ограничений.

Известно [2], что при определении скалярной величины оценка, удовлетворяющая (6), является выборочной медианой и в этом случае обеспечивается надежное оценивание при одновременном отказе не более, чем половины приборов. При определенных ограничениях на структуру матрицы A оценивание по МНМ векторных величин также будет надежным (при кратности r отказов не выше заданной). По-видимому, впервые этот факт отмечен в работе [2]. Однако заметим, что условия надежного оценивания в этом случае усложняются. Сформулируем эти условия. Введем в рассмотрение множество K r — мерных векторов $p^k = \{p_v^k\}$, удовлетворяющих условиям $p_v^k = \pm 1$; $p_v^{k_1} p_v^{k_2} = -1$, хотя бы для одного v и любых $k_1, k_2 \in K$ ($k_1 \neq k_2$).

Можно показать, что оценивание по МНМ будет надежным при отказе любых r приборов тогда и только тогда, если для каждого множества $j_r = \{i_1, \dots, i_r\}$ номеров отказавших приборов и каждого вектора p^k можно указать вектор y^k , удовлетворяющий условиям:

$$y^k A = 0; \quad (7)$$

$$y_{i_r}^k = p_v^k; \quad (8)$$

$$|y_i| < 1 \quad (\forall i \notin j_r), \quad (9)$$

причем среди векторов a_i ($i \notin j_r$) найдется m линейно независимых.

Применительно к рассматриваемым задачам условия, аналогичные (7), (8), (9), впервые были сформулированы в работе [1].

Сформулированные условия могут быть выполнены при числе приборов, не меньшем, чем $m + 2r$.

В дальнейшем будем говорить о надежном оценивании трехмерного вектора при однократных отказах. В этом случае достаточно построить такие матрицы наблюдений, для которых выполнены условия (7) — (9) при минимальном числе приборов, равном $m + 2$. Если $m = 3$ и $r = 1$, то условиям надежности удовлетворяет, например, матрица A_1 и любая матрица $D = A_1 Q$ (где $Q = [q_{ij}]_3^3$ — произвольная невырожденная матрица), т. е.

$$A_1^T = \begin{bmatrix} \alpha & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \alpha \\ \beta \sin \varphi & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \beta \sin 5\varphi \\ \beta \cos \varphi & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \beta \cos 5\varphi \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\alpha^2 + \beta^2 = 1; \quad \varphi = \frac{2\pi}{5}; \quad \alpha^2 > 0; \quad \beta^2 > 0.$$

Можно указать множество других матриц наблюдений, удовлетворяющих условиям надежности.

Таким образом, для того чтобы оценивание векторной величины было надежным, необходимо задаться некоторой желаемой матрицей наблюдений A , удовлетворяющей (7) — (9). Затем, изменяя ориентацию измерительных осей приборов (а при определении поля — также и координаты точек расположения приборов), следует добиться того, чтобы действительная матрица наблюдений совпала с желаемой. При этом высокой точности совпадения действительной матрицы с желаемой не требуется.

Отметим некоторые свойства оценок, получаемых по МНМ, выявленные в результате статистического моделирования. Сравнение будем производить с методом наименьших квадратов (МНК) и МИП. МНК подробно описан в литературе. МИН получил в последнее время достаточно широкое распространение как алгоритм надежного оценивания векторных величин [3, 4].

При сравнении МНМ и МИП по результатам численных расчетов с использованием метода статистических испытаний предполагалось, что погрешности исправных приборов равномерно распределены на интервале $[-1, 1]$, а отказавший прибор производит измерения с погрешностью, равной $\pm \lambda$ ($\lambda = 1, 2, \dots, 10$), причем все значения равновероятны.

Расчеты показали, что МНМ обладает большей чувствительностью, чем МИП. Так, для матрицы наблюдений, совпадающей с A_3 , согласно МНМ, по казанию отказавшего прибора исключаются из оценки при $\lambda > 3$; в то время как согласно МИП это наблюдалось лишь при $\lambda > 6$.

При сравнении МНМ с МНК предполагалось, что погрешности всех приборов распределены по закону смеси нормальных распределений («схема заморения»):

$$f(x) = \alpha \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{x^2}{2}} + (1-\alpha) \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}}.$$

Если $\sigma = 1$, то МНМ несколько ниже МНК по точности (среднее квадратическое значение для МНМ получается на 25–30% больше). Если $\alpha > 0,95$, то средняя квадратическая погрешность практически остается ограниченной при любом σ . При этом точность оценок, полученных по МНМ, будет выше точности оценок, получаемых по МНК, начиная примерно с $\sigma = 3$. Для $\alpha > 0,9$ можно считать удовлетворительной точность оценок, получаемых по МНМ. Очевидно преимущество этого метода по сравнению с МНК при $\sigma > 3-5$. При $\alpha < 0,85$ оба метода дают плохие оценки.

Отметим, что МНМ позволяет осуществлять надежное оценивание при относительно небольшой избыточности по приборам. Так, для m -мерного вектора при однократных отказах достаточно иметь $m+2$ приборов, в то время как при покомпонентном оценивании — $3m$ приборов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Жесан А. В., Челпанов И. Б. Применение метода наименьших модулей для надежного определения ориентации твердого тела. Труды VI симпозиума по проблеме избыточности в информационных системах. Изд. ЛИАП, Ленинград, 1974, ч. IV, с. 32–36.
2. Челпанов И. Б. Принцип минимума суммы модулей невязок при определении места по линиям положения. — Изв. ВУЗов, «Приборостроение», 1971, № 7, с. 31–36.
3. Управление вычислительными процессами. Под ред. М. Б. Игнатъева. Изд. ЛГУ, Ленинград, 1974, 296, с. с ил.
4. Поттер, Деккерт. Минимальный метод детектирования и идентификации отказов в резервированных системах гироскопов и акселерометров. — «Вопросы ракетной техники», 1973, № 12, с. 21–27.
5. Хедли Дж. Нелинейное и динамическое программирование. М., «Мир», 1967, 506 с.
6. Гильбо Е. П., Челпанов И. Б. Обработка сигналов на основе упорядоченного выбора. М., «Советское радио», 1976, 317 с. с ил.

Поступила в редакцию 19/XII—1975 г.

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ОПОРЫ
ПОВОРОТНОГО СТОЛА ЭТАЛОННОЙ ДВОЙНОЙ
ЦЕНТРИФУГИ

Точность задания ускорения на двойной центрифуге в значительной мере зависит от стабильности расстояния R между осями вращения ротора 1 и поворотного стола 2 (рис. 1). Одним из обязательных условий обеспечения высокой стабильности межосевого расстояния является применение опоры

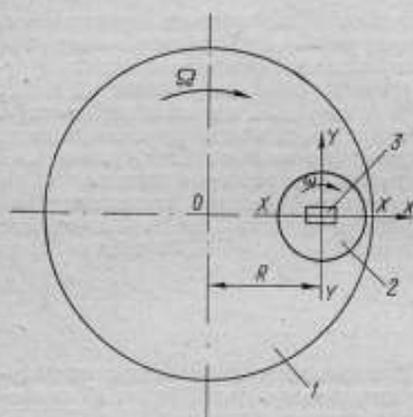


Рис. 1. Схема двойной центрифуги
1 — ротор; 2 — поворотный стол; 3 —
исследуемый акселерометр

стола с малым радиальным биением, низким уровнем виброшумов и минимальным тепловыделением. В настоящее время в прецизионных ротационных установках используют, в основном, опоры качения, гидро- и аэростатические опоры, а в двойных центрифугах — только опоры качения и скольжения. Перечисленным выше требованиям в наибольшей мере удовлетворяют аэростатические опоры. Но их применяют обычно в установках с малыми радиальными нагрузками, в то время как в двойной центрифуге опора стола находится на периферии ротора, где линейные ускорения достигают 100 м/с^2 . В литературе отсутствуют сведения о работе опор этого типа при больших радиальных нагрузках, хотя способы повышения угловой и радиальной жесткости опор известны [1, 2]. Однако реализация любого из способов повыше-

ния жесткости связана с существенным увеличением габаритов и массы опоры, что усложняет не только конструкцию, но и обслуживание установки.

В ЭНИМС (г. Москва) разработана простая по конструкции малогабаритная опора поворотного стола двойной центрифуги [3]. В настоящей работе определены частные погрешности задаваемого на двойной центрифуге ускорения, обусловленные нестабильностью положения шпинделя в опоре при вращении платформы.

Исследуемая опора поворотного стола выполнена по схеме с одним подшипником и двусторонним подпятником (рис. 2). Стол 1, на котором устанавливают приспособление с испытуемым акселерометром, жестко закреплен на шпинделе 2. Шпиндель установлен во втулке 3 и опирается на плиту 4. Подшипник имеет два ряда питающих отверстий, двусторонний подпятник — по одному ряду отверстий с каждой стороны. Восемь питающих отверстий каждого ряда расположены равномерно по окружности. Отверстия выполнены в сменных латунных жиклерах 5; жиклеры подшипника вклеены во втулку, жиклеры подпятника — в нижний торец втулки и верхний торец плиты. Зазоры в двустороннем подпятнике устанавливаются подгонкой проставочного кольца 6.

Сжатый воздух под давлением $6,5 \pm 0,2$ кгс/см² подается в опору по системе трубопроводов и каналам в теле шпинделя опоры ротора. Непосредственно к отверстиям жиклеров воздух поступает по каналам в теле втулки, кольца и плиты. Шпиндель со столом приводится во вращение электродвигателем (на схеме не показан).

Расчет параметров опоры (диаметра питающих отверстий, габаритов диаметра питающих отверстий, габаритов диаметра питающих отверстий, габаритов диаметра питающих отверстий) выполнен в соответствии

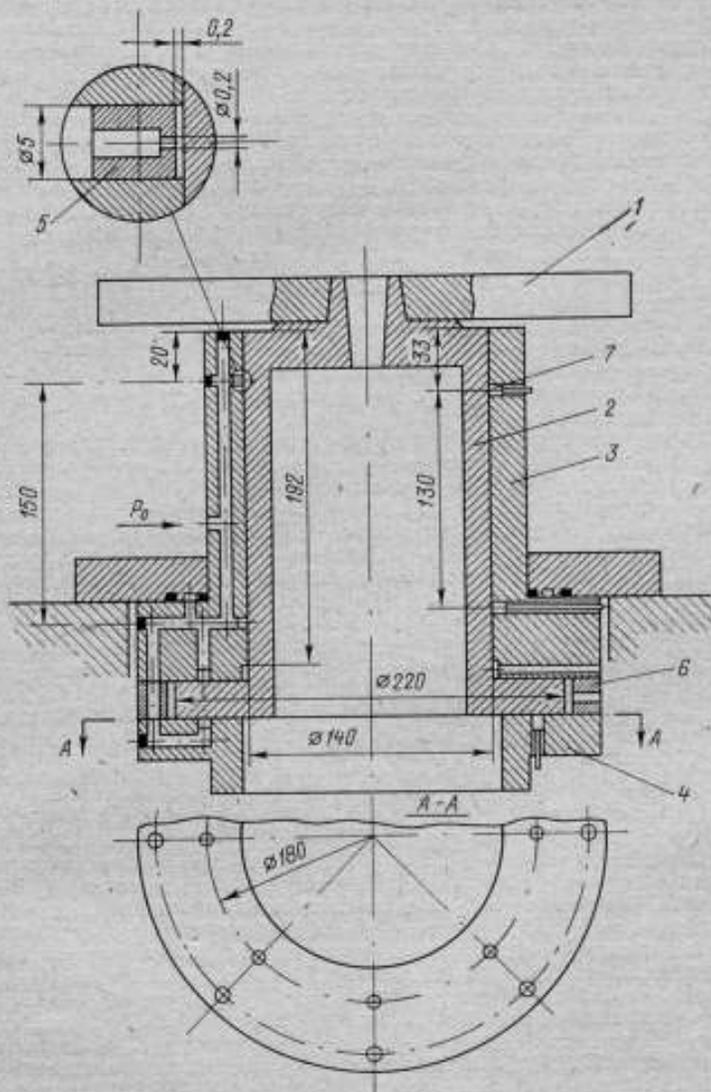


Рис. 2. Схема поворотного стола

1 — стол; 2 — шпиндель; 3 — втулка; 4 — плита; 5 — жиклер; 6 — проставочное кольцо; 7 — емкостный первичный преобразователь перемещения

с методикой, разработанной в [3]. Благодаря отказу от традиционной схемы опоры с двумя подшипниками существенно сократилась высота и масса узла.

В экспериментах использовалась четырехканальная измерительная система с емкостными первичными преобразователями перемещения. Четыре преобразователя 7, встроены в втулку, обеспечивали измерение перемещений шпинделя в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, проходящих через ось вращения стола (см. рис. 1, плоскости XX' и YY'). В каждой плоскости на расстоянии друг от друга $H = 130$ мм горизонтально установлены два преобразователя. Градуировка всех каналов системы производилась после вклеивания преобразователей в опору. Плавное поступательное перемещение шпинделя в пределах зазора осуществлялось при градуировке с помощью специального приспособления.

Статические градуировочные характеристики каждого канала получены при постоянном шаге по перемещению, обработка экспериментальных данных выполнена по способу наименьших квадратов.

В диапазоне перемещений от -4 до $+8$ мкм (знак « \leftrightarrow » соответствует движению шпинделя из центрального положения по направлению от емкостного преобразователя) градуировочные характеристики аппроксимируются линейной функцией вида

$$U_i = U_{0i} + k_i x, \quad (1)$$

где U_i — выходной сигнал i -го канала ($i = 1 + 4$) В; $U_{0i} = U_i$ при $x = 0$; x — перемещение шпинделя, мкм; $k_i = 0,2 + 0,3$ В/мкм — коэффициент преобразования, постоянный при фиксированном i .

Нелинейность и погрешность определения градуировочной характеристики пренебрежимо малы.

Программой было предусмотрено исследование перемещения, перекоса и колебаний шпинделя под действием инерционных сил и моментов. Эксперименты проводились во всех трех режимах работы двойной центрифуги — при вращении только ротора, поворотного стола и совместном вращении платформ. Эти режимы обозначены соответственно I, II и III. В режиме I задается постоянное линейное ускорение, в режиме III — низкочастотное линейное ускорение, режим II является вспомогательным режимом работы установки.

Измерения выполнялись при установившейся угловой скорости вращения платформ, т. е. при фиксированных значениях задаваемого ускорения. В режиме I задавалось ускорение от 1 до 100 м/с², в режиме III — от 1 до 100 м/с² при частотах 0,5—30 Гц. В режиме II поворотный стол вращался с угловыми скоростями от 1 до 60 л/рад/с.

Закономерности перемещения шпинделя четко проявлялись во всех экспериментах; разброс результатов при повторных наблюдениях не превышал 0,2 мкм.

Исследование перемещения и перекоса шпинделя в опоре

Основное внимание в этих экспериментах было уделено исследованию влияния несимметричной нагрузки подшипника на характер перемещения шпинделя. Асимметрия нагрузки появляется из-за того, что центр тяжести установленного на столе приспособления с поверяемым акселерометром находится выше центра подшипника. При вращении ротора инерционная сила, приложенная в центре тяжести, создает так называемый опрокидывающий момент M_0 относительно центра подшипника. Под действием этого момента шпиндель перекашивается в опоре, причем угол перекоса β возрастает с увеличением задаваемого ускорения a . Перекос приводит к увеличению межосевого расстояния R по сравнению с его статическим значением R_0 . Очевидно, что в данном случае погрешность $\Delta R_0 = R - R_0$ также растет с увеличением a .

Для уменьшения перекоса шпиндель и ротор двигателя скомпонованы таким образом, что центр тяжести этого узла находится ниже центра подшипника. Тем самым при вращении ротора создается компенсирующий мо-

мент M_k , противодействующий опрокидывающему моменту M_0 . Это должно было не только исключить опасность аварийного перекоса шпинделя, но и уменьшить значение ΔR_0 во всем диапазоне ускорений. Эксперименты полностью подтвердили правильность такого решения.

Действительно, в режиме I при отсутствии приспособления с акселерометром ($M_0 = 0$) шпиндель перемещается с перекосом, так как $M_k \neq 0$. Угол перекоса β и перемещение $x_{цт}$ центра тяжести вращающихся элементов стола в направлении Ox (см. рис. 1) пропорциональны ускорению (см. рис. 3 и 4, $m = 0$). После установки на стол грузов, имитирующих приспособление с акселерометром, центр тяжести всей подвижной системы сдвигается вдоль оси шпинделя вверх, к центру подшипника. При этом уменьшается результирующий момент $M = M_k - M_0$ относительно центра подшипника и снижается перекош шпинделя. В частности, при массе груза $m = 6$ кг и высоте центра тяжести груза $h \approx 35$ мм над столом максимальное значение $\beta_m \approx 2^\circ$. Изменение $x_{цт}$ в этом случае незначительно.

