

## НОВЫЙ ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ ИЗМЕРИТЕЛЯ МАССЫ В УСЛОВИЯХ МИКРОГРАВИТАЦИИ

### NEW PRINCIPLE OF CONSTRUCTION OF A METER OF WEIGHT IN CONDITIONS OF A MICROGRAVITATION

Санкт-Петербург, Санкт-Петербургский государственный университет аэрокосмического приборостроения  
Saint-Petersburg, State university of the aerospace instrumentation

Is informed a new principle of measurement of small weights in conditions of a micro gravitation (on orbital space stations), where the measurement of weight is impossible on the basis of gravity, for example, for measurement of outcomes of chemical or biological experiences.

Lack of devices constructed on known principles, is the low measurement accuracy stipulated by availability of mechanical friction. For example, one of devices allows to measure weight in conditions of a micro gravitation by means of communication to the container with measured weight of constant acceleration and measurement with the help of a position sensor of force (inertial effect of the container on the platform), the value is proportional to which one to weight. Thus the mode of the uniformly accelerated motion forms by even rotation of the platform with the help of the electric motor. However field of accelerations in a zone of measurements is not even, since the accelerations of points of measured weight are various, depend on distance of each point of weight up to rotation axis and are directed on radius connecting a point of weight to a rotation centre. At measurement of weight the non-uniformity of a field of accelerations calls his deformation, that results in an error of measurements.

The offered principle is encompass usage of the electromagnetic suspension for a task of an effort and measurement of movements in the device for measurement of small weights in conditions of a micro gravitation and provides a contact less levitation of the container with measured weight, that allows to eliminate effect of friction forces. Measured weight is determined with a split-hair accuracy by signals of sensors of voltage, connected up to electromagnets, by signals of sensors of induction and by signals of sensors of movement of the container.

In the report are considered the skeleton diagram and mathematical model of measurement of small weights in conditions of a microgravitation.

Доклад посвящен проблеме измерения малых масс в условиях микрогравитации (на орбитальных космических станциях), где невозможно измерение массы на основе действия силы тяжести, однако необходимо, например, для измерения результатов химических или биологических опытов.

Недостатком устройств подобного назначения, построенных на известных принципах, является низкая точность измерения, обусловленная наличием механического трения. Например, одно из устройств позволяет измерять массу в условиях микрогравитации путем сообщения контейнеру с измеряемой массой постоянного ускорения и измерения с помощью датчика положения силы (инерционного воздействия контейнера на платформу), величина которой пропорциональна массе. При этом режим равноускоренного движения создается равномерным вращением платформы с помощью электродвигателя. Однако при этом поле ускорений в зоне измерений не является равномерным, т.к. ускорения точек измеряемой массы различны, зависят от расстояния каждой точки массы до оси вращения и направлены по радиусу, соединяющему точку измеряемой массы с центром вращения. При измерении массы неравномерность поля ускорений вызывает его деформацию, что приводит к погрешности измерений.

Известен также принцип, основанный на уравнивании веса подвижного элемента силой притяжения регулируемого магнитного поля, который предлагался для создания весов с магнитным подвесом [1]. Однако в условиях микрогравитации сила веса соизмерима с уровнем шумов усилителя мощности, ограничивающих чувствительность подобных весов, несмотря на наличие фильтра нижних частот, даже в условиях наземных измерений. Поэтому техническое решение, подобное описанному в [1], неприменимо в условиях микрогравитации.

Для решения задачи измерения массы в невесомости в докладе предлагается использовать новый принцип - принцип полного магнитного подвешивания контейнера с измеряемой массой с помощью электромагнитов на переменном токе, управляемых по сигналам датчиков перемещения, индукции и периода напряжения питания.

Выбор переменного тока в качестве носителя подводимой к электромагнитам энергии обусловлен тем, что остаточная намагниченность материала магнитопровода в измерительных

магнитных подвесах постоянного тока не позволяет снизить погрешность измерения силы менее (0,1-0,2)%, даже в случае использования в качестве материала магнитопровода пермаллоя 79НМ. Переменный же ток оказывает размагничивающее действие на магнитопроводы электромагнитных преобразователей, что существенно уменьшает погрешность измерения силы за счет остаточной намагниченности материала магнитопровода. Кроме того, в случае использования достаточно простых схем и современной элементной базы точность измерения индукции с помощью устройств, в основу функционирования которых положен закон электромагнитной индукции, у устройств на переменном токе значительно выше, чем у устройств на постоянном токе. Полный магнитный подвес необходим для того, чтобы исключить влияние на точность измерения поворота корпуса контейнера с измеряемой массой относительно вектора микрогравитации.

Успешное решение задачи оценивания стало возможным не только благодаря удачному конструктивному решению, основанному на полном подвесе измеряемой массы с помощью электромагнитов на переменном токе, и корректному выбору системы датчиков, но и благодаря использованию современного математического аппарата для обработки информации, получаемой с датчиков. Поэтому в схему измерителя массы в невесомости включен микропроцессор, осуществляющий обработку информации, поступающей с датчиков.

Математическое обеспечение микропроцессора построено на использовании хорошо зарекомендовавших себя математических моделей для описания динамических процессов, протекающих в измерителе массы в невесомости [2].

Математическое моделирование велось параллельно с натурными испытаниями прибора. Были определены вероятностные характеристики математической модели системы и проведены статистические испытания экспериментальных образцов измерителя массы в невесомости. В результате были получены вероятностные характеристики упрощенной математической модели и их статистические значения.

