

УДК 535.312.3

ИНЕРЦИОННЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ УГЛОВОЙ СКОРОСТИ
ВРАЩЕНИЯ

В.В. Богатырева, А.Л. Дмитриев

Предложен новый измеритель угловой скорости вращения, основанный на измерении центробежной силы инерции, действующей на чувствительный элемент оптико-механической конструкции прибора. Вызываемое отклонение луча света регистрируется позиционно-чувствительным фотоприемником. Величина выходного сигнала пропорциональна изменению угла между зеркалами и определяется угловой скоростью вращения прибора. Описан алгоритм обработки сигналов на выходе фотоприемника, приведены результаты испытаний лабораторного макета измерителя вращения. Прибор отличается простотой конструкции, экономичностью и найдет практическое применение в технологических процессах, машиностроении и робототехнике.

Ключевые слова: измеритель угловой скорости вращения, центробежная сила, зеркальный умножитель.

Введение

Измерители угловой скорости вращения давно применяются в машиностроении, робототехнике, в различных приборах управления, контроля и навигации. Известны устройства, основанные на различных физических явлениях – эффекте Саньяка, гироскопическом эффекте, явлении Кориолиса и др. [1, 2]. Ввиду массового характера практического использования таких приборов сегодня особенно актуальна разработка компактных и экономичных измерителей вращения, построенных на новых принципах. Одним из них является принцип измерения угловой скорости, основанный на оценке величины центробежной силы, действующей на оптико-механические узлы приборов во вращающейся (неинерциальной) системе координат [3]. В настоящей работе предложены новый принцип действия и конструкция оптико-механического измерителя вращения, отличающиеся простотой и хорошими технико-экономическими характеристиками, что создает перспективы широкого практического применения.

Принцип действия измерителя угловой скорости

Принцип действия измерителя угловой скорости поясняется на рис. 1, где O – ось вращения основания, O' – ось вращения поворотного зеркала, A' и A – положения центров масс груза в состояниях покоя и вращения соответственно.

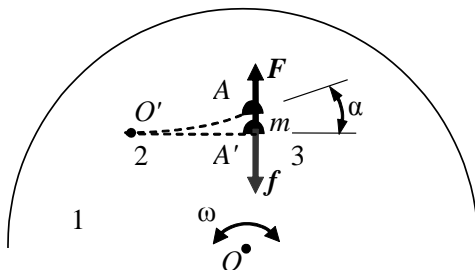


Рис. 1. Отклонение зеркала под действием центробежной силы: 1 – вращающееся основание; 2 – крепежная пластина; 3 – поворотное зеркало

Рассмотрим, как будет действовать центробежная сила на упругую пластину с закрепленным на ней грузом массой m . При вращении основания оптической системы с угловой скоростью ω центробежная сила F , действующая на груз, равна

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

где m – масса груза, $R = OA' \approx OA$ – радиус вращения. Центробежная сила вызывает отклонение пластины на угол α в точке крепления груза. Сила упругости, возникающая при изгибе пластины, равна

$$f = k\alpha, \quad (2)$$

где k – коэффициент упругости системы крепления зеркала. В состоянии равновесия $F = f$, следовательно, из (1), (2)

$$\alpha = \frac{mR\omega^2}{k}. \quad (3)$$

Измеряя величину α , при известных m , R и k можно рассчитать угловую скорость ω вращения основания.

Расчет оптической схемы измерителя вращения

Для измерения малых величин α в конструкции измерителя удобно использовать зеркальный умножитель [4] с многократным отражением луча света между двумя плоскими легкими зеркалами, обращенными рабочими поверхностями друг к другу. Одно из зеркал жестко крепится на основании прибора, а второе – на упругой пластине.

Геометрия хода лучей света в измерителе угловой скорости показана на рис. 2. В исходном состоянии положим $\alpha=0$ и угол падения луча на плоскость регистрации P $\theta=90^\circ$. Можно показать, что зависимость смещения Δx луча в плоскости P фотоприемника от величины α представляется формулой

$$\Delta x = d \cos(\theta + \alpha) \cos \theta \sum_{n=1}^N \left[\frac{\operatorname{tg}(\theta + 2(n-1)\alpha) + \operatorname{tg}(\theta + 2n\alpha)}{\cos(\theta + (2n-1)\alpha)} \right] - 2Nd \sin \theta + l \cdot \operatorname{tg}(2N\alpha), \quad (4)$$

где N – число пар отражений, $n = 1, 2, \dots$, d – расстояние между зеркалами. В данном расчете луч света падает на подвижное зеркало в точке, лежащей на оси вращения зеркала.