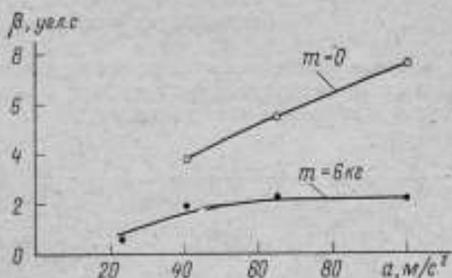


Рис. 3. Зависимость угла перекоса оси шпинделя β от задаваемого ускорения

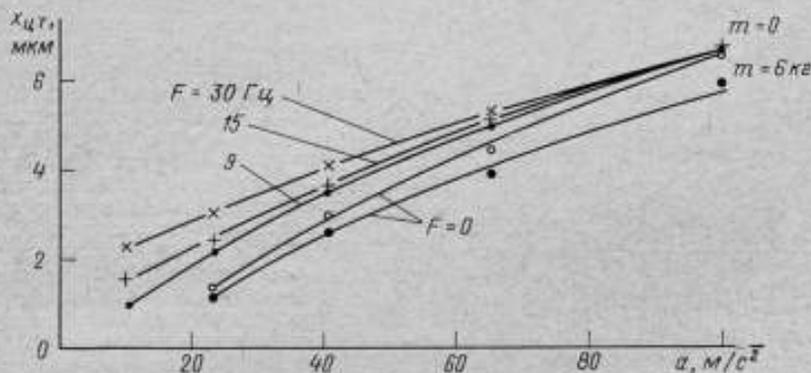


Рис. 4. Изменение положения центра тяжести вращающихся элементов в зависимости от ускорения

Характер смещения шпинделя сохраняется и в режиме III, однако значение $x_{цт}$ при фиксированном a зависит от частоты F ускорения. Исследование перемещения шпинделя в режиме II показало, что при вращении поворотного стола также имеет место сдвиг шпинделя из начального положения, причем $x_{цт} \approx 1,5$ мм при $\omega = 60$ рад/с. Этому значению ω в режиме III соответствует частота $F = 30$ Гц. Сравнивая значения $x_{цт}$ при $F = 0$ и $F = 30$ Гц, нетрудно убедиться, что различие хода кривых обусловлено сдвигом шпинделя при вращении стола.

Изменение межосевого расстояния ΔR_0 из-за сдвига и перекоса шпинделя вычислялось по формуле

$$\Delta R_0 \approx |L\beta - x_{цт}|, \quad (2)$$

где L — расстояние от центра тяжести подвижной системы до измерительной оси исследуемого акселерометра.

Расчеты выполнены для различных значений L от 170 до 185 мм при $m = 6$ кг и $0 \leq F \leq 30$ Гц. Во всех случаях максимальное изменение межосевого расстояния $|\Delta R_0|_m < 5$ мкм.

Исследование колебаний шпинделя в опоре

Масса груза, установленного на поворотный стол, варьировалась в различных экспериментах от 2 до 6 кг, высота центра тяжести любого из этих грузов над столом не превышала 35 мм. Контрольные эксперименты проводились без грузов. Основные результаты экспериментов отражены на рис. 5—8. В частности, осциллограммы (рис. 5) и траектория (12 последовательных положений) оси вращения шпинделя (рис. 8) получены при наличии на поворотном столе груза массой $m = 2$ кг ($h \approx 30$ мм), а графики зависимости размаха колебаний Δ от ω (рис. 6, режим II) и α (рис. 7, режим III, $F = 30$ Гц) — при том же грузе и при отсутствии груза на поворотном столе (на рисунках цифрами 1 и 2 обозначены верхние преобразователи, расположенные в плоскостях XX и YY). В верхней части осциллограмм отмечен каждый оборот стола. Осциллограммы, полученные с помощью нижних преобразователей, отличаются от приведенных на рис. 5, в основном, лишь сдвигом фазы колебаний на 180° . Кривые $\Delta = f(\omega)$ и $\Delta = f(\alpha)$ для всех преобразователей не имеют принципиальных различий.

Из анализа результатов экспериментов следует, что:

а) в режиме I колебания шпинделя отсутствуют;

б) погрешности формы шпинделя (осциллограмма 1') в зоне измерения не превышают 0,5 мкм;

в) при отсутствии груза на поворотном столе шпиндель вращается без колебаний практически во всем диапазоне угловых скоростей ω ;

Рис. 5. Осциллограммы колебаний оси шпинделя

1' — погрешности формы шпинделя; 2' — колебания оси шпинделя (режим II, $\omega = 190$ рад/с); 3' — колебания оси шпинделя (режим III, $\alpha = 100$ м/с², $F = 30$ Гц)

г) малые колебания шпинделя ($\Delta < 0,5$ мкм) в режиме III даже при отсутствии груза обусловлены остаточным дисбалансом вращающихся элементов;

д) увеличение колебаний шпинделя после установки груза вызвано неполной сбалансированностью груза;

е) при появлении колебаний доминирует их систематическая составляющая с периодом, равным времени оборота стола (осциллограмма 2');

ж) при переходе из режима II в режим III характер колебаний практически не изменяется (осциллограммы 2', 3'), размах колебаний (см. рис. 6 и 7, $m = 2 \text{ кг}$) и траектория оси вращения (рис. 8) изменяются незначительно;

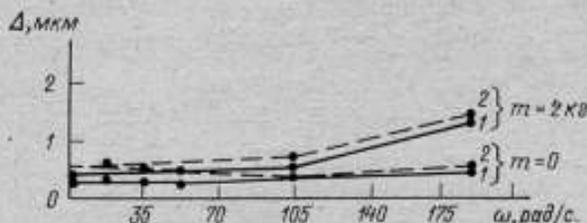


Рис. 6. Зависимость размаха колебаний оси шпинделя Δ от угловой скорости стола (режим II)

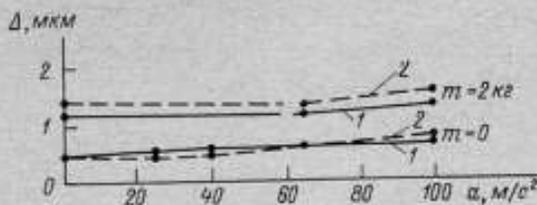


Рис. 7. Зависимость размаха колебаний оси шпинделя от амплитуды ускорения (режим III, $F = 30 \text{ Гц}$)

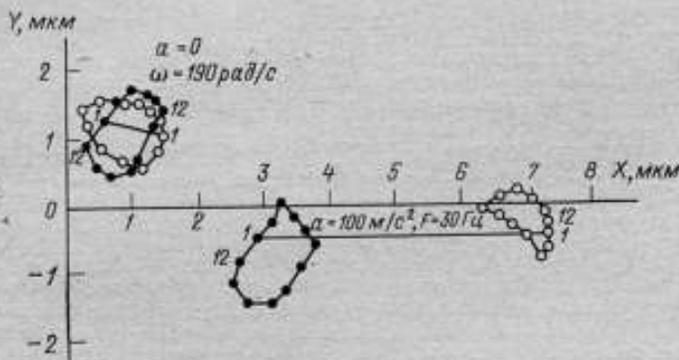


Рис. 8. Траектория оси вращения шпинделя

—●— траектория оси на уровне верхних емкостных преобразователей; —○— траектория оси на уровне нижних емкостных преобразователей

1...12 — последовательные положения оси

з) искажения формы кривой на осциллограммах 2' и 3' обусловлены, главным образом, погрешностями формы шпинделя.

Заметим, что рис. 8 иллюстрирует некоторые закономерности перемещения шпинделя, например, смещение шпинделя из начального положения в режиме II и смещение с перекосом в режиме III.

При вычислении погрешностей задания ускорения учтены все три фактора — постоянное перемещение, перекося и периодические колебания шпинделя в опоре. Можно показать, что максимальные оценки погрешностей амплитуды, начальной фазы и постоянной составляющей ускорения соответственно имеют вид

$$\Delta a_m < \Omega^2 \Delta R_0 + \frac{1}{2} \Omega^2 \Delta R_2 + \Omega \Delta \dot{R}_2 + \frac{1}{2} \Delta \ddot{R}_2, \quad (3)$$

$$\Delta \varphi_m < \frac{1}{2a} (\Omega^2 \Delta R_2 + 2\Omega \Delta \dot{R}_2 + \Delta \ddot{R}_2), \quad (4)$$

$$\Delta a_{em} < \frac{1}{2} \Omega^2 \Delta R_1 + \Omega \Delta \dot{R}_1 + \frac{1}{2} \Delta \ddot{R}_1, \quad (5)$$

где Ω — угловая скорость вращения ротора; a — амплитуда задаваемого ускорения; ΔR_i , $\Delta \dot{R}_i = i\omega \Delta R_i$, $\Delta \ddot{R}_i = i^2 \omega^2 \Delta R_i$ — амплитуды i -й гармоники периодического колебания шпинделя и первых двух ее производных.

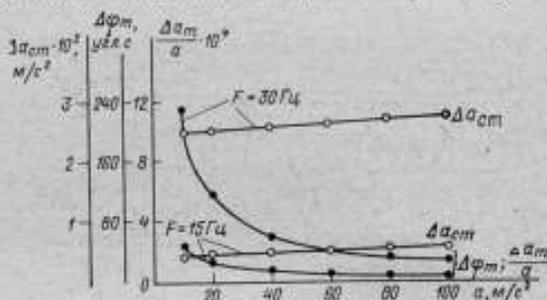


Рис. 9. Зависимость погрешностей амплитуды, начальной фазы и постоянной составляющей ускорения от амплитуды ускорения

$\frac{\Delta a_m}{a}$ — относительная погрешность амплитуды ускорения;
 $\Delta \varphi_m$ — погрешность начальной фазы; $\Delta a_{ст}$ — погрешность постоянной составляющей ускорения

Как следует из формулы (2), значение ΔR_0 зависит от расстояния L между центром тяжести подвижной системы и измерительной осью акселерометра. Нетрудно убедиться, что и другие слагаемые (3)—(5) также зависят от L . Численные значения Δa_m , $\Delta \varphi_m$ и $\Delta a_{ст}$ найдем при $L = 185$ мм. Будем считать, что измерительная ось акселерометра отстоит от плоскости стола на 50 мм.

Для определения оценок ΔR_i , $\Delta \dot{R}_i$ и $\Delta \ddot{R}_i$ проведен гармонический анализ осциллограмм колебаний шпинделя при трех характерных значениях частоты ускорения — 0,5; 15; и 30 Гц. При вычислении максимальных оценок (3)—(5) было принято, что появление высших гармоник обусловлено только колебаниями шпинделя. Кривые зависимости $\frac{\Delta a_m}{a}$, $\Delta \varphi_m$ и $\Delta a_{ст}$ от амплитуды a задаваемого ускорения приведены на рис. 9. В большей части диапазона частот ускорения преобладает составляющая погрешностей (3)—(5), содержащая $\Delta \dot{R}_i$.

Как показало исследование, применение азростатической опоры с одним подшипником и двухсторонним подпятником обеспечивает высокую

точность задания линейных ускорений. Эксперименты подтвердили целесообразность использования аэростатических опор в прецизионных ротационных установках даже при наличии больших радиальных нагрузок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cameron A. Journal Bearings. Пат. США, № 3053589, 1962.
2. Dreyfus G. et al. Fluid Bearing. Пат. США, № 3347605.
3. Минаев А. И. Исследование и разработка типовых конструкций прецизионных аэростатических опор шпиндельных узлов с малыми радиальными нагрузками. Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук. М., ЭНИМС, 1973.

Поступила в редакцию 19/XII—1975 г.

УДК 531.768.082.14.088.3.001.24

И. Х. Ибрагимов

ВТУЗ при ЛМЗ им. ХХII съезда КПСС

ЗАВИСИМОСТЬ ТОЧНОСТИ АКСЕЛЕРОМЕТРА ОТ СПОСОБА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЕГО ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ ОСИ

Векторный характер ускорения a обуславливает специфику соответствующих преобразователей — акселерометров. В частности, при разработке новых типов акселерометров [1] необходимо исследование их направленных свойств. В практике эксплуатации акселерометров их направленные свойства характеризуют заданием измерительной оси — направления относительно корпуса акселерометра, проекцию ускорения на которое измеряет акселерометр. Ниже исследуется влияние на точность акселерометра различных способов определения в процессе градуировки направления его измерительной оси.

Рассмотрим процесс градуировки идеального (в смысле пренебрежимой малости его случайных погрешностей) маятникового акселерометра с постоянной жесткостью k . С акселерометром свяжем систему координат согласно рис. 1. В этом случае уравнение статического равновесия его чувствительного элемента (ЧЭ) имеет вид

$$Rma \cos(\psi - \varphi) = k\varphi \text{ или } \cos(\psi - \varphi) = c\varphi, \quad (1)$$

где

$$c = \frac{k}{Rma_0}.$$

Выходной сигнал акселерометра u считаем пропорциональным углу отклонения его ЧЭ. Изменяя ψ — угол наклона к оси ox вектора ускорения постоянного модуля $a = a_0$, определяем по уравнению (1) зависимость выходного сигнала этого акселерометра от угла φ , т. е. построим его диаграмму направленности.

Диаграмма направленности такого акселерометра (см. рис. 1, б, кривая 1) построена по уравнению (1), где $c = c_0$ выбрано таким, что под действием направленного вдоль ox ускорения модуля a_0 ЧЭ акселерометра поворачивается на угол $\varphi = 5^\circ$. Как следует из (1), максимальный угол поворота маятника $\varphi_m = \frac{1}{c}$. В дальнейшем за выходной сигнал акселерометра

примем

$$u = \frac{\varphi}{\varphi_m} = c\varphi.$$

Определим для данного акселерометра направление измерительной оси и его градуировочную характеристику — связь между значениями выходного сигнала и проекциями ускорения на измерительную ось. Рассмотрим несколько способов решения этой задачи. Для каждого случая найдем σ — среднее квадратическое значение приведенной систематической погрешности измерения, которую определим как разность между действительным и измеренным значением проекции ускорения на измерительную ось. Нормирующий множитель выберем равным $1/a$. Значение σ будем находить для той же совокупности ускорений, которая использовалась при построении диаграммы направленности. Таким образом,

$$\delta_j = \frac{1}{a_0} [a_0 \cos(\psi_j - \theta) - a(u_j)];$$

$$\sigma(\delta) = \sqrt{\frac{1}{21} \sum_{j=-10}^{10} \delta_j^2},$$

где δ_j — значение приведенной систематической погрешности измерения проекции $\bar{a}_j = (a_0 \cos \psi_j - a_0 \sin \psi_j)$ на измерительную ось; θ — угол наклона приспаянной измерительной оси к ox , $u_j = u(\psi_j)$ — известное значение выходного сигнала акселерометра.

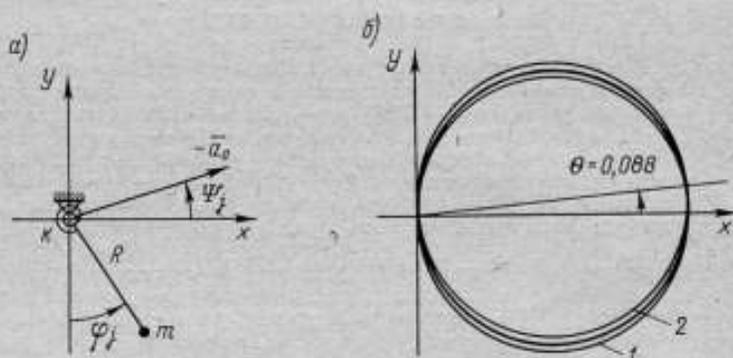


Рис. 1. Расчетная схема (а) и диаграмма направленности (б) исследуемого акселерометра с аппроксимациями по способам «максимальной» (кривая 2) и «нулевой чувствительности» (кривая 1)

Рассмотрим пять способов определения измерительной оси акселерометра.

1. Способ «максимальной чувствительности» (связь a с u линейна). За направление измерительной оси акселерометра принимается направление, при котором выходной сигнал акселерометра максимален, а вектор ускорения совпадает с этим направлением. Как следует из (1), направление максимальной чувствительности $\theta = \varphi_m^* = \frac{1}{c} = 0,088$. Масштабный множитель f в уравнении $a = fu$ выберем с учетом того, что выходной сигнал акселерометра u максимален, когда $a = a_0$, т. е. $f = a_0$.