Решена задача комплексной оценки измеряемой массы по результатам измерения амплитуды, периода и фазы гармонических колебаний сигналов датчиков перемещения, индукции и напряжения питания электромагнитов. Каждый датчик представляет собой нелинейную относительно фазовых координат систему с не более чем  $(n-1)$  коррелированными входами ( $n$  – порядок системы дифференциальных уравнений, математической модели датчика) в форме суммы неслучайных гармонических и случайных стационарных процессов.

Основные параметры гармонического сигнала каждого из датчиков являются входными сигналами соответствующего измерителя. Известными предполагаются среднеквадратические значения ошибок определения основных параметров гармонического сигнала каждого из датчиков. Погрешности определения основных параметров гармонического сигнала датчика предполагались взаимно независимыми, не зависящими от оцениваемой величины и характеризующимися нормальными законами распределения. На выходе всех измерителей формируется полезный сигнал об одной и той же величине, в качестве которой принимается относительное значение измеряемой массы.

Для повышения точности и достоверности обработки полезных сигналов датчиков перемещения, индукции и периода напряжения питания электромагнитов использовались не только экспериментальные данные, но и аналитические градуировочные зависимости измеряемой массы от амплитуды, периода и фазы сигналов соответствующих датчиков:

градуировочная зависимость измеряемой массы от амплитуды собственных колебаний сигнала каждого датчика;

градуировочная зависимость измеряемой массы от амплитуды вынужденных колебаний сигнала каждого датчика;

градуировочная зависимость измеряемой массы от периода собственных колебаний;

градуировочная зависимость измеряемой массы от фазы собственных колебаний;

градуировочная зависимость измеряемой массы от фазы вынужденных колебаний.

В зависимости от требуемой точности выбирается план проведения эксперимента: измерения в режиме собственных колебаний (режим 1), измерения в режиме вынужденных колебаний (режим 2) или по полной программе (режим 3), включающей оба режима.

Поскольку входные сигналы датчика перемещения, датчика индукции и датчика периода напряжения питания взаимосвязаны, то и на входы соответствующих частных измерителей амплитуды, периода и фазы гармонических колебаний поступают коррелированные сигналы.

Установление степени соответствия натурной и упрощенной систем выполнялось методом коррелированных процессов, то есть по корреляционным моментам статистических значений вероятностных характеристик по тем же экспериментам, что и сами вероятностные характеристики [3].

Задача получения комплексированной оценки решена как задача определения оптимальной оценки одного и того же параметра (измеряемой массы) по экспериментальным значениям вероятностных характеристик сигналов трех датчиков и точным значениям вероятностных

характеристик соответствующих аналитических моделей. В отличие от [3], при построении упрощенной модели, допускающей аналитическое решение, использовалась комбинация методов дискретизации процессов в исходной нелинейной системе и предельного перехода от дискретной модели к непрерывной модели [2]. В результате в исходной и в упрощенной моделях рассматривались несколько различные физические процессы, но выходные процессы обеих систем жестко коррелированы и допускают одинаковую интерпретацию.

Математическая модель частного измерителя массы по гармоническому сигналу одного из датчиков может быть представлена в виде линейной динамической системы с постоянными параметрами, на вход которой в общем случае поступают три стационарных случайных процесса (соответствующих амплитуде, периоду и фазе). Эти процессы характеризуются гладкими свойствами и получают в результате выявления трех основных параметров одного и того же выходного сигнала датчика. В режиме вынужденных колебаний аналитическое представление выхода по периоду напряжения питания совпадает с периодом задающего воздействия. Известно, что размер энтропийного интервала неопределенности среднего значения меньше, чем максимальный размер энтропийного интервала неопределенности усредняемых сигналов [4]. Поэтому для повышения точности оценки в схему измерителя введено два сумматора – внешний и внутренний. Стационарный случайный процесс на выходе внутреннего сумматора сформирован в виде взвешенной суммы трех входных процессов, каждый из которых соответствует выходу одного из частных измерителей.

Основные трудности с получением точной и достоверной оценки погрешности полезного сигнала на выходе измерителя массы в невесомости связаны со сложным характером плотностей вероятностей, характеризующих распределение погрешностей каждого из частных измерителей массы. Это обстоятельство усложнило решение задачи определения расчетным путем результирующей погрешности по известным оценкам ее составляющих (задача суммирования погрешностей). Однако эти трудности были преодолены благодаря специфическим особенностям корреляционных связей между входными параметрами: параметры разделяются на две группы – жестко коррелированные и некоррелированные.

Сложным характером плотностей вероятностей обусловлен и выбор информационного подхода в качестве метода оценки погрешностей, так как размер энтропийного интервала неопределенности (обобщение понятия доверительного интервала) может быть вычислен для любого известного закона распределения. Размер энтропийного интервала неопределенности ошибки оценки принят в качестве показателя оптимальности оценивания измеряемой массы.

Погрешность оценки измеряемой массы разработанным измерителем в диапазоне (0 – 50) граммов не превышает 0,01%, что вдвое меньше, чем у известных измерителей массы.

Таким образом, новый принцип построения измерителя массы в условиях микрогравитации позволил создать прибор, пригодный для использования на борту космических станций.

#### Литература

1. Воронков В.С., Сигульников С.А. Весы с магнитным подвесом./ "Приборы и техника эксперимента", №3, 1996. М.: Наука. 1996. С.151-155.
2. Сапожников Г.А., Богословский С.В., Кизимов А.Т. Теория и практика измерительных электромагнитных подвесов. СПб.: ГУАП, 2001. 384 с.
3. Пугачев В.Н. Комбинированные методы определения вероятностных характеристик. М.: "Сов. радио", 1973. 256 с.
4. Шеннон К. Работы по теории информации и кибернетике. М.: ИЛ, 1963. 832 с.