

На правах рукописи



Сушников Виктор Александрович

**МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ПОГРЕШНОСТЕЙ НЕЦЕНТРАЛЬНОГО
НАГРУЖЕНИЯ ОДНОТОЧЕЧНЫХ ВЕСОИЗМЕРИТЕЛЬНЫХ
УСТРОЙСТВ С ТЕНЗОРЕЗИСТОРНЫМИ И ЕМКОСТНЫМИ
ДАТЧИКАМИ**

Специальность: 05.11.01 – Приборы и методы измерения
(измерения механических величин)

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург – 2011

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель: кандидат технических наук, доцент
Кудряшов Эдуард Алексеевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Измайлов Рудольф Александрович

кандидат технических наук
Кубланов Михаил Яковлевич

Ведущая организация: ООО «АВИТЕК-ПЛЮС»
620077, г.Екатеринбург, а/я 127

Защита состоится «30» декабря 2011 года в 16-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 при ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая д.29, IX учебный корпус, ауд. 121.

Отзыв на автореферат в 2-х экземплярах, заверенный гербовой печатью, просим направлять по адресу: 194021, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д.21, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.229.10.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет».

Автореферат разослан «29» ноября 2011 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Кудряшов Э.А.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В торговле, промышленности, медицине, спорте и в быту широкое применение находят цифровые весы с верхним расположением грузоприемной платформы. Показания таких весов в той или иной степени зависят от расположения измеряемой массы на грузоприемной платформе весов. Наиболее радикальным способом снижения упомянутой погрешности, называемой так же дополнительной погрешностью нецентрального нагружения, является использование нескольких датчиков силы, на которые опирается грузоприемная платформа весов. Однако этот путь ведет к усложнению и удорожанию конструкции весов и реализуется главным образом в стационарных весовых устройствах, например, автомобильных, складских и т.д. Поэтому более широкое распространение получили так называемые одноточечные платформенные весоизмерительные устройства (далее ВУ), в которых грузоприемная платформа крепится на одном датчике силы, в качестве которого используются преимущественно тензорезисторные датчики силы с изгибным упругим элементом (УЭ) типа двойной консольной балки (рамочным упругим элементом). ВУ с тензорезисторными датчиками силы выпускают большое число отечественных и зарубежных фирм, например: «Тензо-М», «Масса-К», «УралВес», «НВМ», «Honeywell», «Sartorius» и др. Теоретически в них возможна полная компенсация паразитных продольных и поперечных моментов сил, возникающих при нецентральном положении измеряемой массы на грузоприемной платформе. Однако реально такие ВУ обеспечивают лишь средний класс точности, соответствующий погрешности измерения массы на уровне 0,05-0,2%. Научный и практический интерес представляет исследование потенциальных возможностей снижения дополнительной погрешности нецентрального нагружения одноточечных тензорезисторных весоизмерительных устройств.

Сравнительно недавно на рынке появились емкостные датчики силы и ВУ на их основе. Уже в настоящее время погрешность измерения силы подобных датчиков, например, датчиков фирмы «Loadstar sensors» (США), достигает $\pm 0,01\%$. Большие потенциальные возможности емкостных датчиков косвенно подтверждаются тем обстоятельством, что в настоящее время электрическая емкость, как физическая величина, воспроизводится и измеряется с точностью большей, чем электрическое сопротивление. Имеется информация о разработке емкостных датчиков силы с рамочными упругими элементами. В связи с этим

представляет научный и практический интерес исследование дополнительных погрешностей нецентрального нагружения ВУ с емкостными датчиками и разработка рекомендаций по снижению этих погрешностей до уровня, обеспечивающего их конкурентоспособность с тензорезисторными.

Цель работы. Разработка, теоретическое и экспериментальное обоснование путей снижения погрешностей нецентрального нагружения ВУ на базе тензорезисторных и емкостных датчиков силы.