Таким образом, градуировочная характеристика примет вид

$$a = fu = a_0 u,$$

где a — измеренное значение проекции \bar{a} на измерительную ось, направленную под углом θ к оси ox . Использование полученной градуировочной характеристики приводит к систематической погрешности измерения

$$\delta_{1j} = \cos(\psi_j - \theta) - u_j,$$

представленной на рис. 2, а (кривая 4). Среднее квадратическое значение ее

$$\delta_1 = 0,0426, \text{ а } \delta_{1 \max} = 0,0872.$$

2. Способ «нулевой чувствительности» (связь a с u линейна). Направление измерительной оси отыскивают как перпендикуляр плоскости, являющейся геометрическим местом направлений \bar{a} , для которых выходной сигнал акселерометра равен нулю. В этом случае $\theta = 0$, а

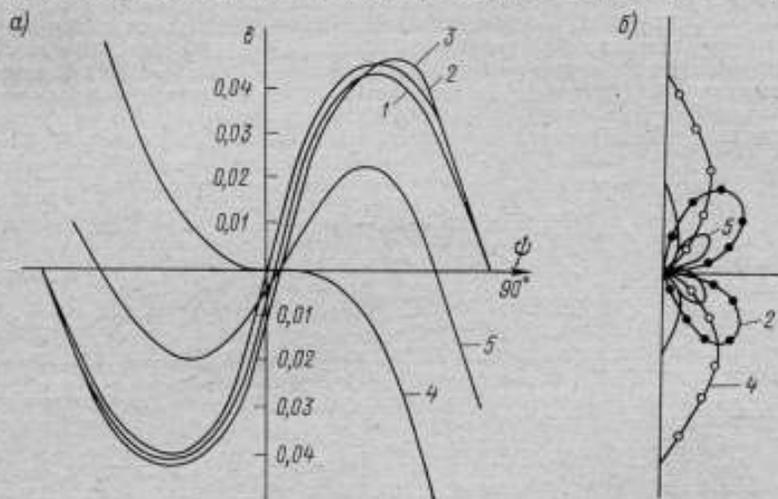


Рис. 2. Графики систематической погрешности исследуемого акселерометра в прямоугольной (а) и полярной (б) системе координат

градуировочная характеристика по виду одинакова с характеристикой, описанной выше, т. е. $a = a_0 u$, где a — измеренное значение проекции на измерительную ось, направленную вдоль ox .

При этом приведенная систематическая погрешность (см. рис. 2, а, кривая 1)

$$\sigma_{2j} = \cos \psi_j - u_j,$$

а ее среднее квадратическое значение $\sigma_2 = 0,033$ и $\delta_{2 \max} = 0,0451$.

3. Способ «нулевой чувствительности» (связь a с u находится заданием $0 \leq a \leq a_0$ вдоль ox). Этот способ соответствует тому подходу, когда градуировку проводят ускорениями различных значений, но направленными вдоль линии, принятой за измерительную ось. Для рассматриваемого акселерометра направление измерительной оси также принимается вдоль ox . Градуировочную характеристику получаем из (1), полагая $\psi = 0$,

$$a = a_0 u / \cos \Phi.$$

Отсюда приведенная систематическая погрешность

$$\delta_{3j} = \cos \psi_j - \frac{u_j}{\cos \psi_j},$$

а ее среднее квадратическое значение $\sigma_3 = 0,0335$ и $\delta_{3\max} = 0,0466$ (рис. 2, а, кривая 2).

4. Способ «нулевой чувствительности» (связь a с i по методу наименьших квадратов (МНК). Здесь также $\theta = 0$, а коэффициенты в градуировочной характеристике $a = a_0 (f_1 u + f_2 u^2 + f_3 u^3)$, вычисленные по МНК, равны $f_1 = 1,004$, $f_2 = 0,00773$, $f_3 = -0,0162$. При этом приведенная систематическая погрешность

$$\delta_{4j} = \cos \psi_j - f_1 u_j - f_2 u_j^2 - f_3 u_j^3$$

(рис. 2, а, кривая 3), а ее среднее квадратическое значение $\sigma_4 = 0,030$ и $\delta_{4\max} = 0,0459$.

5. Рассмотрим случай, когда направление измерительной оси и коэффициенты связи a с i находится по методу МНК. Как показано в работе [2], параметрами, подлежащими определению при градуировке акселерометра, являются направляющие косинусы измерительной оси в системе координат, жестко связанной с установочными элементами корпуса акселерометра, и коэффициенты, характеризующие связь между проекциями измеряемого ускорения на эту ось и соответствующими значениями выходного сигнала акселерометра. В этом случае решение системы нормальных уравнений дает $\theta = 0,0337$, $f_1 = 0,983$, $f_2 = 0,0557$, $f_3 = -0,0397$. Отсюда приведенная погрешность

$$\delta_{5j} = \cos(\psi_j - \theta) - f_1 u_j - f_2 u_j^2 - f_3 u_j^3$$

(см. рис. 2, а, кривая 5), а ее среднее квадратическое значение $\sigma_5 = 0,0177$ и $\delta_{5\max} = 0,0228$.

Сравнение способов градуировки (см. рис. 2, а) показывает, что:

1) способ «максимальной чувствительности» дает наилучшую аппроксимацию в области максимальных значений выходного сигнала, а способ «нулевой чувствительности» — в области его малых значений;

2) введение полиномиальной связи a с i и несколько повышает точность аппроксимации (но в данном случае, в силу линейности рассматриваемого акселерометра, несущественно);

3) только определение коэффициентов полиномиальной связи a с i и направления измерительной оси методом МНК позволяет существенно уменьшить σ , т. е. заметно повысить точность измерений.

Рассмотрим влияние на σ величины максимального углового отклонения ЧЭ маятникового акселерометра. В таблице даны значения максимального углового отклонения маятника φ_m , угла θ между измерительной осью и осью ox , а также значение σ при $c_1 = c_0$, $c_2 = 2c_0$, $c_3 = 5c_0$ для случаев, когда направление измерительной оси определяется по способу «нулевой чувствительности» или по МНК.

Данные таблицы показывают, что хотя с увеличением c (что соответствует увеличению k или уменьшению a_0) абсолютное значение σ уменьшается, но способ определения измерительной оси по МНК дает примерно в 1,7 раза меньшие значения σ , чем по способу «нулевой чувствительности».

	φ_m	θ	σ	σ_2/σ_3
c_1	0,0876	$\frac{0,0000}{0,0337}$	$\frac{0,0319}{0,0176}$	1,81
c_2	0,0438	$\frac{0,0000}{0,0168}$	$\frac{0,0152}{0,00898}$	1,70
c_3	0,0175	$\frac{0,0000}{0,00673}$	$\frac{0,00612}{0,0036}$	1,70

Примечание: В числителе приведены значения θ и σ , определенные по способу «нулевой чувствительности», в знаменателе — по МНК.

Исследование различных способов определения направления измерительной оси и статической градуировочной характеристики на примере идеального маятникового акселерометра показывает, что точность акселерометра существенно зависит от выбора направления его измерительной оси. Предложенная в работе [2] методика обеспечивает достаточно высокую точность аппроксимации маятникового акселерометра предложенной моделью и может быть использована для маятниковых акселерометров с $\varphi_{\max} \leq 1^\circ$ в диапазоне измерений; при этом относительное значение σ должно быть порядка 0,01.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иорш Ю. И. Виброметрия, М., Машгиз, 1963, 771 с. с ил.
2. Ибрагимов И. Х. Направленные свойства и градуировка акселерометра. Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 118—124.

Поступила в редакцию 19/XII—1975 г.

УДК 531.768.081.1 : 528.27

И. Х. Ибрагимов, С. А. Яушева
ВНИИМ

ВТУЗ при ЛМЗ им. ХХII съезда КПСС

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТИ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ МАЛЫХ УСКОРЕНИЙ МЕТОДОМ ПОВОРОТОВ АКСЕЛЕРОМЕТРА В ПОЛЕ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ЗЕМЛИ

Настоящее исследование проводилось в процессе подготовки к созданию эталонной установки для воспроизведения малых значений постоянного линейного ускорения. Экспериментально исследовались метод одинарного и метод двойного поворота. По первому методу воспроизведение малых значений ускорения осуществляется с помощью поворотной платформы [1], имеющей горизонтальную ось вращения, при этом воспроизводимое ускорение $a = g \sin \varphi$ (g — ускорение свободного падения, φ — угол наклона платформы к горизонтальной плоскости); по методу двойного поворота [2] $a = -g \sin \alpha \sin \beta$ (α и β — углы последовательного поворота платформы вокруг двух взаимно перпендикулярных осей, одна из которых вертикальна, а другая лежит в горизонтальной плоскости).

Теоретический анализ точности данных методов [3] показал, что точность воспроизведения малых значений ускорения ограничена не только точностью задания углов поворота, но и отклонениями осей поворота от расчетного положения. Существенную роль для обоих методов играет частная погрешность, вызванная начальной негоризонтальностью платформы. Это приводит к соответствующей начальной негоризонтальности измерительной оси градуируемого акселерометра. Полученные в работе [3] выражения для средних квадратических погрешностей воспроизведения малого ускорения для методов одинарного и двойного поворота имеют вид

$$\sigma_1 = cg \sqrt{1 - n^2} \sqrt{1 + \kappa^2}; \quad \sigma_2 = cg \sqrt{1 - n} \sqrt{4n + \kappa^2},$$

где $n = \frac{a}{g}$, $\kappa^2 = \frac{\gamma_a^2}{c}$; γ_a — среднее квадратическое значение начальной негоризонтальности измерительной оси акселерометра; c — среднее квадратическое значение погрешности задания углов поворота и угловой ориентации осей вращения.

Отношение $\lambda = \frac{\sigma_2}{\sigma_1} = f(\kappa, n)$ служит оценкой точности сравниваемых методов.

Экспериментальное исследование точности методов проводилось на оптической делительной головке типа ОДГ-5Э с укрепленной в ней тщательно обработанной установочной площадкой. В качестве образцового средства измерения фактических углов наклона площадки к горизонту используется прецизионный уровень (модель 107) с погрешностью измерений не более $2''$. Для исключения частной погрешности, связанной с начальной негоризонтальностью установочной площадки, ее первоначальное положение контролировалось и, в случае необходимости, корректировалось в течение всего эксперимента.

При исследовании точности метода одинарного поворота на первом этапе проверялась горизонтальность оси вращения установочной площадки, характеризуемая углом γ (см. рис. 1). Для определения угла γ использовался следующий методический прием. Можно показать, что при повороте площадки вокруг оси **OB** на малый угол φ отсчет по уровню, ориентированному вначале параллельно проекции оси вращения на плоскость площадки, окажется равным

$$x = \gamma \frac{\varphi^2}{2} + \theta\varphi.$$

Поэтому, наклоня площадку на угол $\pm\varphi$, значение которого выбрано равным $50''$, и снимая соответствующие показания уровня x_+ и x_- , получим систему уравнений измерения, из которой находим

$$\gamma = \frac{x_+ + x_-}{\varphi^2}; \quad \theta = \frac{x_+ - x_-}{2\varphi}.$$

В данном эксперименте получено $\gamma \approx 17''$, $\theta \approx 1'25''$. Эти параметры необходимы для оценки систематической погрешности воспроизведения ускорения v_1 методом одинарного поворота на ОДГ и аналогичных устройствах. При v_1 , превышающих заданное значение, эти параметры могут использоваться для коррекции положения установочной площадки.

На втором этапе исследовалась точность воспроизведения с помощью ОДГ малого угла поворота установочной площадки. Задаваемый угол наклона β выбирался равным $1'$, что соответствует ускорению $a = 2,91 \cdot 10^{-4} g$. Фактическое значение угла β измерялось с помощью уровня. Можно показать, что при γ и θ' , отличных от нуля, отсчет по уровню оказывается равным

$$x = \sin \theta' \cos \gamma \sin \gamma (1 - \cos \beta) - \cos \theta' \cos \gamma \sin \beta,$$

где θ' — угол между осью уровня и перпендикуляром к проекции оси вращения на плоскость установочной площадки.

Учитывая малость углов γ и θ' , получаем в данном случае $x = -\beta$, и систематическая погрешность воспроизведения ускорения методом одинарного поворота, связанная с углами γ и θ' , оказывается пренебрежимо малой.

Для реализованного с помощью ОДГ метода одинарного поворота значения случайной и систематической составляющих погрешности воспроизведения оказались равными $\sigma_1 = 0,9 \cdot 10^{-5}$ и $v_1 = 0,8 \cdot 10^{-5}$, т. е. величинами того же порядка, что и погрешности использованного уровня.

При исследовании точности метода двойного поворота на первом этапе также проверялись и корректировались положения осей вращения и начальная негоризонтальность установочной площадки. Особенностью этого метода является наличие дополнительной оси вращения, расположенной вертикально. Проверка и корректировка ее вертикальности осуществлялась следующим способом. Можно показать, что при повороте установочной площадки вокруг оси **OA** на угол α (см. рис. 2) отсчет по уровню, ориентированному

вначале параллельно направлению OX' , при котором уровень дает наибольшее показание, равное $\eta + \xi$, определяется выражением

$$N(\alpha, \xi, \eta) = \eta + \xi - \eta \cos(\alpha_0 + \alpha) + \eta \cos \alpha_0$$

или

$$N(\alpha, \xi, \eta) = \eta + \xi + \eta_{x'}(1 - \cos \alpha) + \eta_{y'} \sin \alpha,$$

где α_0 — угол между горизонтальной проекцией оси вращения и направлением OX' ; $\eta_{x'} = \eta \cos \alpha_0$, $\eta_{y'} = \eta \sin \alpha_0$ — проекции вектора OA на направление OX' и перпендикулярное ему.

Следовательно, вращая площадку с уровнем вокруг оси OA и снимая

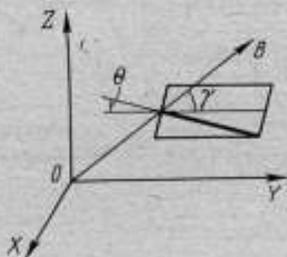


Рис. 1. Установочная площадка с горизонтальной осью вращения

OB — ось вращения; γ — малый угол, составляемый осью вращения с горизонтальной плоскостью; θ — малый угол, составляемый осью уровня и проекцией оси вращения на плоскость площадки

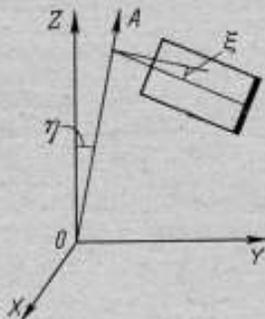


Рис. 2. Установочная площадка с вертикальной осью вращения

OA — ось вращения; малый угол η — отклонение оси вращения от вертикали; малый угол ϵ — отклонение плоскости площадки от плоскости, перпендикулярной оси вращения

через каждые 90° поворота его показания, получаем систему уравнений измерения.

$$N_0 = \eta + \xi; \quad N_{90} = \eta + \xi + \eta_{x'} + \eta_{y'}; \quad N_{180} = \eta + \xi + 2\eta_{x'}; \\ N_{270} = \eta + \xi + \eta_{x'} - \eta_{y'},$$

из которой имеем:

$$\eta_{x'} = \frac{N_{270} - N_{90}}{2}; \quad \eta_{y'} = \frac{2N_{180} - N_{90} - N_{270}}{2};$$

$$\xi = N_0 - \frac{1}{2} \sqrt{[N_{270} - N_{90}]^2 + [2N_{180} - N_{90} - N_{270}]^2}.$$

Эти значения $\eta_{x'}$, $\eta_{y'}$, ξ использовались для оценки негоризонтальности установочной площадки и последующей корректировки вертикальности оси вращения: до настройки значения составляли $\eta_{x'} = 2,1 \cdot 10^{-3}$ ($\sim 7'$); $\eta_{y'} = 2,6 \cdot 10^{-4}$ ($\sim 1'$); $\xi = 1,5 \cdot 10^{-4}$ ($\sim 30''$); после корректировки $\eta_{x'} = 8 \cdot 10^{-5}$; $\eta_{y'} = -1,2 \cdot 10^{-4}$.

В методе двойного поворота при значениях η и ξ , отличных от нуля, возникает систематическая погрешность воспроизведения малых значений ускорения, детальный анализ которой здесь не проводится. Другим источни-

ком систематической погрешности является неперпендикулярность осей вращения.

Чтобы сравнить точностные возможности обоих методов, при двойном повороте задавалось то же значение ускорения $a = 2,91 \cdot 10^{-4} g$. Это значение ускорения при равенстве углов α и β достигается при $\alpha = \beta = 58'50''$. Для удобства отсчета значения углов по шкалам ОДГ в эксперименте использовались $\alpha = \beta = 1^\circ$, что вполне допустимо, так как вносимая погрешность при этом не превысит погрешность использованного уровня.

При исследовании точности воспроизведения углов поворота, равных 1° , было получено следующее: $\sigma_\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5}$; $v_\alpha = 2,5 \cdot 10^{-5}$; $\sigma_\beta = 2,9 \cdot 10^{-5}$; $v_\beta = 30 \cdot 10^{-5}$. В силу конструктивных особенностей ОДГ погрешности воспроизведения угла β оказались больше.

Далее проводилось исследование точности воспроизведения значений ускорения $2,91 \cdot 10^{-4} g$ методом двойного поворота. Значения случайной и систематической составляющих погрешности воспроизведения оказались равными $\sigma_2 = 6,0 \cdot 10^{-6}$, $v_2 = 14,0 \cdot 10^{-6}$.

Значения σ_2 и v_2 обусловлены только собственной погрешностью уровня ($\sim 1 \cdot 10^{-5}$), поскольку на основе ранее полученных σ_α и σ_β среднее квадратическое значение случайной составляющей погрешности воспроизведения ускорения, равного $2,91 \cdot 10^{-4} g$, методом двойного поворота составит

$$\sigma_2 = \sqrt{\beta^2 \sigma_\alpha^2 + \alpha^2 \sigma_\beta^2} = 7,0 \cdot 10^{-7}.$$

Из экспериментальных данных следует, что метод двойного поворота позволил получить результаты, сравнимые по точности с методом одинарного поворота, но при более грубом задании углов в первом методе. Таким образом, подтверждаются выводы работы [3], а именно: 1) возможность расширения диапазона воспроизведения ускорения в области малых значений; 2) при одинаковых значениях воспроизводимого ускорения возможность значительного уменьшения требований к точности задания и измерения углов поворота в методе двойного поворота.