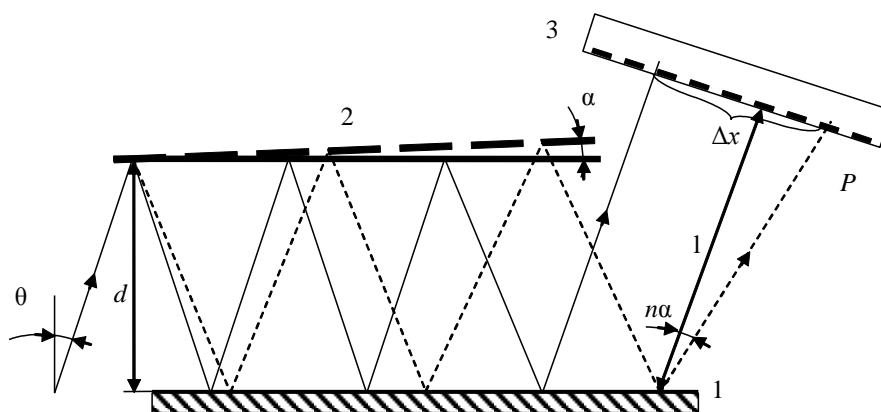


Рис. 2. Изменение координаты центра лазерного пятна на поверхности позиционно-чувствительного фотоприемника: 1 – неподвижное зеркало; 2 – поворотное зеркало; 3 – позиционно-чувствительный фотоприемник (мультиискан)

Отклонение луча света от первоначального положения связано с изменением угла α между плоскими поверхностями зеркал. Дополнительное линейное смещение свето-

вого пятна на поверхности позиционно-чувствительного фотоприемника зависит от общего числа отражений и угла падения входного луча θ . Вследствие многократных отражений луча в рассмотренной клиновидной оптической системе угол отклонения регистрируемого луча значительно возрастает, при этом создается практическая возможность измерений весьма малых α , величиной порядка единиц–долей миллирадиана.

Методика проведения экспериментов и их результаты

Общая схема экспериментальной установки для проверки работоспособности предложенного принципа измерений угловой скорости приведена на рис. 3.

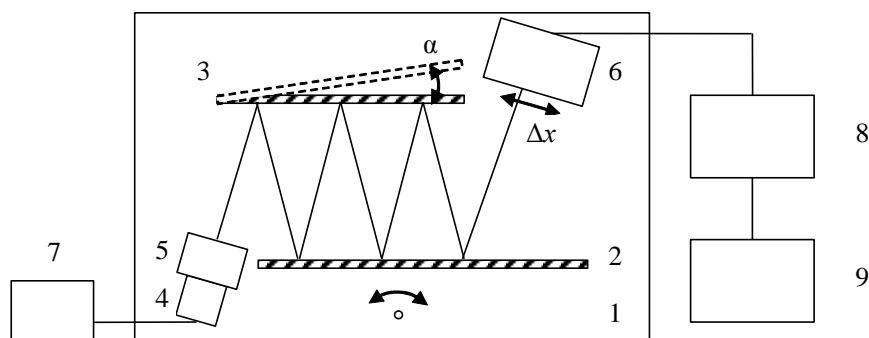


Рис. 3. Схема экспериментальной установки: 1 – вращающееся основание; 2 – неподвижное зеркало; 3 – поворотное зеркало; 4 – полупроводниковый лазер; 5 – микрообъектив; 6 – позиционно-чувствительный фотоприемник; 7 – источник питания лазера; 8 – цифровой осциллограф; 9 – ПК

Оптико-механические узлы экспериментальной установки закреплены на жестком основании, установленном на поворотном столике гониометра. Юстировка зеркал, обеспечивающая шестикратное отражение света в зеркальном усилителе, выполнялась с помощью регулировочных винтов. Подвижное зеркало нагружалось дополнительной массой для повышения чувствительности измерителя. Общая масса составляла 97,5 г. Расстояние между зеркальными поверхностями в состоянии покоя равнялось 62 мм, радиус вращения подвижного зеркала 150 мм.