Задачи работы:

- анализ причин возникновения погрешностей нецентрального нагружения в ВУ на базе тензорезисторных и емкостных датчиков силы с упругими элементами рамочного типа;

- исследование зависимостей продольных деформаций рамочного упругого элемента тензорезисторного датчика силы от его конструктивных параметров в условиях воздействия паразитных моментов сил, порождаемых нецентральным положением измеряемой массы на грузоприемной платформе;

- анализ полученных зависимостей и разработка рекомендаций по снижению дополнительных погрешностей нецентрального нагружения тензорезисторных ВУ;

- исследование зависимостей линейных и угловых перемещений свободного конца рамочного УЭ от его конструктивных параметров в условиях воздействия паразитных моментов сил, порождаемых нецентральным положением измеряемой массы на грузоприемной платформе;

- анализ полученных зависимостей и разработка рекомендаций по снижению дополнительных погрешностей нецентрального нагружения ВУ с емкостными измерительными преобразователями;

- экспериментальное исследование предложенных методов снижения погрешности нецентрального нагружения.

Методы исследования. При решении выше упомянутых задач использовались аналитические расчеты, численное моделирование и экспериментальные методы исследования. При обработке результатов численного моделирования и экспериментальных исследований использовался аппарат математической статистики.

Научная новизна результатов заключается в следующем:

- получены зависимости паразитных продольных деформаций от конструктивных параметров рамочного упругого элемента, позволяющие сформулировать требования к степени асимметрии чувствительности

тензорезисторных каналов, необходимой для снижения дополнительной погрешности нецентрального нагружения до заданного уровня;

- предложен, обоснован теоретически и экспериментально метод снижения погрешности нецентрального нагружения ВУ с рамочным упругим элементом и емкостным измерительным преобразователем, состоящий в одновременном совмещении центра подвижного электрода емкостного преобразователя с точкой пересечения осей продольного и поперечного поворотов свободного конца упругого элемента, возникающих при нецентральном нагружении;

- предложены методики численного расчета координат точки пересечения осей вращения и погрешностей оценок этих координат, подтверждаемые результатами эксперимента.

Практическая ценность работы состоит:

- в разработке рекомендаций по выбору ряда конструктивных параметров, влияющих на величину дополнительной погрешности нецентрального нагружения и допустимую величину разброса чувствительности тензорезисторных каналов ВУ;

- в обосновании направления исследований по разработке более перспективных, по сравнению с тензорезисторными, ВУ на базе рамочных упругих элементов с емкостными измерительными преобразователями.

Достоверность полученных результатов подтверждается решением тестовых задач и результатами экспериментальных исследований опытных образцов упругих элементов и макетов ВУ с емкостным измерительным преобразователем.

Положения выносимые на защиту:

- результаты исследования зависимости величины дополнительной погрешности нецентрального нагружения от ряда конструктивных параметров и допустимой степени разброса чувствительности тензорезисторных каналов ВУ;

- метод снижения погрешности нецентрального нагружения ВУ с рамочным упругим элементом и емкостным измерительным преобразователем, состоящий в одновременном совмещении центра подвижного электрода емкостного преобразователя с точкой пересечения осей продольного и поперечного поворотов свободного конца упругого элемента, возникающих при нецентральном нагружении;

- методики численного расчета координат и погрешностей оценки

координат точки пересечения осей продольного и поперечного поворотов рамочного УЭ, порождаемых нецентральной нагрузкой;

- рекомендации по увеличению соотношения поворотной и изгибной жесткостей упругих элементов.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на научно-технических семинарах кафедры «Измерительные информационные технологии» СПбГПУ, а также на 5 научно-практических конференциях.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 8 печатных работ. Из них 3 статьи в журналах, рекомендуемых ВАК.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка используемой литературы. Объем работы составляет 115 страниц машинописного текста, 59 рисунков, 12 таблиц. Список литературы состоит из 84 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность работы, сформулированы цель и задачи исследований, отмечена научная новизна, практическая ценность и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе произведен обзор существующих тензорезисторных и емкостных датчиков силы и ВУ на их основе.

На рис.1а показано схематическое изображение конструкции типового ВУ с тензорезисторным датчиком силы. Датчик силы содержит рамочный УЭ и четыре тензорезистора 1,2,3,4, оси чувствительности которых ориентированы вдоль оси X . Тензорезисторы включены в мостовую схему (на рисунке не показана).