Точность воспроизведения малых углов наклона установочной площадки к горизонту и, следовательно, малых значений ускорения, необходимая для образцовых средств измерения иного разряда, может быть достигнута на измерительных устройствах, выпускаемых серийно, например, на ОДГ-5Э.

Результаты данной работы позволяют прийти к выводу о том, что при использовании более совершенной установки и более точной измерительной аппаратуры методом поворотов можно достичь высокой точности воспроизведения ускорения, необходимой в эталонной установке. Примененные методические приемы могут быть использованы при разработке и исследовании образцовых установок, основанных на методе поворотов акселерометра в гравитационном поле Земли.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иорин Ю. И. Виброметрия. М., Машгиз, 1963, 771 с. с ил.
2. Синельников А. Е. Способ проверки акселерометров. Авт. свид. № 355569. — «Бюлл. изобр.», 1972, № 31.
3. Блантер Б. Э., Ибрагимов И. Х., Синельников А. Е. Анализ погрешности градуировки акселерометров методом поворота в гравитационном поле Земли. Труды метрологических институтов СССР, вып. 139 (199), 1972, с. 45—50.

Поступила в редакцию 19/XII 1975 г.

ИССЛЕДОВАНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ
УГЛОВОЙ СКОРОСТИ РОТОРА УСТАНОВКИ ДЦ-1

Нестабильность угловой скорости ротора двойной центрифуги является одним из основных источников погрешности задаваемого ускорения. Как известно, нестабильность угловой скорости обусловлена колебаниями момента сопротивления и момента двигателя, пульсациями питающего напряжения и некоторыми другими факторами.

Для повышения стабильности угловой скорости при разработке установки были применены прецизионные замкнутые астатические системы регулирования с приводными двигателями постоянного тока*, аэродинамические опоры, уменьшающие колебания момента сопротивления, введено ограждение (кожух), повышающее стабильность момента аэродинамического сопротивления вращающихся узлов установки.

Цель данной работы — исследование параметров угловой скорости ротора. В экспериментах измерялось время T поворота ротора на заданный угол с номинальным значением φ_n от $9'$ до 360° . Исследование проводилось во всем диапазоне регулирования угловой скорости Ω ротора от 3 до 16 рад/с. Измерения выполнялись при установившихся значениях Ω (при работе системы электропривода в «синхронном» режиме). Схема измерительной системы изображена на рис. 1.

При вращении ротора сигнал со считывающего устройства дискретного магнитного преобразователя 1 угла поворота ротора поступает на входы делителей частоты 2 и 3 (типа ИКЗ-15). Частотомер 4 (типа ЧЗ-34) измеряет промежутки времени между импульсами с делителя 2.

Номинальное значение задаваемого угла $\varphi_n = k_1 \varphi_0$ (где $\varphi_0 = 9'$ — шаг дискретности преобразователя 1; k_1 — коэффициент деления делителя 2). Импульсы делителя частоты 3, осуществляя внешний запуск частотомера, позволяют производить измерения на одном и том же, либо на соприкасающихся участках шкалы преобразователя. В первом случае коэффициент деления делителя $k_2 = kn$, во втором $k_2 = kn + k_1$ (где $n = 2400$ — количество магнитных меток шкалы преобразователя; $k = 1, 2, \dots$).

Если наблюдения при измерении T проводятся на различных участках шкалы преобразователя, то в общем случае уравнения косвенных измерений угловой скорости можно представить в виде

$$\Omega_i = \frac{\varphi_i}{T_i} = \frac{\varphi_n + \Delta\varphi_{1i} + \Delta\varphi_{2i}}{T_n + \Delta T_{1i} + \Delta T_{2i}}$$

Здесь $\Delta\varphi_{1i}$ — систематическое отклонение заданного угла φ_i от φ_n , различное на разных участках шкалы преобразователя; $\Delta\varphi_{2i}$ — случайное отклонение φ_i от φ_n ; T_n — время поворота ротора на угол φ_n при заданном значении $\Omega = \Omega_n = \text{const}$; ΔT_{1i} , ΔT_{2i} — систематические и случайные от-

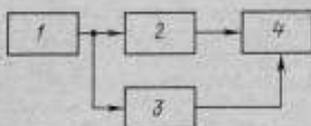


Рис. 1. Схема измерительной системы

* См. статью Г. А. Смирнова, В. В. Андрущук, С. А. Ковчина. Прецизионная установка для воспроизведения постоянных ускорений. — «Измерительная техника», 1970, № 12, с. 31—32.

клонения T_i от T_n , обусловленные соответствующими отклонениями как φ_i , так и Ω_i от номинальных значений.

Математическое ожидание и дисперсия равны

$$m_{\Omega} \approx \Omega_n \left(1 + \frac{m_{\varphi_i}}{\varphi_n} - \frac{m_{T_i}}{T_n} - \frac{m_{\varphi_i T_i} + 2\sigma_{\varphi_i} \sigma_{T_i}}{\varphi_n T_n} + \frac{\sigma_{T_i}^2 + m_{T_i}^2}{T_n^2} \right);$$

$$D_{\Omega} = \Omega_n^2 \left[\frac{\sigma_{\varphi_i}^2 + \sigma_{\varphi_i}^2}{\varphi_n^2} + \frac{\sigma_{T_i}^2 + \sigma_{T_i}^2}{T_n^2} - \frac{2(m_{\varphi_i T_i} + r\sigma_{\varphi_i} \sigma_{T_i})}{\varphi_n T_n} \right],$$

где m_{Q_i} — математическое ожидание $\Delta Q_i = Q_i - \bar{Q}$;

$$\Delta \varphi_{ii}' = \Delta \varphi_{ii} - m_{\varphi_i}; \quad \Delta T_{ii}' = \Delta T_{ii} - m_{T_i}; \quad \sigma_{Q_i}^2 = M \{ (\Delta Q_{ii} - m_{Q_i})^2 \};$$

r — коэффициент корреляции.

Определение оценок Ω_0 и D_{Ω} , свободных от систематических погрешностей задания углов, возможно лишь при одновременном измерении φ_i и T_i . Однако применение этого способа затруднено из-за отсутствия прецизионных средств измерения углов поворота, аттестованных в широком диапазоне угловых скоростей. Поэтому использовалась следующая методика определения параметров угловой скорости:

а) исследование преобразователя угла поворота ротора проведено в узком диапазоне угловых скоростей и полученные оценки экстраполированы в область больших значений угловой скорости;

б) исследование погрешностей времени поворота на угол с заданным номинальным значением выполнялось без учета погрешностей задания угла поворота;

в) смещение среднего значения угловой скорости относительно ее номинального значения и дисперсия угловой скорости оценивались по максимуму.

Ниже приведены основные результаты этого исследования.

Оценка влияния изменения внешних условий на точность угловой скорости. Это влияние определялось путем проверки статистической подконтрольности измерений, выполненных в течение длительного промежутка времени (более 1 ч). Номинальные значения задаваемых углов были равны $9'$, $1^{\circ}30'$, $7^{\circ}30'$, 30° , 90° , 360° . Для каждого значения φ_n измерение T во всем диапазоне Ω проводилось на одном и том же участке шкалы преобразователя при постоянной скважности $\gamma = k_2/k_1$. Серии наблюдений выполнялись при $\Omega = 3, 6, 8, 10$ и 16 рад/с. Число наблюдений в серии $m = 50$. Кроме того, при $\varphi_n = \pi/2$ и $\Omega = 3, 6, 8$ и 10 рад/с проведены серии по 500 наблюдений.

Гипотеза о нормальности распределения отклонений $\Delta T_i = T_i - \bar{T}$ ($\bar{T} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m T_i$) в каждой серии может быть принята при уровне значимости $q = 0,1$.

При проверке статистической подконтрольности измерений результаты наблюдений каждой серии были разбиты на 10 групп. Проверка с помощью критериев М. Барлетта и Р. Фишера показала, что группы однородны при $q = 0,1$.

Как показали эксперименты, изменение систематической погрешности угловой скорости пренебрежимо мало в течение длительного промежутка времени. Это позволило в дальнейшем проводить сравнительный анализ результатов измерений, полученных в разное время.

Определение периода систематических колебаний угловой скорости. Предварительный анализ источников погрешностей показал, что период систематических колебаний угловой скорости должен быть равен времени оборота ротора T_0 . Поиск составляющих Ω

с периодом $T_n \neq \frac{1}{l} T_0$ ($l = 1, 2, \dots$) проводился путем проверки статистической подконтрольности измерений, выполненных при различной скважности γ . Зависимость результатов измерений от скважности может появиться лишь при $T_n \neq \frac{1}{l} T_0$.

В экспериментах измерялось время оборота ротора ($k_1 = 2400$) при $\Omega_n = 3, 8, 12$ и 16 рад/с и скважности $\gamma = 2, 3, 4, 5, 6, 7, 11, 13$. Для каждого значения Ω и γ проводилось две серии по 50 наблюдений. Проверка описанным выше методом показала, что при уровне значимости $q = 0,1$ серии, проведенные на одной и той же угловой скорости, однородны; это свидетельствует об отсутствии периодических колебаний Ω с периодом, не равным $\frac{1}{l} T_0$.

Для определения периода колебаний Ω измерялось время поворота ротора на углы с номинальными значениями 30° и $7^\circ 30'$. Наблюдения производились последовательно на всех соприкасающихся участках шкалы преобразователя угла для $\Omega = 3, 8, 12, 16$ рад/с. При каждом значении Ω было выполнено km наблюдений ($m = \frac{360^\circ}{\Phi_n}$; $k = 20$ и 5 соответственно для $\Phi_n = 30^\circ$ и $7^\circ 30'$). При анализе наблюдений обнаружено периодическое чередование знаков и численных значений отклонений $\Delta T_i = T_i - \bar{T}$, где $\bar{T} = \frac{1}{km} \sum_{i=1}^{km} T_i$. Каждое отклонение «привязано» к определенному участку шкалы преобразователя угла, а период колебаний результатов равен T_0 , что подтверждает выводы предварительного анализа.

Случайные колебания угловой скорости. Качественный анализ схемы установки и результатов предшествующих экспериментов дает основание предположить, что оценки результатов наблюдений при измерении времени поворота на заданный угол не зависят от участка шкалы, на котором производится наблюдение. Для проверки этого предположения результаты наблюдений, проведенных при $\Phi_n = 30^\circ$, были распределены на m групп, в каждую из которых включались результаты наблюдений на одном и том же участке шкалы. В этом случае систематические отклонения задаваемого угла и результатов наблюдений T постоянны внутри каждой группы. Проверка показала, что гипотеза о нормальности отклонений $\Delta T_{ji} = T_{ji} - \bar{T}_j$ ($j = 1, 2, \dots, m$; $i = 1, 2, \dots, k$) во всех группах (т. е. при определенном Ω) согласуется с данными наблюдений при $q = 0,1$ и рассеивание оценок дисперсий групп $S_j^2 = \frac{1}{k-1} \sum_{i=1}^k \Delta T_{ji}^2$ незначимо при доверительной вероятности $\alpha = 0,95$.

Многочисленные наблюдения, выполненные при $\Phi_n = 9^\circ, 45^\circ, 1^\circ 30', 7^\circ 30', 30^\circ, 90^\circ$ и 360° на 3–5 участках шкалы во всем диапазоне изменения Ω , подтвердили вывод о равномерности групп наблюдений, проведенных на определенном участке шкалы при $\Phi_n > \Phi_0$. Поэтому для оценки случайных колебаний угловой скорости достаточно провести наблюдения на любом (но фиксированном) участке шкалы.

Графики $\sigma_{T_i} = \frac{S_{T_i}}{T} = f(\Omega)$ построены на рис. 2 и 3. Для каждого значения Φ_n наблюдения выполнялись на фиксированном участке шкалы во всем диапазоне Ω . Как видно, значения оценки среднего квадратического отклонения S_{T_i} быстро уменьшаются с ростом Ω , но во всем диапазоне угловых скоростей увеличиваются с уменьшением Φ_n . Последнее может быть объяснено увеличением относительной нестабильности скорости при уменьшении

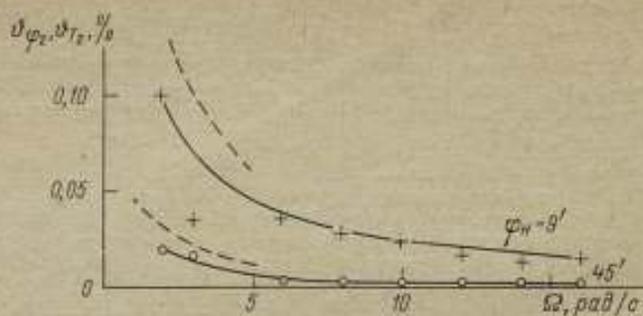


Рис. 2. Кривые зависимости погрешностей $\Delta\tau_2$ и $\Delta\varphi_2$ от угловой скорости для фиксированного участка шкалы преобразователя

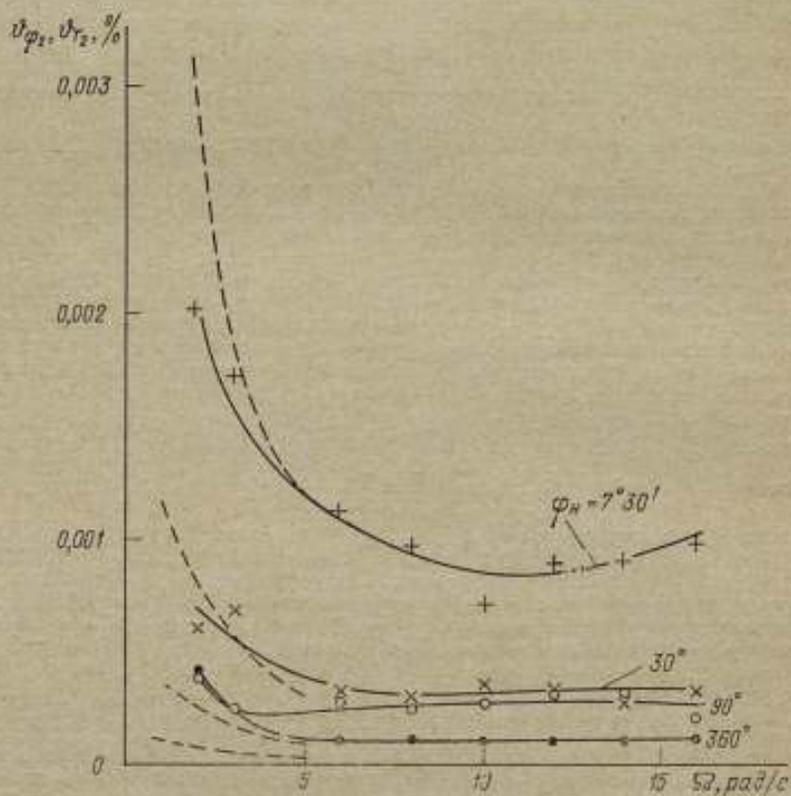


Рис. 3. Кривые зависимости погрешностей $\Delta\tau_2$ и $\Delta\varphi_2$ от угловой скорости для фиксированного участка шкалы преобразователя

φ_n (снижение \bar{T}), а также ростом относительных погрешностей задания угла и измерения T .

Случайная погрешность измерения T (так называемая погрешность счета) пренебрежимо мала на любых φ_n и Ω .

Влияние случайной погрешности задания угла оценено по результатам исследования магнитного преобразователя угла поворота ротора. Оценка среднего квадратического отклонения S результата наблюдения при измерении угла практически не зависит от его номинального значения и существенно зависит от угловой скорости лишь в области $\Omega < 3$ рад/с. Кривые

$\theta_{\varphi_n} = \frac{S_{\varphi_n}}{\varphi} = f(\Omega)$ (где $S_{\varphi_n} \approx \sigma_{\Omega_n} \%$
 $\approx \sqrt{S^2 - \sigma_{\varphi}^2}$; σ_{φ}^2 — дисперсия погрешности счета при измерении углов) отмечены на рис. 2 и 3 пунктиром.

При сравнении кривых можно сделать некоторые качественные выводы. Существенная зависимость θ_{T_1} от φ_n и Ω обусловлена, главным образом, ростом θ_{φ_n} как при уменьшении задаваемого угла, так и в зоне малых Ω . И лишь увеличение отношения $\frac{\theta_{T_1}}{\theta_{\varphi_n}}$ с ростом φ_n объясняется преобладанием случайных колебаний угловой скорости. Принимая S_{φ_n} и S_{T_1} независимыми, представим оценку дисперсии угловой скорости в виде

$$S_{\Omega}^2 = \Omega_n^2 (\theta_{\varphi_n}^2 + \theta_{T_1}^2).$$

При вычислении оценок S_{Ω}^2 в области $\Omega > 5$ рад/с, где исследования преобразователя угла не проводились, в качестве оценок θ_{φ_n} примем значения θ_{φ_n} при $\Omega = 5$ рад/с. Такая экстраполяция допустима, так как в области $\Omega > 5$ рад/с это значение θ_{φ_n} является оценкой θ_{φ_n} сверху. Это подтверждается не только теоретическим анализом источников погрешностей магнитного преобразователя, но и видом зависимости $\theta_{\varphi_n} = f(\Omega)$. Графики $\theta_{\Omega} \approx \frac{S_{\Omega}}{\Omega_n} = f(\Omega)$ для разных φ_n представлены на рис. 4. Учитывая положительную корреляцию погрешностей задания угла и времени поворота на этот угол, следует ожидать, что в действительности нестабильность скорости при малых φ_n , по крайней мере, в 2—3 раза ниже.