В эксперименте использовался позиционно-чувствительный фотоприемник (ПЧФП) мультискан, выходное напряжение которого пропорционально координате медианы светового пятна, сформированного на поверхности фотоприемника. Точность определения положения центра пятна не хуже 5 мкм. Значение медианы определяется сравнением фототоков, обусловленных потоками излучения с обеих сторон от искомой координаты [5]. Преимуществом выбранного ПЧФП является его способность работать в условиях фоновой засветки, превышающей мощность регистрируемого полезного сигнала до 10^3 раз, что позволяет с высокой точностью определять в реальном времени координаты пучка света, например, в режиме прямого солнечного воздействия.

В качестве оптического излучателя использовался полупроводниковый лазер марки ADL-65102TL с рабочей длиной волны 650 нм и мощностью 5 мВт. Выходной сигнал мультискана фиксировался цифровым осциллографом и отображался на мониторе ПК. Среднее значение напряжения U_{cp} , регистрируемого на сопротивлении нагрузки ПЧФП, прямо определялось координатой центра луча, направляемого на мультискан.

При вращении столика гониометра с угловой скоростью 0,0725 град/с амплитуда U_{cp} изменялась в среднем на 0,526 В при первом включении двигателя механической поворотной системы и на 0,280 В – при втором (рис. 4).

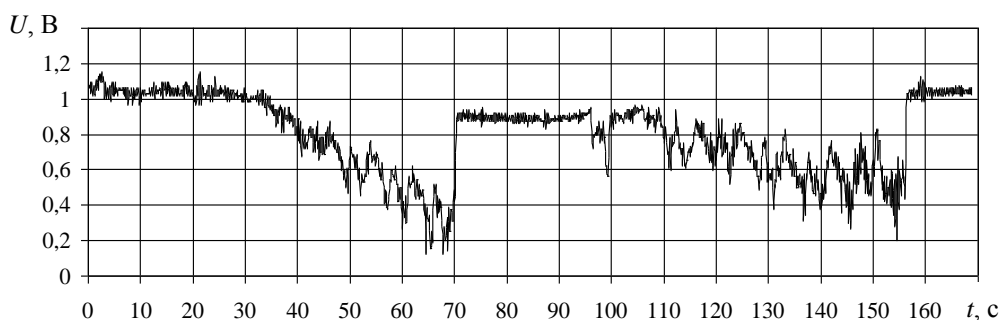


Рис. 4. Временная зависимость выходного сигнала ПЧФП при вращении («вкл») и в отсутствии вращения («выкл») основания: 0–30 с – «выкл»; 30–70 с – «вкл»; 70–95 с – «выкл», 95–155 с – «вкл»; 155–170 с – «выкл»

Как видно из рисунка, аналоговый сигнал, регистрируемый на выходе ПЧФП, заметно флуктуирует. Причины флуктуаций выходного напряжения – неравномерность угловой скорости вращения измерительного столика и случайные колебания чувствительного элемента (подвижного зеркала) измерителя, вызванные внешними вибрационными помехами. Для определения среднего значения измеряемой угловой скорости вращения столика и уменьшения влияния внешних помех на результаты измерений производилась компьютерная обработка полученных данных. Среднее значение выходного сигнала рассчитывалось по методу элонгаций – вычислением среднего арифметического значения максимального и минимального уровней регистрируемого сигнала. При обработке сигнала на первом этапе производится сглаживание данных напряжения на выходе мультискана. В первом приближении находится среднее значение напряжения по пяти отсчетам:

$$U_i = \frac{U_{i-2} + U_{i-1} + \dots + U_{i+2}}{5}. \quad (5)$$

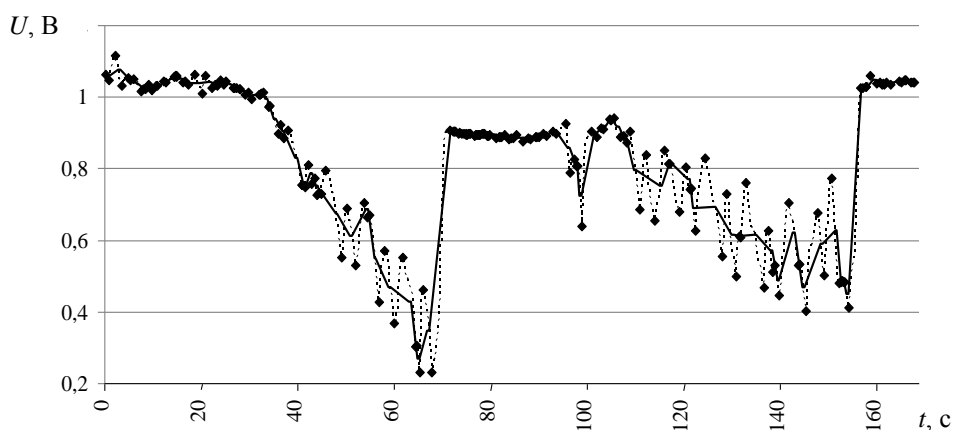


Рис. 5. Выходной сигнал мультискана (пунктир), обработанный по формуле (5) с выделением локальных минимумов и максимумов (метки), и сигнал, обработанный по методу элонгаций (сплошная линия)

Далее рассчитываются локальные минимумы и максимумы напряжения, по парам соседних максимумов и минимумов вычисляется их среднее арифметическое, являющееся конечным результатом измерений (рис. 5).

Для получения искомого значения выходного напряжения ПЧФП, необходимого для расчета угловой скорости вращения, среднее арифметическое значение напряжения рассчитывается по двум или трем парам соседних минимумов и максимумов выходного сигнала. В описываемом эксперименте максимальное и минимальное смещения лазерного луча по поверхности мультискана составили 1,05 и 0,56 мм. Согласно (4), соответ-

ствующие углы отклонения подвижного зеркала равнялись 1,114 и 0,123 мрад. Вычисленная по формуле (3) скорость вращения столика равна 6,123 мрад/с или 0,107 град/с (I) и 6,381 мрад/с или 0,113 град/с (II), при этом расчетное значение угловой скорости примерно в 1,65 раз больше действительного. Такое систематическое расхождение объясняется неравномерностью вращения основания, неточностью в задании величины коэффициента жесткости пластины, на которой крепится подвижное зеркало, а также не вполне корректным выбором интервала вычисления среднего напряжения. Указанные несоответствия будут устранены при усовершенствовании конструкции измерителя и оптимизации используемого в нем алгоритма обработки выходных данных.

В целом эксперимент продемонстрировал практическую возможность измерения угловой скорости вращения величиной порядка десятых–сотых долей град/с при использовании инерционного оптико-механического измерителя, отличительной чертой которого является упрощенная, по сравнению с известными типами оптических гироскопов, конструкция прибора. Указанное значение точности измерений не является предельным для рассмотренного принципа измерений и будет улучшено при усовершенствовании прибора.

Заключение

Предложен новый измеритель угловой скорости вращения, основанный на действии центробежной силы инерции на чувствительный элемент (подвижное зеркало) зеркального умножителя, обуславливающей смещение выходного луча света, направляемого на чувствительную поверхность ПЧФП. Выполнен расчет хода лучей света в зеркальном умножителе, составляющем часть оптической схемы устройства, получена формула зависимости смещения положения выходного луча на поверхности ПЧФП мультискан от угла поворота подвижного зеркала умножителя. Создан лабораторный макет измерителя, выполнены эксперименты, подтвердившие работоспособность и высокую чувствительность рассмотренного нового принципа измерений. Усовершенствование оптико-механической конструкции инерционного измерителя и алгоритма обработки выходных сигналов позволят существенно улучшить технические и экономические характеристики создаваемого прибора, который найдет практическое применение в машиностроении и в робототехнике.

Литература

1. Джексон Р.Г. Новейшие датчики. – М.: Техносфера, 2007. – 384 с.
2. Удд Э. Волоконно-оптические датчики. – М.: Техносфера, 2008. – 520 с.
3. Заявка на полезную модель № 2008140497 «Измеритель угловой скорости вращения» / Богатырева В.В., Дмитриев А.Л., приоритет от 13.10.2008.
4. Кулагин С.В., Гоменюк А.С., Дикарев В.Н. Оптико-механические приборы. – М.: Машиностроение, 1984. – 352 с.
5. Подласкин Б.Г., Васильев А.В., Гук Е.Г., Токранова Е.А. Построение синтезированной апертуры на фотоприемниках мультискан // Журнал технической физики. – 2000. – Т. 70. – Вып. 10. – С. 110–116.

Богатырева Валерия Владимировна

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, аспирант, carlo.01@mail.ru, carlo02@yandex.ru

Дмитриев Александр Леонидович

– Санкт-Петербургский государственный университет информационных технологий, механики и оптики, доктор технических наук, профессор, alex38d@list.ru