На рис.1б показан характер распределения на нижнем основании продольных деформаций $\varepsilon(x)$ при центральном расположении измеряемой массы. На рис.1 пунктиром показаны координаты пиковых значений продольных деформаций $\varepsilon(x)$ и центров тензорезисторов 1-4. Знаки пиковых значений продольных деформаций в местах расположения тензорезисторов, указанные на рис.1, позволяют заключить, что полезная деформация мостовая схема суммирует. Как следует из обзора литературы, основным фактором, влияющим на погрешность нецентрального нагружения подобного ВУ, является смещение измеряемой массы вдоль оси X (рис.1а). Возникающий паразитный момент вызывает однородные деформации растяжения верхнего

основания и сжатия нижнего. В мостовой схеме при этом происходит попарная компенсация упомянутых паразитных деформаций. Точность компенсации зависит от величины разброса значений чувствительности тензорезисторных каналов 1-4. Дополнительная погрешность от смещения измеряемой массы в направлении оси Y , как следует из литературы, играет существенно меньшую роль, т.к. кручение вокруг оси X приводит к возникновению деформаций сдвига в плоскости XU оснований и среднее значение продольных деформаций, воспринимаемых тензорезисторами, близко к нулю.

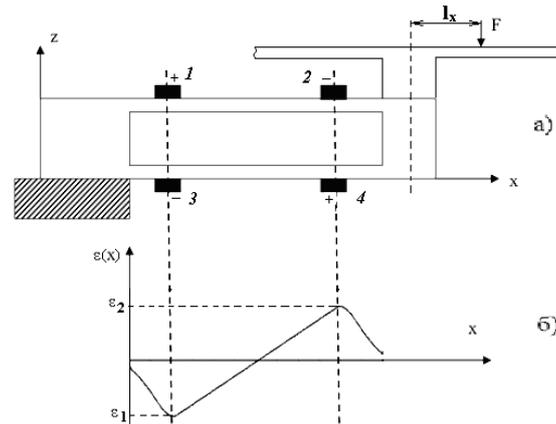


Рис. 1 Схематическое изображение конструкции ВУ

Для дополнительной погрешности нецентрального нагружения ВУ с тензорезисторным датчиком силы (рис.1) в диссертации получено выражение:

$$\gamma = \frac{K_1 |\varepsilon_{p1}| - K_2 |\varepsilon_{p2}| - K_3 |\varepsilon_{p3}| + K_4 |\varepsilon_{p4}|}{K_1 |\varepsilon_{s1}| + K_2 |\varepsilon_{s2}| + K_3 |\varepsilon_{s3}| + K_4 |\varepsilon_{s4}|} \approx \frac{\varepsilon_p \cdot \gamma_k}{\varepsilon_{x\max} \cdot (1 - \gamma_\varepsilon - \gamma_s)}, \quad (1)$$

где K_i – чувствительность i -го тензорезистора к продольной деформации оснований; ε_{pi} и ε_{si} – значения паразитной продольной деформации и средние по длине тензорезистора значения полезной продольной деформаций УЭ в местах установки тензорезисторов.

К числу наиболее важных факторов, приводящих к возникновению дополнительной погрешности, следует отнести:

- величину отношения $\varepsilon_p/\varepsilon_{x\max}$ значений паразитной и максимальной полезной продольных деформаций, зависящую от параметров УЭ;
- разброс $\gamma_k = \Delta K/K$ значений чувствительности тензорезисторных каналов к продольной деформации оснований;
- степень асимметрии γ_ε модулей пиковых значений $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \varepsilon_4$ полезной деформации, зависящей от конструктивных параметров УЭ;
- степень асимметрии γ_s модулей средних по длине тензорезистора значений полезной деформации ε_{si} .

Формализовать и дать теоретическую оценку степени разброса чувствительности тензорезисторных каналов γ_k , зависящей от технологии изготовления тензорезисторов, УЭ и качества их соединения, не представляется возможным. Задача исследования состоит в том, чтобы сформулировать требования к допустимому значению γ_k , при котором мостовая схема в состоянии подавить паразитные деформации с заданной точностью. Эту задачу можно решить путем исследования зависимостей полезных деформаций $\varepsilon(x)$ и паразитных деформаций $\varepsilon_p(x)$, порождаемых нецентральной нагрузкой, от конструктивных параметров УЭ.

На рис.2 приведена упрощенная конструкция ВУ с рамочным УЭ и емкостным измерительным преобразователем (ЕП).