Зависимость результатов наблюдений при измерении T от погрешности задания φ особенно заметна в том случае, когда наблюдения в серии выполнены циклически, т. е. последовательно на всех соприкасающихся участках шкалы преобразователя (число наблюдений в серии кратно $360/\varphi_n$). При этом оценка среднего квадратического отклонения результатов наблюдений S_T характеризует совокупность случайных и систематических колебаний резуль-

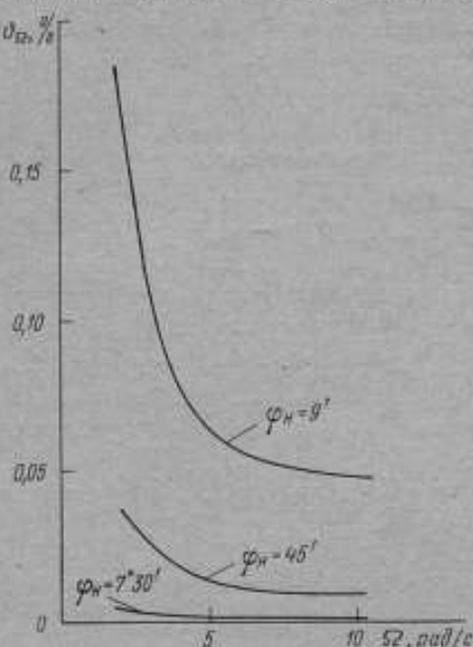


Рис. 4. Кривые зависимости погрешности θ_{Ω} от угловой скорости

татов наблюдений в цикле, и почти в двадцать раз превышает S_{T_2} для всех значений φ и Ω .

Исследование преобразователя угла показало, что при измерении всех соприкасающихся углов одного и того же номинального значения (в пределах оборота) оценка среднего квадратического отклонения результатов наблюдений $S_{\varphi} \approx 20S_{\varphi_2}$.

Кривые относительной накопленной в пределах цикла погрешности $\varepsilon_T = \frac{1}{T_n} \sum_{i=1}^m (T_i - \bar{T})$ и $\varepsilon_{\varphi} = \frac{1}{\varphi_n} \sum_{i=1}^m (\varphi_i - \bar{\varphi})$ имеют равное число экстремальных точек и близкие экстремальные значения; эти кривые несущественно отличаются друг от друга (например, кривые ε_T и ε_{φ} при $\varphi_n = 30^\circ$ на рис. 5).

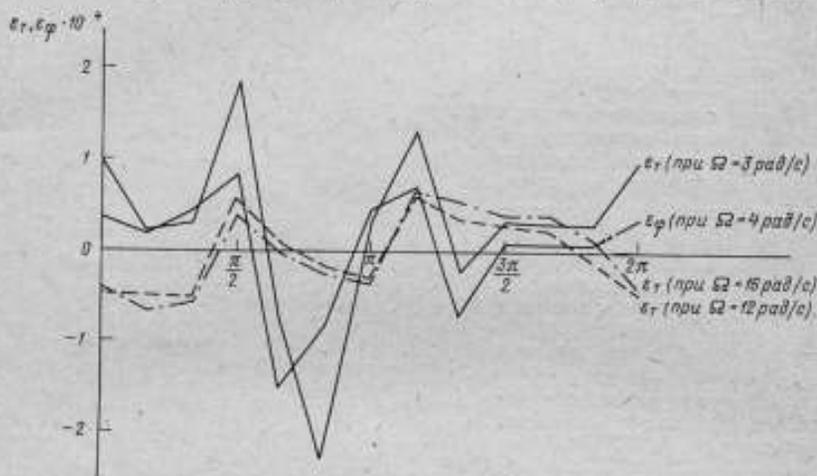


Рис. 5. Графики накопленных относительных погрешностей ε_T и ε_{φ} при $\varphi_n = 30^\circ$

Из проведенных экспериментов следует, что при любых значениях φ_n и Ω систематические и случайные погрешности измерения времени поворота на заданный угол малы и соизмеримы с соответствующими погрешностями задания угла. Таким образом, в прецизионных установках при раздельном измерении φ и T целесообразно оценивать случайные колебания угловой скорости внутри оборота только по результатам измерений, проведенных на одном и том же участке шкалы преобразователя.

При измерении средней угловой скорости (при $\varphi_n = 2\pi$ рад) для $\Omega > 4$ рад/с $\Delta\varphi = \bar{\varphi} - \varphi_n < 10^{-6}\varphi_n$ и $\Delta T = \bar{T} - T_n < 10^{-6}T_n$. Следовательно, смещение оценки средней угловой скорости $\bar{\Omega} = \bar{\varphi}/\bar{T}$ от номинального ее значения не превышает $2 \cdot 10^{-6}\Omega_n$.

Таким образом, экспериментально установлена высокая точность средней скорости и высокая стабильность текущего значения угловой скорости в любой части оборота.

Поступила в редакцию 19/XII 1975 г.

**ИСКЛЮЧЕНИЕ СИСТЕМАТИЧЕСКИХ ПОГРЕШНОСТЕЙ
ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ И ПЕРЕДАЧИ РАЗМЕРА ЕДИНИЦЫ
ПОСТОЯННОГО УСКОРЕНИЯ В ДИАПАЗОНЕ
МАЛЫХ ЗНАЧЕНИЙ УСКОРЕНИЯ**

Как правило, для задания постоянных ускорений, меньших ускорения свободного падения g , применяют метод поворотов акселерометра в гравитационном поле Земли, при этом используют его две разновидности: метод одинарного и двойного поворота [1]. Сравнительный анализ двух методов дан в работе [2]. В настоящей работе эти методы рассматриваются с точки зрения воспроизведения и передачи размера единицы постоянного ускорения образцовым средством измерений и исключения систематических погрешностей воспроизведения малых значений ускорения, вызванных постоянным отклонением осей вращения от номинального положения и неточной начальной выставкой поворотной платформы.

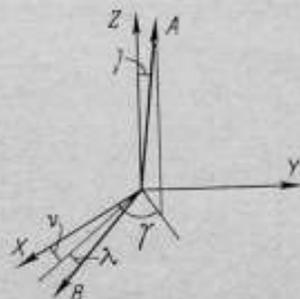
Для реализации метода поворотов в двух его разновидностях используют установки, в которых поворотную платформу с укрепленным на ней акселерометром поворачивают вокруг двух взаимно перпендикулярных осей. В отличие от принятого в работе [2], предполагаем, что установка имеет несвязанные вертикальную и горизонтальную оси вращения.

Рассмотрим метод двойного поворота. Введем прямоугольную систему координат XYZ , ось Z совпадает с местной вертикалью и ориентирована вдоль номинального направления оси вращения, ось X — вдоль номинального направления горизонтальной оси вращения. Определим угол наклона к горизонту измерительной оси акселерометра после поворотов его последовательно вокруг оси A , затем B , положение которых в выбранной системе координат определяется углами η , γ и ν , λ (см. рис.) (углы η , ν , λ — малые, γ — любой от 0 до 2π). Предполагаем, что акселерометр установлен на поворотной платформе таким образом, что его измерительная ось произвольно ориентирована в пространстве. Направление измерительной оси акселерометра определено единичным вектором R (R_x, R_y, R_z).

Составляющие вектора R после поворота его на малый угол α (полагаем $\sin \alpha \sim \alpha$, $\cos \alpha \sim 1 - \frac{\alpha^2}{2}$) вокруг оси A будут определяться из следующей матрицы поворота* (с учетом малости η)

$$\begin{array}{c}
 R_x \quad R_y \quad R_z \\
 \left. \begin{array}{l} R_x \\ R_y \\ R_z \end{array} \right| \begin{array}{ccc} 1 - \frac{\alpha^2}{2} & \alpha & -\alpha \eta \sin \gamma \\ -\alpha & 1 - \frac{\alpha^2}{2} & \alpha \eta \cos \gamma \\ \alpha \eta \sin \gamma & -\alpha \eta \cos \gamma & 1 \end{array} \quad (1)
 \end{array}$$

* Здесь и далее направление поворота выбрано по часовой стрелке.



Схематическая иллюстрация к методу поворотов

Угол наклона вектора R_1 к горизонту равен

$$\sin \zeta \approx \zeta = \frac{R_{z_1}}{|R_1|} = \alpha\eta \sin \gamma R_x - \alpha\eta \cos \gamma R_y + R_z.$$

После поворота вектора R вокруг оси B на малый угол β его матрица поворота будет

$$\begin{array}{l} R_x \\ R_y \\ R_z \end{array} \left| \begin{array}{ccc} R_x & R_y & R_z \\ i & -\beta\lambda & -\beta\nu \\ \beta\lambda & 1 - \frac{\beta^2}{2} & \beta \\ \beta\nu & -\beta & \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right) \end{array} \right| \quad (2)$$

Угол наклона вектора R_2 к горизонту

$$\sin \xi \approx \xi = \frac{R_{z_2}}{|R_2|} = \beta\nu R_x - \beta R_y + \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right) R_z. \quad (3)$$

Перемножив матрицы (1) и (2), получим составляющие вектора R_{12} после двух его последовательных поворотов вокруг осей A и B . Угол наклона вектора R_{12} к горизонту с точностью до малых второго порядка

$$\sin \mu \approx \mu = \frac{R_{z_{12}}}{|R_{12}|} = (\alpha\beta + \beta\nu + \alpha\eta \sin \gamma) R_x - (\beta - \alpha\eta \cos \gamma) R_y + \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right) R_z. \quad (4)$$

Рассмотрим случай, когда вектор R лежит в плоскости поворотной платформы и составляет малый угол φ с горизонтальной плоскостью, а его проекция на эту плоскость — малый угол ψ с осью X (в методе двойного поворота) или с осью Y (в методе одинарного поворота). Тогда рассмотренные выше углы наклона будут (с точностью до малых второго порядка)

$$\sin \xi = \frac{\beta\nu\psi \left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right)^2 R - \beta \left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right) \left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right) R + \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right) R}{|R_1|} \approx -\beta + \varphi; \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \sin \mu = & \frac{(\alpha\beta + \alpha\eta \sin \gamma + \beta\nu) \left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right) \left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right) R - (\beta - \alpha\eta \cos \gamma) \times \dots}{|R_{12}|} \\ \dots \rightarrow & \frac{\times \left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right) \psi R + \left(1 - \frac{\beta^2}{2}\right) \varphi R}{|R_{12}|} \approx \alpha\beta + \alpha\eta \sin \gamma + \beta\nu - \beta\psi + \varphi. \quad (6) \end{aligned}$$

Интересно, что отклонение оси поворота B от горизонтальной плоскости (угол λ) оказывает влияние на угол наклона μ в членах выше второго порядка малости, и поэтому в выражении (6) не указывается. Это значит, что если углы η , ν , λ являются величинами одного порядка малости, то малое отклонение оси B от горизонтальности не сказывается на величине задаваемого угла наклона μ в методе двойного поворота. Заметим, что в работе [2] угол λ введен в формулу для погрешности воспроизведения малых ускорений. Это связано с тем, что в этой работе рассмотрен случай, когда λ , ν , $\eta \ll \alpha$, β .

Таким образом, номинальные значения ускорения $a = g \sin \beta$ или $a = g \sin \alpha \sin \beta$ для каждого метода отличаются от воспроизводимых. Эти отличия могут достигать значительных величин в случае, когда отклонения осей вращения от номинального положения, неперпендикулярность поворотной платформы к квазивертикальной оси вращения, непараллельность платформы и квазигоризонтальной оси вращения, характеризуемые углами η, ν, φ, ψ , становятся соизмеримы с задаваемыми углами поворота α, β . Необходимость исключения связанных с этими углами погрешностей обуславливается задаваемой погрешностью воспроизведения ускорения θ , т. е. если

$$\theta \leq \frac{\alpha \eta \sin \gamma + \beta \nu - \beta \psi + \varphi}{\alpha \beta} \text{ или } \theta \leq \frac{\varphi}{\beta}, \text{ то углы } \eta, \gamma, \nu, \varphi, \psi \text{ следует}$$

определить с целью исключения погрешности в диапазоне $a \ll 1g$.

Углы $\eta, \nu, \gamma, \varphi, \psi$ можно определить путем измерения углов наклона платформы к горизонту после симметричных поворотов ее вокруг вертикальной и горизонтальной осей вращения. Для измерения малых отклонений платформы от горизонтальной плоскости, возникающих при вращении ее вокруг квазивертикальной оси на фиксированные углы, воспользуемся точными оптическими приборами, например, автоколлиматором и отражающим зеркалом, устанавливаемым горизонтально на поворотной платформе. Перед измерениями отклонений платформы автоколлиматор настраивается с помощью уровня поверхности так, чтобы визирная линия автоколлиматора совпадала с направлением местной вертикали. Если ось вращения платформы отклонена от вертикали и плоскость платформы неперпендикулярна оси вращения, то нормаль к плоскости платформы описывает окружность при вращении платформы, а в поле зрения автоколлиматора изображение его марки описывает эллипс, параметры которого зависят от величины отклонения от вертикали оси вращения и нормали к плоскости. Измерив угловые смещения марки автоколлиматора по двум координатам (X и Y), определим углы η, γ . Для нахождения угла ν произведем аналогичные измерения, но при наклоне платформы относительно квазигоризонтальной оси на малые углы, величина которых выбирается с учетом диапазона измерений угловых смещений автоколлиматора.

Запишем выражение для угловых смещений изображения марки автоколлиматора при поворотах вокруг квазивертикальной оси. Нормаль к плоскости платформы в выбранной системе координат имеет составляющие $N_x (\sin \varphi \cos \psi)$, $N_y (\sin \varphi \sin \psi)$, $N_z (\cos \varphi)$. Величина смещения составляющих вектора нормали после поворота платформы вокруг квазивертикальной оси на угол α определяется выражением (с учетом малости η, φ)

$$N'_x = \varphi \cos \psi \cos \alpha + \varphi \sin \psi \sin \alpha + \eta [\cos \gamma (1 - \cos \alpha) - \sin \gamma \sin \alpha];$$

$$N'_y = -\varphi \cos \psi \sin \alpha + \varphi \sin \psi \cos \alpha + \eta [\sin \gamma (1 - \cos \alpha) + \cos \gamma \sin \alpha].$$

Применительно к углам поворота 0° и 180° это дает:

$$N'_{x(0)} = \varphi \cos \psi; \quad N'_{x(180)} = -\varphi \cos \psi + 2\eta \cos \gamma;$$

$$N'_{y(0)} = \varphi \sin \psi; \quad N'_{y(180)} = -\varphi \sin \psi + 2\eta \sin \gamma.$$

Отсюда находим углы

$$\varphi = \sqrt{[N'_{x(0)}]^2 + [N'_{y(0)}]^2},$$

$$\operatorname{tg} \psi = \frac{N'_{y(0)}}{N'_{x(0)}}, \quad \operatorname{tg} \gamma = \frac{N'_{y(0)} + N'_{y(180)}}{N'_{x(0)} + N'_{x(180)}},$$

$$\eta = \frac{1}{2} \sqrt{[N'_{x(0)} + N'_{x(180)}]^2 + [N'_{y(0)} + N'_{y(180)}]^2}.$$

Необходимым условием определения углов является настройка автоколлиматора с помощью уровневой поверхности перед измерением угловых смещений изображения марки автоколлиматора в направлении X, Y .

При повороте вектора вокруг квазигоризонтальной оси на малый угол β имеем матрицу поворота (2), из которой для X -составляющей вектора нормали к плоскости платформы получаем $N_x^* = \varphi \cos \psi - \lambda \beta \varphi \sin \psi - \nu \beta \left(1 - \frac{\varphi^2}{2} \right)$, что с учетом малости углов $\lambda, \beta, \varphi, \nu$ дает

$$N_{x(\beta)}^* = \varphi \cos \psi - \nu \beta; \quad N_{x(-\beta)}^* = \varphi \cos \psi + \nu \beta.$$

Отсюда

$$\nu = \frac{N_{x(-\beta)}^* - N_{x(\beta)}^*}{2\beta}.$$

После определения углов $\eta, \gamma, \nu, \varphi, \psi$ можно исключить систематические погрешности воспроизведения малых ускорений на поворотных устройствах, вызванные неидеальным положением осей вращения и платформы. Другие возможные источники систематических и случайных погрешностей воспроизведения малых ускорений здесь не рассматриваются.

Рассмотрим погрешность передачи размера единицы ускорения от эталонных средств образцовым средствам измерения. Как следует из формул (3), (4), ускорение, измеряемое образцовым акселерометром при его градуировке на эталонной установке с поворотной платформой,

$$a = g(-\beta + \varphi' + \varphi) \quad \text{и} \quad a = g[\alpha\beta + \alpha\eta \sin \gamma + \beta\nu - \beta(\varphi' + \psi) + \varphi' + \varphi]. \quad (7)$$

где φ' — угол, составляемый измерительной осью акселерометра с горизонтом; ψ — угол между горизонтальной проекцией измерительной оси и осью Y (по методу одинарного поворота) или X (по методу двойного поворота). Таким образом, углы φ' и ψ характеризуют отклонения фактического направления измерительной оси от номинального, а φ и ψ — неисключенную систематическую погрешность ориентирования поворотной платформы. Следовательно, систематическая погрешность передачи размера единицы ускорения включает в себя неисключенную систематическую погрешность воспроизведения ускорения и погрешность собственно акселерометра, которая связана с неточным знанием направления измерительной оси (составляющая θ_1) и другими погрешностями прибора (составляющая θ_2).

Угол φ' определяет в основном составляющую θ_1 , которая может принимать большие значения. Так, для акселерометров, рассчитанных на диапазон ускорений, значительно меньших $1g$, угол φ' может достигать $1-2 \cdot 10^{-5}$ рад, что при ускорениях $g \cdot 10^{-4}$ дает значительные погрешности. Поэтому определив направление измерительной оси образцового акселерометра, например по методике, изложенной в работе [3], можно уменьшить составляющую θ_1 передачи. Это необходимо использовать при создании образцового акселерометра. Таким образом, в погрешности передачи размера единицы ускорения от эталонной установки образцовому акселерометру войдут только неисключенные систематические погрешности воспроизведения ускорения и определения направления измерительной оси и составляющая погрешности θ_2 , которую также необходимо уменьшить. В погрешность передачи размера единицы ускорения от образцового акселерометра образцовым средствам измерений низшего разряда (образцовая установка с поворотной платформой), кроме погрешности образцового акселерометра, войдет погрешность, вызванная неточным ориентированием его относительно номинального направления на образцовой установке, что естественно приведет к погрешности ее градуировки. Для снижения этой погрешности необходимо разработать

методику градуировки образцовой установки. Это позволит получить необходимый уровень точности поверки рабочих средств измерений ускорения.

Изложенные в статье вопросы могут оказаться полезными при исследовании и усовершенствовании эталонных средств воспроизведения ускорения и рассмотрении точностных возможностей передачи размера единицы постоянного линейного ускорения образцовым акселерометрам и образцовым средствам измерений ускорения низших разрядов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синельников А. Е. Способ поверки акселерометров. Авт. свид. № 355569, «Бюлл. изобр.», 1972, № 31.
2. Блантер Б. Э., Ибрагимов И. Х., Синельников А. Е. Анализ погрешности градуировки акселерометров методом поворота в гравитационном поле Земли. Труды метрологических институтов СССР, вып. 139 (199), 1972, с. 45—50.
3. Ибрагимов И. Х. Направленные свойства и градуировка акселерометров. Труды метрологических институтов СССР, вып. 156 (216), 1974, с. 118—124.

Поступила в редакцию 19/XII—1975 г

УДК 528.561.001.4 : 539.3

Я. М. Кандель

вним

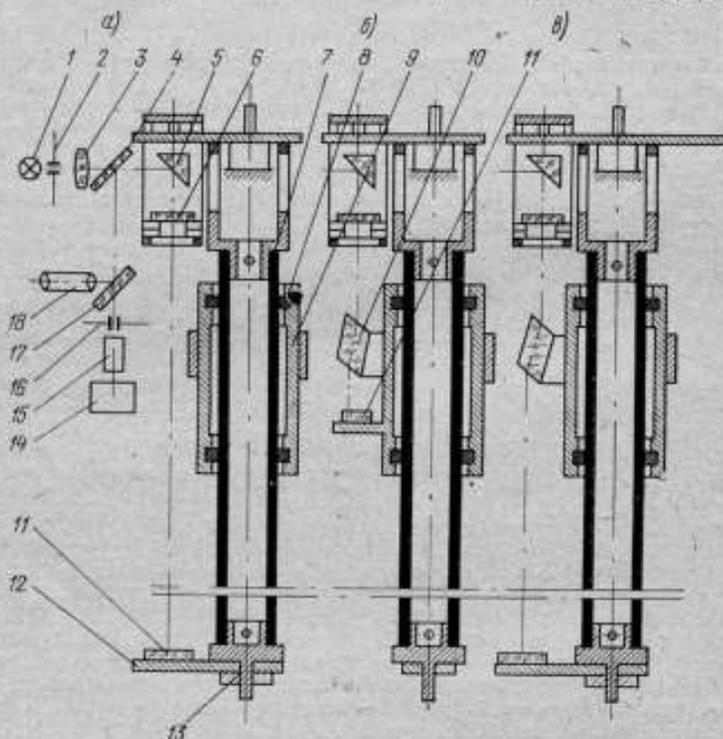
ИССЛЕДОВАНИЕ ДЕФОРМАЦИЙ СТЕРЖНЯ ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МАЯТНИКА

В результате абсолютных измерений ускорения свободного падения g необходимо вносить поправки, обусловленные деформацией стержня поворотного маятника [1—3]. Величина деформаций рассчитывается исходя из геометрии и физических свойств материала стержня маятника. Учесть с необходимой точностью все факторы, влияющие на деформацию стержня маятника, практически невозможно, поэтому погрешность определения деформаций стержня маятника обычно принимают равной 20% от величины деформаций. Упругие и остаточные деформации маятника, стержень которого снабжен подвижными элементами (например, маятник Кэттера), вообще не поддаются расчету. Современные конструкции поворотных маятников обычно лишены подвижных элементов.

Дифференциальный физический маятник с одной системой призма—подушка типа МГИД-1 обеспечивает измерение разности приведенных длин маятника непосредственно в вакуумной камере методом счета интерференционных полос, что повышает точность измерения g^* . Изображенный на рисунке маятник представляет собой кварцевый стержень 7, вдоль которого на фторопластовых подшипниках перемещается измерительная каретка 9. Фиксация каретки на стержне осуществляется силами трения. МГИД-1 снабжен маятниковым интерферометром, одна из модификаций которого изображена на рис. а; причем ось оптического шарнира интерферометра совмещена с осью вращения маятника. В процессе колебания маятника интерференционная картина в поле зрения трубы 18 совершает угловые колебания с амплитудой и частотой колебаний маятника. Заметим, что, если стержень не деформируется, то при этом не происходит перемещения интерференционных полос и изменения их ширины. Поскольку стержень дифференциального маятника имеет подвижную каретку, необходимо экспериментально исследовать его деформации.

* См. статью Я. М. Канделя «Конструкция гравиметрического маятника МГИД-1» в настоящем сборнике, стр. 52.

Упругий изгиб стержня маятника исследовался с помощью интерферометра (см. рис. а), причем зеркало 11 устанавливалось на планке 12, которая крепилась к стержню с помощью вспомогательной массы 13. Для обеспечения свободного падения лучей на зеркало 11, каретка 9 повернута вокруг своей оси на 90°. Изгиб стержня измерялся в воздухе при различных положениях измерительной каретки и вспомогательной массы, при амплитуде колебания маятника $\alpha = 20^\circ$ путем визуального контроля ширины интерференцион-



Модификации маятникового интерферометра

1 — источник монохроматического света; 2 и 16 — щели; 3 — объектив; 4, 6, 17 — полупрозрачные зеркала; 5, 11 — зеркала; 10 — плоскопараллельная пластина; 14 — счетчик импульсов; 15 — фотоприемник; 18 — зрительная труба

ных полос в процессе колебания маятника. Как известно [4], видимая ширина интерференционных полос связана с углом ω интерференционного клина в длине волны света λ соотношением

$$S = \frac{\lambda \Gamma}{2\omega},$$

где Γ — увеличение наблюдательной системы интерферометра. Экспериментально установлено, что упругий изгиб стержня маятника меньше чувствительности интерферометра, т. е. $\Delta\omega \leq 1'$.

Удлинение стержня маятника под действием перемещения измерительной каретки производилось в воздухе с помощью интерферометра (см. рис. а), причем каретка вдоль стержня перемещалась вручную. При трогании каретки и ее остановке наблюдались упругие изменения длины стержня, равные

0,6—0,7 мкм. Удлинения стержня маятника при перемещении каретки из верхнего положения в нижнее не обнаружено.

Надежность фиксации каретки на стержне маятника исследовалась в воздухе и в вакууме с помощью интерферометра (см. рис. б). С целью увеличения чувствительности интерферометра электрический сигнал с фотоприемника 15 подавался на осциллограф; это позволило отсчитывать изменения оптической разности хода, равные 0,06 мкм. Эксперимент заключался в измерении изменения оптической разности хода интерферометра при неподвижной каретке, при арретировании и разарретировании маятника, а также при его запуске и остановке. Многократное повторение эксперимента при различных положениях каретки подтверждает как надежность и жесткость ее фиксации на стержне, так и отсутствие упругих смещений Δz каретки вдоль стержня маятника в процессе колебания ($\Delta z \leq 0,06$ мкм).

Смещение центра тяжести измерительной каретки под действием центробежных сил возможно из-за перемещения отдельных деталей каретки относительно ее корпуса. Контроль постоянства положения центра тяжести каретки осуществлялся путем последовательного закрепления интерференционного зеркала на различных деталях каретки и измерения изменения разности хода и ширины интерференционных полос в процессе колебаний маятника.

Поскольку закрепление зеркала на фторопластовых подшипниках невозможно, величина их люфта относительно корпуса каретки измерялась на специальном приспособлении, состоящем из двух индикаторов, закрепленных на стальной направляющей, имитирующей кварцевый стержень маятника. Каретка устанавливалась на направляющей и перемещалась вдоль нее вручную. Масса каретки $M = 1190$, в которую входит масса подшипника $m = 14$ г. Величину люфта подшипника вычисляли по формуле

$$\Delta z_{\text{ш.т}} = \frac{m \Delta l}{M},$$

где Δl — разность отсчетов по индикаторам, один из которых измерял перемещение подшипника, а второй — каретки. Экспериментально установлено, что $\Delta z_{\text{ш.т}} \leq 0,03$ мкм.

Непрямолинейность перемещения каретки вдоль стержня измерялась по схеме интерферометра (см. рис. в), причем наибольший угол наклона φ , согласно данным [4, 5], вычислялся по формуле

$$\varphi = \frac{k\lambda \sqrt{n^2 - 0,5}}{t(\sqrt{2n^2 - 1} - 1)},$$

где k — наибольший отсчет по реверсивному счетчику; λ — длина волны света; t и n — толщина и показатель преломления материала плоскопараллельной пластины, установленной на каретке.

Измерения показали, что $\varphi = 8''$.

Применение интерференционного метода измерения линейно-угловых деформаций стержня маятника в процессе его колебаний подтвердило жесткость конструкции стержня дифференциального маятника.

Отметим, что интерферометр с оптическим шарниром позволяет измерить не только линейно-угловые деформации маятников в процессе колебаний, но и деформации вращающихся деталей в процессе вращения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cook A. H. The Absolute Determination of the Acceleration Due to Gravity. *Metrologia*, vol. 1, N 3, July, 1965, p. 175.
2. Jeffreys M. On the Absolute Measurement of Gravity. — «Monthly Notices Roy. Astron. Soc.», *Geophys.*, Suppl. 5, 1949, pp. 398—408.

3. Curtis A. R. Elasticity corrections for pendulums used in the absolute measurement of gravity. — «Monthly Notices Roy. Astron. Soc.», Geophys., Suppl. 6, 1951, pp. 159—162.

4. Захарьевский А. Н. Интерферометры. Оборонгиз, 1952, 285 с. с ил.

5. Кандель Я. М. Интерференционный компаратор. Авт. свид. № 301520, «Бюллетень изобретений», 1971, № 14.

Поступила в редакцию 19/XII—1975 г.

УДК 528.561.082.54

Я. М. Кандель

ВНИИМ

КОНСТРУКЦИЯ ГРАВИМЕТРИЧЕСКОГО МАЯТНИКА МГИД-1

Поворотные маятники позволяют измерить абсолютным методом значение ускорения свободного падения g с погрешностью 0,3—0,4 мгал. Дальнейшее снижение погрешности измерений невозможно из-за невысокой точности измерения приведенной длины маятника в вакууме и наличия двух систем призма—подушка [1, 2]. Созданной во ВНИИМ интерференционный дифференциальный маятник МГИД-1 с одной системой призма—подушка обеспечивает измерение разности приведенных длин маятника непосредственно в вакуумной камере методом счета интерференционных полос [3—5], что повышает точность измерения g .

Гравиметрический маятник МГИД-1 включает следующие части, смонтированные на общем основании: маятник; механизмы управления маятником; вакуумная камера; вакуумный фотоэлектрический интерферометр; устройство измерения периода и амплитуды колебания маятника; устройство измерения температуры в вакуумной камере. Рассмотрим подробнее их устройство.

М а я т н и к (рис. 1) состоит из кварцевого стержня 18, верхнего фланца 12, нижнего фланца 15, узла опорной призмы 9, измерительной каретки и вспомогательных подвижных масс 16. Кварцевый стержень маятника представляет собой кварцевую трубу, наружный диаметр которой равен 37 мм и отшлифован в центрах по 2-у классу точности. Внутренний диаметр трубы не обработан, толщина стенки трубы 2—3 мм. Верхний и нижний фланцы изготовлены из латуни ЛС 59—1; соединение фланцев со стержнем осуществляется с помощью латунных штифтов диаметром 3 мм и эпоксидной смолы. К верхнему фланцу с помощью специальной планки 10 крепится узел опорной призмы, изготовленной из агата; крепление ее осуществляется шестью винтами диаметром 3 мм. К планке крепятся также узел оптического шарнира 6 вакуумного интерферометра и призма 11 устройства измерения периода и амплитуды колебания маятника. Вспомогательные подвижные массы выполнены в виде латунной и алюминиевой гаек. Подушка маятника изготовлена из сапфира.

Измерительная каретка выполнена в виде дюралюминиевой втулки 20 с пятью выступами: четыре выступа служат для перемещения каретки, пятый — для крепления оправы 22 интерференционного зеркала 21. К концам втулки на резьбе крепятся латунные цапги 14, в которых укреплены фторопластовые подшипники 19. В верхней части втулки крепится оправа 13 компенсационной пластины 23.

Общая масса маятника 3110 г, масса измерительной каретки 1190 г, ход измерительной каретки 510 мм.

Механизмы управления маятником. МГИД-1 снабжен четырьмя механизмами управления маятником, расположенными в вакуумной камере (рис. 2) и укрепленными на основаниях внутренней трубы 9. Труба может извлекаться из камеры 7 вместе с механизмами и маятником; это позволяет производить юстировку механизмов не только в вакуумной камере, но и на специальном стенде.

Механизм верхнего арретира является кулачковым механизмом, состоящим из верхней планки 4, поворачивающейся относительно оси 1 под действием пружины и кулачка 5. Планка имеет фиксатор 3, который входит в конусное отверстие маятника 14. Весь механизм смонтирован на верхнем основании 8, управление верхним арретиром осуществляется рукояткой 6.

Механизм нижнего арретира также является кулачковым и состоит из нижней планки 20, поворачивающейся относительно оси 21 под действием пружины 19, и торцевого кулачка 17, укрепленного на направляющей 15.

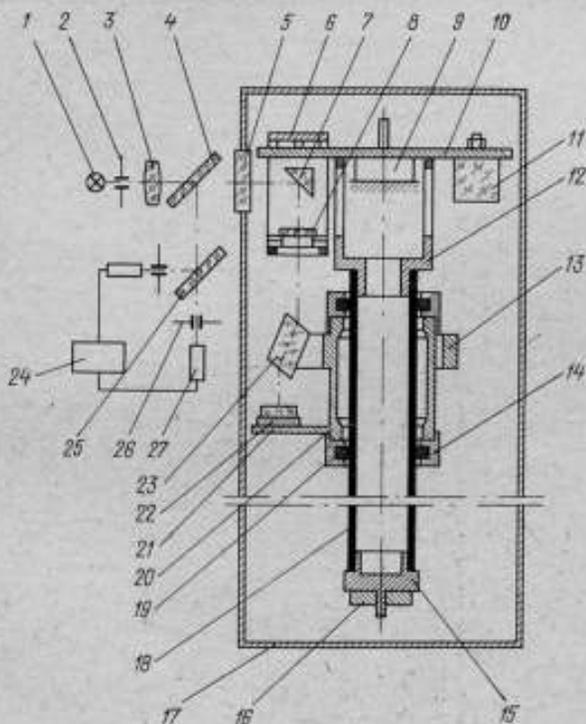


Рис. 1. Вакуумный интерферометр дифференциального гравиметрического маятника

Рычаг 20 снабжен тремя фиксаторами 18 и 22, которые входят в два конусных отверстия нижней пластины маятника. Весь механизм смонтирован на нижнем основании 16, нижний арретир управляется рукояткой 2.