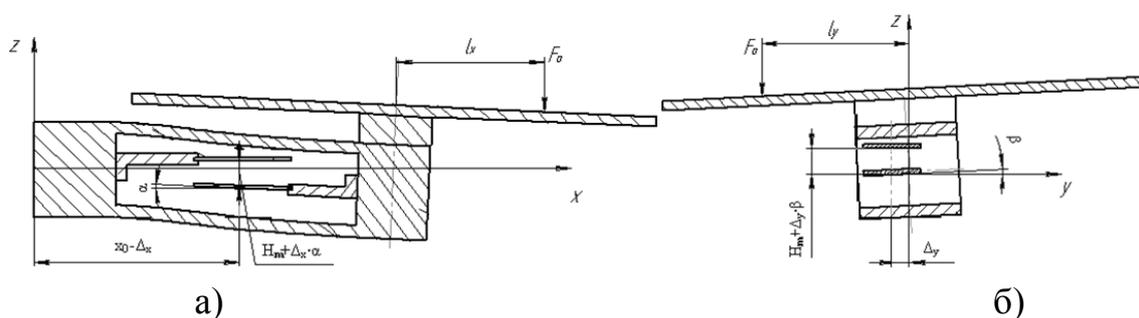


Рис.2 Весоизмерительное устройство с емкостным преобразователем

Основной причиной появления дополнительной погрешности нецентрального нагружения в этом случае являются повороты свободного конца УЭ, возникающие в плоскости XZ (рис.2а) и в плоскости YZ (рис.2б). Обозначим H_m величину воздушного зазора между электродами емкостного преобразователя при центральном положении нагрузки. Пусть координата оси вращения свободного конца УЭ в плоскости XZ равна x_0 , а координата центра подвижного электрода составляет $x_0 + \Delta_x$. Тогда дополнительное перемещение подвижного электрода вследствие смещения измеряемой массы, как показано на рис.3а, можно описать перемещением его центра на величину $\Delta_z = \Delta_x \cdot \alpha$ и поворотом вокруг его центра на угол α . Относительное изменение рабочей емкости между электродами ЕП, обусловленное упомянутыми перемещениями, можно представить в виде:

$$\gamma_{1x} \approx \frac{\Delta_x \cdot \alpha}{H_m}, \quad \gamma_{2x} \approx \frac{(a \cdot \alpha)^2}{12 \cdot H_m^2}, \quad (2)$$

где a – длина электрода. Относительные погрешности измерения емкости, возникающие при смещении измеряемой массы от центра платформы вдоль оси Y в поперечном сечении (рис.2б), будут иметь аналогичный вид:

$$\gamma_{1y} \approx \frac{\Delta_y \cdot \beta}{H_m}, \quad \gamma_{2y} \approx \frac{(b \cdot \beta)^2}{12 \cdot H_m^2}, \quad (3)$$

где b – ширина подвижного электрода, Δ_y – расстояние между центрами подвижного электрода и осью кручения (осью X) УЭ, β – угол поворота. Из уравнений (2) и (3) следует вывод о необходимости одновременного совмещения центра подвижного электрода с точкой пересечения осей поворота свободного конца УЭ, ибо при Δ_x и $\Delta_y \rightarrow 0$ дополнительные погрешности γ_{1x} и $\gamma_{1y} \rightarrow 0$. Погрешности γ_{2x} и γ_{2y} второго порядка малости, не зависящие от знака угла поворота, могут быть исключены при необходимости применением дифференциальной конструкции емкостного преобразователя.

Для оценки возможности практической реализации предлагаемого метода необходимо:

- исследовать вид упругих линий УЭ при различных способах нагружения;
- разработать методики численного расчета углов поворота α и β свободного конца УЭ рамочного типа и рекомендации по их снижению;
- разработать методику расчета координаты x_0 оси вращения свободного конца УЭ в плоскости XZ и погрешности упомянутой координаты;
- разработать и изготовить макетный образец емкостного ВУ и выполнить экспериментальные исследования с целью подтверждения теоретических результатов.

Вторая глава посвящена разработке аналитических и численных методов расчета полезных и паразитных деформаций, а также упругих линий рамочного УЭ при различных способах нагружения.