Механизм запуска маятника состоит из толкателя 23, который отводит маятник от положения равновесия на необходимый угол. Управление осуществляется рукояткой 2. Кулачок 17 и толкатель 23 развернуты друг относительно друга таким образом, чтобы запуск маятника был возможен только при его разарретировании.

Механизм перемещения измерительной каретки 12 маятника состоит из винта 13, гайки 11, цилиндрической направляющей 15 и вспомогательной каретки 10, перемещающейся по направляющей 15. Перемещение измерительной каретки осуществляется синхронным двигателем СД-09, расположенным за пределами вакуумной камеры. Вращение от двигателя через вакуумные уплотнения передается винту 13 и перемещающейся гайке 11, с которой соединена вспомогательная каретка; выступ этой каретки перемещает измеритель-

ную каретку маятника. После установки измерительной каретки маятника в требуемое положение на стержне маятника, вспомогательную каретку следует отвести на 20 мм, чтобы устранить влияние механизма перемещения на маятник. Направление перемещения каретки меняется реверсом двигателя.

Вакуумная камера (рис. 3) состоит из стального вакуумного цилиндра, крышек 8 и стеклянного колпака 1. Вакуумный цилиндр состоит из верхнего 7 и нижнего 2 цилиндров, диска 5, фланцев 12, трех втулок 6 и 11. Крышка и стеклянный колпак соединяются с фланцами вакуумного ци-

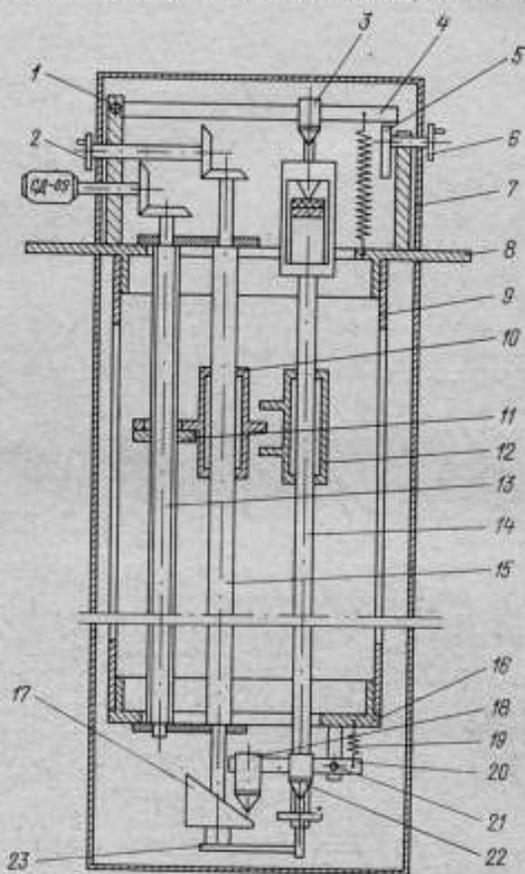


Рис. 2. Механизм управления маятником

линдра с помощью болтов; герметизация обеспечивается резиновыми прокладками. В крышке имеется смотровое отверстие, закрытое иллюминаторным стеклом. Втулки 6 предназначены для герметизированного вывода наружу рукояток управления механизмами маятника, втулки 8 — иллюминаторные. Вакуумная камера крепится к основанию 4.

Вакуумный фотоэлектрический интерферометр. Точное измерение перемещений измерительной каретки маятника осуществляется вакуумным фотоэлектрическим интерферометром Физо (см. рис. 1). Монохроматический свет источника 1 после прохождения щели 2, объектива 3 и полупрозрачного зеркала 4 попадает на иллюминаторное стекло 5 вакуум-

ной камеры 17, затем призмой 7 направляется вдоль стержня маятника. В верхней части маятника укреплена трубчатая оправа 6, в которой находится полупрозрачное зеркало 8. На измерительной каретке 20 маятника укреплен плоскопараллельная пластина 23 и зеркало 22. Отраженные от зеркал 8 и 22 лучи направляются полупрозрачными зеркалами 4 и 25 через щели 26 на фотоприемники 27.

Электрические сигналы с фотоприемников усиливаются и попадают на реверсивный счетчик интерференционных полос 24. В качестве источника

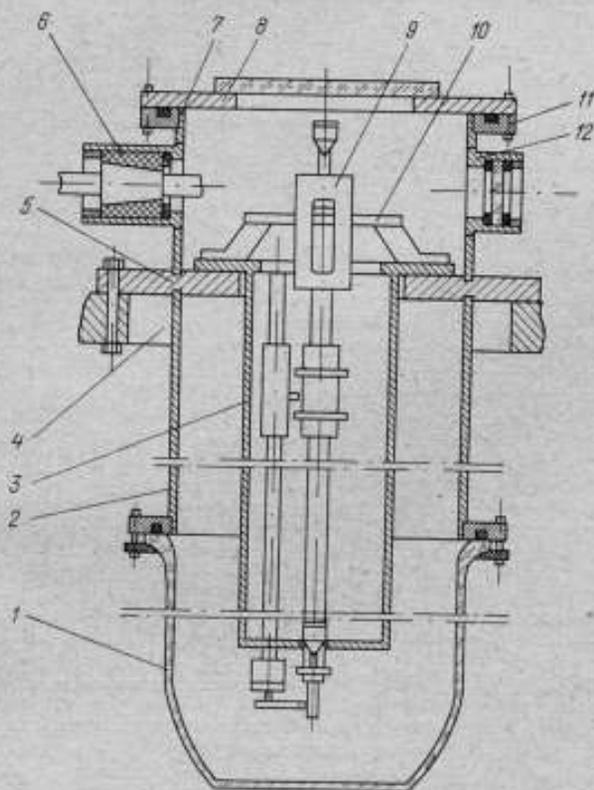


Рис. 3. Вакуумная камера

монохроматического света используется стабилизированный ОКГ, приемниками являются ФЭУ-51. Поскольку описанный интерферометр имеет параллельные линии измерения, для исключения из результатов измерения компараторной погрешности, вносимой наклонами каретки при ее перемещении вдоль стержня, на каретке установлена компенсационная плоскопараллельная пластина 23 [6].

Устройство для измерения периода и амплитуды колебания маятника (рис. 4) состоит из источника света 1, конденсора 2, входной щели 3, полупрозрачного зеркала 5, зеркал 4 и длиннофокусного объектива 6. Параллельный луч света после объектива проходит иллюминатор 7 вакуумной камеры 11 и падает на призму 9 маятника 10. Отразившись трижды от призмы 9 и зеркала 8, луч света направля-

ется полупрозрачным зеркалом 5 на амплитудную шкалу 17, в центре которой находится выходная щель 16 и фотоприемник 15.

При колебаниях маятника 10 автоколлимационное изображение щели 3 совершает колебания вдоль шкалы 17 и в момент прохождения щели 16 попадает на фотоприемник. Электрический сигнал с фотоприемника поступает в блок формирования 14, который подает остроконечный импульс на делитель 13 и частотомер 12, измеряющий время, равное N периодам колебаний маятника; причем значение N устанавливается делителем импульсов. Амплитуда колебания определяется по шкале 17 визуально.

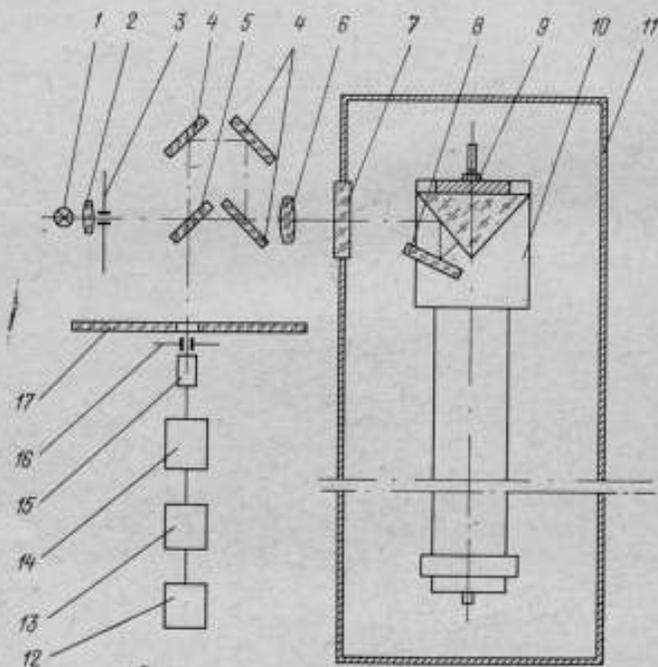


Рис. 4. Устройство для измерения периода и амплитуды колебаний маятника

Устройство для измерения температуры в вакуумной камере состоит из пяти дифференциальных термопар, которые могут крепиться к любой детали маятника.

Испытания МГИД-1 показали неадекватность работы всех составных частей маятника.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cook A. H. The Absolute Determination of the Acceleration Due to Gravity. — «Metrologia», 1965, v. 1, N 3, July, p. 175.
2. Schüler R., Fischer H. Frey R., Harnisch G. Absolute schweremessungen mit Reversionspendeln in Potsdam. — «Vermessungstechnik», 1970, 18 II, Heft 12, S. 451—453.
3. Торопин С. И. Дифференциальный маятник с одной системой призма-подушка. Труды ВНИИМ, выл. 23 (83), Л., Машгиз, 1954, с. 5—17.

4. Торопин С. И., Кандель Я. М. Маятник для гравиметрических измерений. Авт. свид. № 278142, — «Бюлл. изобр.», 1970, № 25.

5. Кандель Я. М., Торопин С. И. Усовершенствование маятникового метода абсолютного определения ускорения силы тяжести. Труды метрологических институтов СССР, вып. 139 (199), 1972, с. 68—71.

6. Кандель Я. М. Интерференционный компаратор. Авт. свид. № 301520. — «Бюлл. изобр.», 1971, № 14.

Поступила в редакцию 19/XII—1975 г.

УДК 620.178.5.052.2.001.5

Б. Э. Блантер, Ю. Н. Федеченков

ВНИИМ

ИССЛЕДОВАНИЕ ВИБРОШУМОВ УСТАНОВКИ ДЦ-1

Установка ДЦ-1 предназначена для задания постоянных и гармонических линейных ускорений. Однако в воспроизводимом ускорении могут присутствовать и вибрационные составляющие. Как известно [1], спектральный состав воспроизводимого ускорения относится к основным метрологическим характеристикам средств градуировки и поверки акселерометров. В связи с этим снижение вибрации — одна из актуальных задач повышения точности установки ДЦ-1, а экспериментальная оценка параметров вибрации — ответственный этап аттестации этой установки.

По данным предварительного анализа, уровень и спектр вибрации поворотного стола двойной центрифуги зависят, главным образом, от типа и качества опор ротора и поворотного стола, погрешностей изготовления и сборки механических узлов, остаточной несбалансированности обеих платформ и нестабильности их угловых скоростей вращения. Для снижения вибрационных шумов при разработке установки ДЦ-1 по сравнению с известными ранее двойными центрифугами удалось сократить кинематическую цепь: были исключены редукторы, применен независимый привод стола, шпиндель стола жестко соединен с якорем двигателя. В установке ДЦ-1 использованы также аэростатические опоры платформ и прецизионные системы электропривода.

Цель настоящей работы заключалась в исследовании параметров виброускорений установки ДЦ-1. Отметим, что универсальной методики исследования виброшумов ротационных установок этого типа не существует. Лишь в работе [2] имеются краткие сведения об измерении вибрации двойной центрифуги, которые относятся к частному случаю поступательного движения поворотного стола. В данной работе впервые делается попытка оценить виброшумы двойной центрифуги с аэростатическими опорами обеих платформ и сложным движением поворотного стола.

При аттестации установки ДЦ-1 параметры виброшумов определялись вдоль радиуса стола и перпендикулярно его плоскости. Исследование систематической и случайной составляющих вибрации проводилось при неподвижных платформах, а также при их раздельном и совместном вращении*. Схема измерительной системы изображена на рис. 1.

В экспериментах использовался первичный измерительный пьезоэлектрический преобразователь 1 (типа КВ-11) и комплект виброизмерительной аппаратуры фирмы «Брюль и Кьер», в который входит предусилитель 2 (типа 2623), анализатор частот 3 (типа 2107) и самописец 4 (типа 2305). Преобразователь и предусилитель, сочлененные с помощью адаптера 5 (типа ИАО144), укреплены на поворотном столе 6. Электрическая связь

* Методика исследования разработана при участии А. Б. Куранера, В. К. Лукичева и А. Е. Синельникова.

предуслителя с источником питания 7 (типа ВСП-50), анализатором частот и осциллографом 8 (типа С1-18) осуществлялась через штатные токоъемники двойной центрифуги (на схеме не показаны).

Измерения проводились в диапазоне частот от 20 Гц до 1,5 кГц. В контрольных экспериментах (до частоты $f = 6$ кГц) был применен первичный измерительный преобразователь типа 4334 с катодным повторителем типа 2615.

Установлено, что вибрация появляется после всплыва поворотного стола (при давлении сжатого воздуха ~ 2 кгс/см²). С ростом давления до 5 кгс/см² виброшумы возрастают, а затем их уровень стабилизируется. И в горизонтальной, и в вертикальной плоскостях вибрации носят случайный характер,

причем максимум спектральной плотности мощности $W(f) = \frac{S^2}{\Delta f}$ (S² —

оценка дисперсии виброшумов в интервале частот Δf) соответствует частоте ~ 500 Гц (рис. 2). В вертикальной плоскости значение S в 1,5—2 раза больше, чем в основном направлении. При этом в области частот до 400 Гц $S < 0,01$ м/с², а в области $f > 400$ Гц $S < 0,02$ м/с².

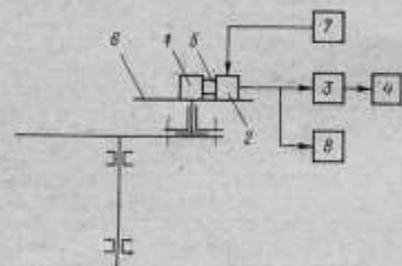
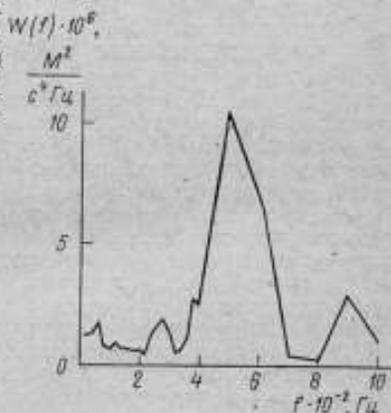


Рис. 1. Схема измерительной системы

Рис. 2. Спектральная плотность мощности виброшумов

Во всем диапазоне задания постоянных линейных ускорений (1 режим работы установки) характер виброшумов не изменяется. Влияние вращения ротора проявляется, в основном, в области $f < 300$ Гц, где $S \approx 0,015$ — $0,02$ м/с². В зоне $f > 300$ Гц уровень виброшумов возрастает на 10—20%.

При вращении поворотного стола (режим II) увеличивается уровень случайной составляющей виброускорения и появляется периодическая составляющая с периодом, равным времени оборота стола. С увеличением уг-

Таблица 1

Амплитуды гармоник $a_i \cdot 10^2$, м/с²

$f = \frac{\omega}{2\pi}$, Гц	Вдоль радиуса стола						В вертикальной плоскости					
	№ гармоники											
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
10	—	3,1	0,8	—	—	—	—	0,2	0,3	—	—	—
15	—	3,1	0,8	—	—	—	—	0,2	0,3	—	—	—
20	3,1	4,6	0,8	—	—	—	1,5	1,5	0,3	—	—	—
25	3,3	6,2	3,1	0,8	—	—	1,5	2,0	0,6	0,6	0,8	—
30	3,5	6,8	3,1	4,6	2,8	3,5	3,0	2,0	1,8	3,0	1,0	1,0

ловой скорости стола ω значение S возрастает, однако даже при максимальной скорости $\omega_m = 190$ рад/с оно не будет превышать $0,05$ м/с² ни в основном, ни в вертикальном направлениях.

Параметры периодической составляющей вибрации определялись при фиксированных значениях ω (см. табл. 1).

В экспериментах была оценена роль двух наиболее существенных источников виброускорения — неустойчивости угловой скорости и остаточной несбалансированности стола.

Действительно, при наличии периодических колебаний угловой скорости $\Delta\omega(t) = \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i \cos(i\omega_0 t + \varphi_i)$ и неточном совмещении центра инерции чувствительного элемента (ЧЭ) измерительного преобразователя I (см. рис. 1) с осью вращения стола периодическая составляющая центростремительного ускорения

$$\Delta a_{\omega}(t) = 2\omega_0 r \sum_{i=1}^n \Delta\omega_i \cos(i\omega_0 t + \varphi_i),$$

где ω_0 — среднее значение угловой скорости стола; r — расстояние от центра инерции ЧЭ до оси вращения стола.

Периодическая составляющая ускорения $\Delta a_{\omega}(t)$ появляется при наличии неуравновешенных центробежных сил и моментов, если жесткость опоры стола непостоянна в пределах оборота шпинделя.

Измерения проводились при двух значениях r ($r_2/r_1 \approx 1,5$). Установлено, что в области $\omega < 120$ рад/с преобладает составляющая $\Delta a_{\omega}(t)$. С ростом угловой скорости начинает отчетливее проявляться влияние качества балансировки приспособления с преобразователем и предусилителем. Дисбаланс влияет, главным образом, на амплитуду a_1 первой гармоники ускорения. В разных экспериментах при $\omega = \omega_m$ были получены значения $a_1 = 0,02 \div 0,13$ м/с², в то время как максимальное изменение амплитуды высших гармоник не превышало 50%. При этом в области скоростей от 60 до 120 рад/с амплитуда второй гармоники $\Delta\omega_2 < 2 \cdot 10^{-4} \omega_0$, а при $\omega > 120$ рад/с амплитуда любой гармоники $\Delta\omega(t)$ не превышает $10^{-4} \omega_0$.

При совместном вращении платформы (режим III — задание гармонических линейных ускорений) уровень виброшумов в основном и вертикальном направлениях зависит от амплитуды a_0 и частоты F_0 задаваемого ускорения.

В вертикальном направлении влияние частоты проявляется отчетливой, чем влияние амплитуды. Лишь в области малых частот ($F_0 < 10$ Гц, $f < 200$ Гц) вид огибающей спектрограммы с ростом a_0 изменяется так же, как в режиме I. Во всем диапазоне амплитуд и частот $S < 0,05$ м/с². Необходимо отметить, что в режиме III (см. табл. 2) амплитуды a_i ($i > 1$) гармонических составляющих вибрации больше амплитуд соответствующих гармоник в режиме II. Амплитуду первой гармоники измерить не удалось: в выходном сигнале измерительного преобразователя на частоте F_0 доминирует составляющая, обусловленная существенной (более 1%) поперечной чувствительностью преобразователя, что исключает разделение составляющих.

Количественная оценка параметров виброшумов в основном направлении была связана с трудностями, возникшими из-за несоизмеримости вибрационной составляющей и заданного значения a_0 . Как показали эксперименты, во всем диапазоне a_0 и F_0 ее уровень оказался существенно ниже a_0 . В результате этого в выходном сигнале преобразователя доминирует составляющая на частоте F_0 . При спектральном анализе затухание этой составляющей составляло 45—55 дБ в области частот $2F_0 \leq f \leq 5F_0$ и около 57 дБ при $f > 5F_0$. Даже при такой высокой селективности анализатора удалось провести лишь качественный анализ случайной составляющей и по максимуму оценить амплитуды высших гармоник периодической составляющей виброшумов. Так, в режимах II и III огибающие спектрограммы в области $f > 250$ Гц

Таблица 2

Амплитуды гармоник $a_i \cdot 10^2$, м/с²

a_i , м/с ²	F_i , Гц	Вдоль радиуса стола					В вертикальной плоскости				
		№ гармоники									
		2	3	4	5	6	2	3	4	5	6
10	10	3,4	1,6	—	—	—	0,3	0,4	—	—	—
	20	5,0	2,1	1,3	—	—	—	—	—	—	
	30	7,5	3,7	2,2	4,2	4,3	2,2	2,0	3,0	—	
100	10	—	45	32	36	—	2,0	1,0	—	—	
	20	—	45	36	36	32	—	—	—	—	
	30	—	45	35	35	35	3,0	3,0	3,0	1,0	

имеют практически один и тот же вид, а значения S различаются не более, чем на 10—20%. Это свидетельствует о том, что в режиме III преобладает влияние виброшумов поворотного стола.

Наиболее характерные результаты исследования периодической составляющей виброшумов, представленные в табл. 2, показывают, что при любом $i > 2$ $a_i < 5 \cdot 10^{-3} a_0$.

Таким образом, во всех режимах работы установки ДЦ-1 искажения задаваемого ускорения пренебрежимо малы. Это подтверждает правильность найденных при разработке схемы двойной центрифуги технических решений.

Приведенные выше оценки не исчерпывают возможностей установки ДЦ-1. Следует ожидать, что в результате усовершенствования методов балансировки вращающихся узлов двойной центрифуги в процессе эксплуатации и повышения давления сжатого воздуха до 8—10 кгс/см² возможно снижение вибраций в 2—3 раза. Заметим, что использование измерительного преобразователя с малой поперечной чувствительностью, улучшение селективности спектрального анализа и снижение нижней граничной частоты анализатора позволит повысить точность определения параметров вибрации и получить качественно новую информацию о виброшумах установки ДЦ-1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Синеельников А. Е., Блантер Б. Э. Градуировка и поверка низкочастотных акселерометров. Л., ЛДНТП, 1971, 22 с.
2. Smith R. O., Willis E. A., Hilten J. S. A dual centrifuge for generating lowfrequency sinusoidal accelerations.—*J. Res. Nat. Bur. Standards*, 1962, с. 66, N 4, pp. 357—362.

Поступила в редакцию 19/XII—1975 г.

СОДЕРЖАНИЕ

<i>И. М. Артемьев, Б. Э. Блантер, С. А. Ковчин, А. Е. Синельников, Г. А. Смирнов, С. А. Шейнберг.</i> Комплекс эталонных и образцовых средств для воспроизведения постоянных и низкочастотных линейных ускорений	3
<i>И. М. Артемьев, Я. М. Кандель, А. В. Лебедев, А. Е. Синельников</i> Исследование метрологических характеристик образцовой центрифуги.	7
<i>Б. Э. Блантер, А. Е. Синельников.</i> Исследование метрологических характеристик эталонной установки ДЦ-1	13
<i>А. В. Жесин, И. Б. Челпанов.</i> Надежное определение параметров движения твердого тела по результатам измерений.	19
<i>Б. Э. Блантер, В. Н. Кудряцев, А. В. Лебедев, А. И. Минаев.</i> Разработка и исследование опоры поворотного стола эталонной двойной центрифуги	24
<i>И. Х. Ибрагимов.</i> Зависимость точности акселерометра от способа определения его измерительной оси	
<i>И. Х. Ибрагимов, С. А. Яушева.</i> Экспериментальное исследование точности воспроизведения малых ускорений методом поворотов акселерометра в поле силы тяжести Земли	35
<i>Б. Э. Блантер, В. Н. Кудряцев, В. Н. Повстьев.</i> Исследование погрешностей воспроизведения угловой скорости ротора установки ДЦ-1	39
<i>С. А. Яушева.</i> Исключение систематических погрешностей воспроизведения и передачи размера единицы постоянного ускорения в диапазоне малых значений ускорения	45
<i>Я. М. Кандель.</i> Исследование деформаций стержня дифференциального гравиметрического маятника	49
<i>Я. М. Кандель.</i> Конструкция гравиметрического маятника МГИД-1	52
<i>Б. Э. Блантер, Ю. Н. Федюченко.</i> Исследование виброшумов установки ДЦ-1	57
Рефераты публикуемых статей	62

РЕФЕРАТЫ ПУБЛИКУЕМЫХ СТАТЕЙ

УДК 531.768.089.68

Комплекс эталонных и образцовых средств для воспроизведения постоянных и низкочастотных линейных ускорений. Артемьев И. М., Блантер Б. Э., Ковчин С. А., Сивельников А. Е., Смирнов Г. А., Шейнберг С. А. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 3—7.

Изложены результаты работ по созданию комплекса высшей точности, воспроизводящих постоянные и низкочастотные линейные ускорения. Приведены описания эталонного и образцового комплексов, указаны основные метрологические характеристики. Описан ряд унифицированных узлов и систем, которые могут быть использованы при дальнейших разработках. Ил. 2. Библ. 2.

УДК 531.768.088/.089 : 620.168.336

Исследование метрологических характеристик образцовой центрифуги. Артемьев И. М., Кандель Я. М., Лебедев А. В., Сивельников А. Е. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 7—12.

Рассмотрена формула воспроизведения постоянных линейных ускорений с помощью образцовой одинарной центрифуги. Приведены результаты исследования метрологических характеристик образцовой центрифуги и отдельных ее систем. Описана методика проведения измерения и приборы, используемые при аттестации, дана оценка погрешности этих приборов. Приведены оценки точности воспроизведения ускорения. Ил. 6.

УДК 531.768.088.089.62

Исследование метрологических характеристик эталонной установки ДЦ-1. Блантер Б. Э., Сивельников А. Е. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 13—18.

Приводятся результаты экспериментального исследования эталонной двойной центрифуги ДЦ-1. Оценены погрешности в трех режимах работы установки при воспроизведении ускорений: 1) гармонического, 2) постоянного и гармонического, 3) постоянного. Ил. 2. Библ. 2.

УДК 531.76/77.089.52

Надежное определение параметров движения твердого тела по результатам измерений. Жесая А. В., Челпанов И. Б. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 19—23.

Рассматривается задача определения параметров движения твердого тела по сигналам измерительных приборов. При избыточности, когда число приборов больше минимально необходимого, для надежного оценивания параметров предлагается применение метода наименьших модулей. Производится сравнение с другими методами оценивания. Библ. 6.

УДК 531.768.082.32 : 620.168.336.05

Разработка и исследование опоры поворотного стола эталонной двойной центрифуги. Блантер Б. Э., Кудрявцев В. Н., Лебедев А. В., Мишаев А. И. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 24—31.

Описана конструкция и приведены результаты экспериментального исследования аэростатической опоры поворотного стола двойной центрифуги. Показано, что перекокс, сдвиг и колебания шпинделя стола в опоре малы во всем диапазоне амплитуд и частот задаваемых на установке ДЦ-1 ускорений.

Подтверждена целесообразность использования аэростатических опор в точных ротационных установках даже при действии больших радиальных нагрузок. Ил. 9. Библ. 3.

УДК 531.768.082.14.088.3.001.24

Зависимость точности акселерометра от способа определения его измерительной оси. Ибрагимов И. Х. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 31—35.

Рассматривается влияние на точность акселерометра различных способов определения в процессе градуировки направления его измерительной оси. На примере маятникового акселерометра показано, что правильный выбор направления измерительной оси позволяет получить существенное уменьшение систематической погрешности измерений. Ил. 2. Библи. 2. Табл. 1.

УДК 531.768.081.1 : 528.27

Экспериментальное исследование воспроизведения малых ускорений методом поворотов акселерометра в поле силы тяжести Земли. Ибрагимов И. Х., Яушева С. А. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 35—38.

Исследована точность воспроизведения малых значений ускорения методом поворотов акселерометра в поле тяжести Земли. Метод реализован на оптической делительной головке типа ОДГ-59 с использованием прецизионного уровня в качестве образцового средства измерения углов наклона акселерометра.

Экспериментальные данные подтверждают выводы о точностных преимуществах воспроизведения малых значений ускорения методом последовательных поворотов акселерометра вокруг двух взаимно перпендикулярных осей (метод двойного поворота) по сравнению с методом однократного поворота. Ил. 2. Библи. 3.

УДК 531.775.088 : 620.168.336—251

Исследование погрешностей воспроизведения угловой скорости ротора установки ДЦ-1. Блазтер В. Э., Кудринцев В. Н., Повстьев В. Н. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 39—44.

Описана методика и приведены результаты экспериментального исследования погрешностей воспроизведения угловой скорости ротора двойной центрифуги. Показана связь различных составляющих погрешностей задания и измерения скорости. Ил. 5.

УДК 531.768.082.1.088 : 528.27

Исключение систематических погрешностей воспроизведения и передачи размера единицы постоянного ускорения в диапазоне малых значений ускорения. Яушева С. А. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 45—48.

Рассмотрены систематические погрешности воспроизведения единицы постоянного линейного ускорения методом поворотов акселерометра в гравитационном поле Земли и передачи размера единицы ускорения образцовым акселерометрам. Предложена методика исключения погрешностей. Ил. 1. Библи. 3.

УДК 628.561.001.4 : 539.3

Исследование деформаций стержня дифференциального гравиметрического маятника. Кандель Я. М. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 49—52.

Описана методика и приведены результаты экспериментального исследования деформаций стержня гравиметрического маятника МГИД-1. Ил. 1. Библи. 5.

УДК 628.561.082.54

Конструкция гравиметрического маятника МГИД-1. Кандель Я. М. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 52—57.

Описана конструкция дифференциального интерференционного гравиметрического маятника с одной системой призма-подушка и маятниковая аппаратура. Ил. 4. Библи. 6.

УДК 620.178.5.052.2.001.5

Исследование виброшумов установки ДЦ-1. Блазтер В. Э., Федеченков Ю. Н. — «Измерения линейных ускорений». Труды метрологических институтов СССР, вып. 205 (265), 1977, с. 57—61.

Описана методика исследования виброшумов ротационной установки ДЦ-1 во всех режимах ее работы. Приведены результаты измерения параметров вибрации вдоль радиуса поворотного стола и перпендикулярно плоскости стола. Ил. 2. Табл. 2. Библи. 2.

ИЗМЕРЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ УСКОРЕНИЙ

Труды метрологических институтов СССР

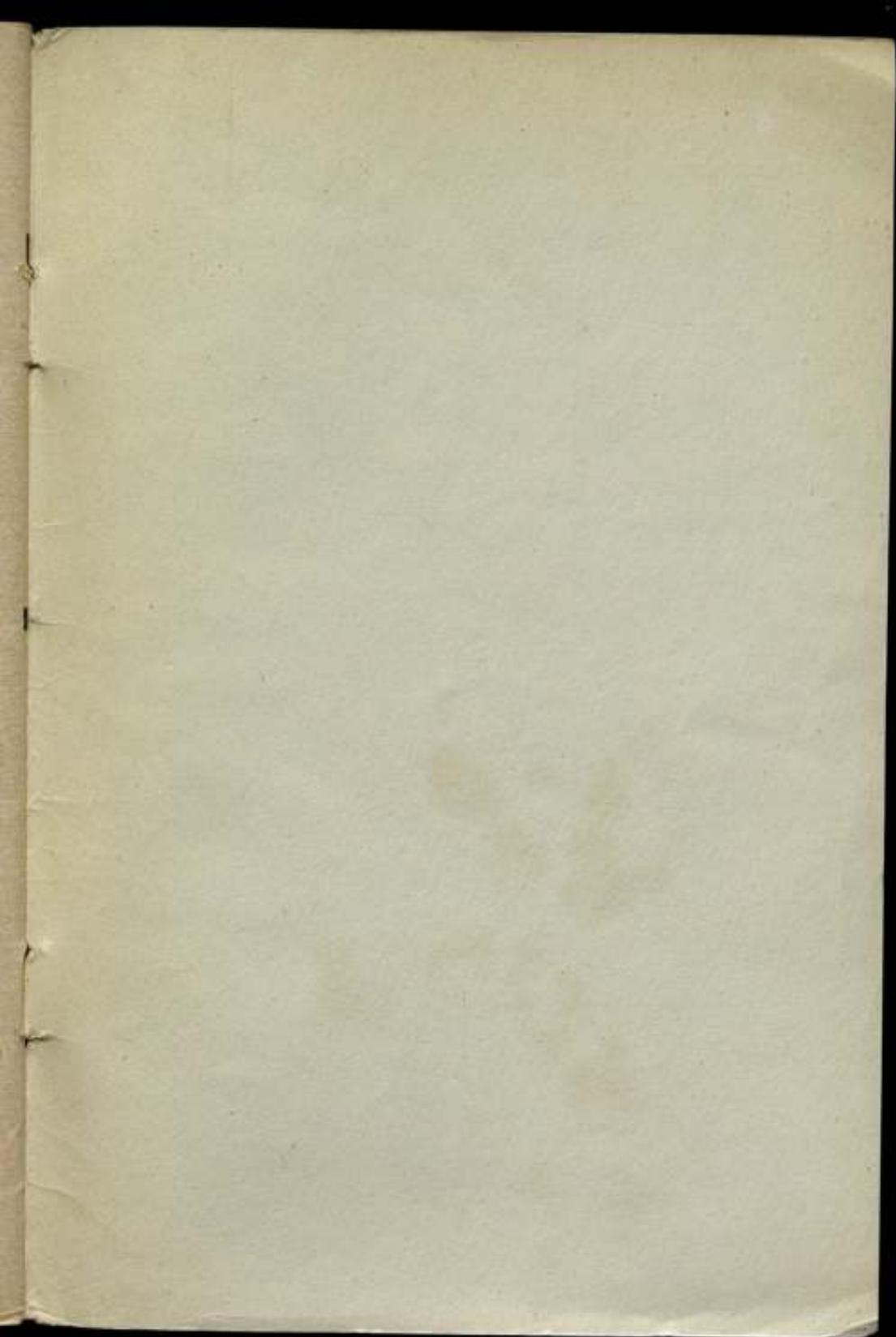
Выпуск 205 (265)

Редактор *Н. А. Шайкевич*
Редактор издательства *Р. М. Хорт*
ИБ № 1133

Сдано в набор 5/III 1977 г. Подписано к печати I/VI 1977 г.
М-21544. Формат 60×90/16. Бумага типографская № 2.
Печ. л. 4. Уч.-изд. л. 5,15. Тираж 1000 экз. Заказ №655.
Цена 50 коп.

Ленинградское отделение издательства «Энергия»
192041, Ленинград, Марсово поле, 1

Ленинградская типография № 4 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
196126, Ленинград, Ф-126, Социалистическая ул., 14.



Цена 50 коп.