Известен аналитический метод расчета эпюр продольных деформаций $\varepsilon(x)$ и упругих линий $z(x)$ рамочных конструкций при их изгибе, основанных на методе фиктивных сил. Однако основанием для применения этого метода является допущение об отсутствии поворота поперечного сечения свободного конца УЭ. По этой причине метод фиктивных сил может быть использован только для класса УЭ, имеющих достаточно высокое соотношение толщин свободного конца и оснований УЭ. В частности, последнее обстоятельство не мешает использовать этот метод как тестовый при оценке достоверности численных расчетов $\varepsilon(x)$ и $z(x)$. Аналитические методы использовались также для расчета углов закручивания при воздействии поперечных моментов, возникающих при смещении центра тяжести измеряемой массы вдоль оси Y (поворот вокруг оси X). Однако основным методом расчета в диссертации

принят метод конечных элементов (МКЭ). Этот метод расчета деформаций и перемещений в механических конструкциях уже стал общепризнанным, и методика его применения детально изложена в литературе. Для его практической реализации известно большое число программ, среди которых наиболее известны «Ansys», «SCAD», «ELCUT» и др.

Рабочая область рамочного УЭ представляет верхнее и нижнее основания, толщины которых, как правило, много меньше ширины УЭ. По этой причине распределение деформаций и смещений во всех продольных сечениях рамочного УЭ можно считать одинаковыми, а следовательно, использовать для их получения двумерную модель изгиба в плоскости XZ , реализуемую с существенно меньшими затратами ресурсов и времени.

В реальных ВУ рамочный УЭ крепится к корпусу с помощью болтовых соединений. Моделирование жесткости болтовых соединений является самостоятельной задачей. По этой причине для исследования дополнительной погрешности нецентрального нагружения была принята модель с абсолютным жестким закреплением левого конца УЭ по схемам рис.3(б, в). Для упрощения учета моментов сил, порождаемых нецентральным нагружением, моделирование УЭ проводилось вместе с грузоприемной платформой.

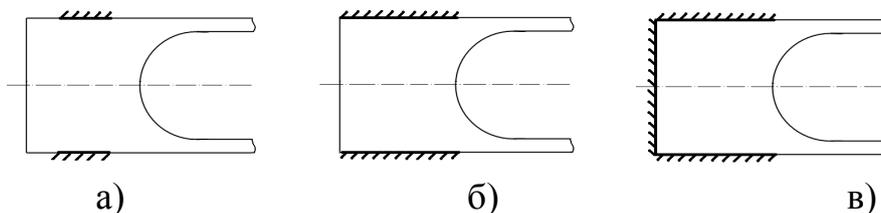


Рис.3 Способы закрепления упругого элемента

Во второй главе также рассмотрено влияние количества узлов конечно-элементной сетки на точность определения пиковых значений продольной деформации (рис.4а) и прогиба свободного конца УЭ (рис. 4б).

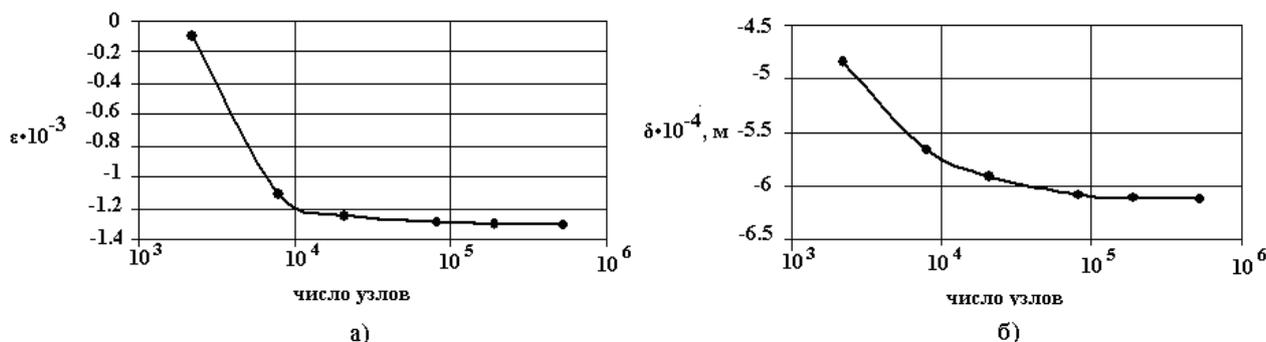


Рис. 4 Зависимость деформации и прогиба рамочного упругого элемента от количества узлов конечно-элементной сетки

Из рис.4 видно, что для достаточно точного определения значений деформаций и прогиба УЭ МКЭ необходимо проводить моделирование с количеством узлов не менее 500 тыс.

Результатом моделирования являются функции распределения продольной деформации и упругие линии типового УЭ (рис.5) при центральном нагружении (кривая 1) и с учетом механических моментов (кривые 2 и 3).

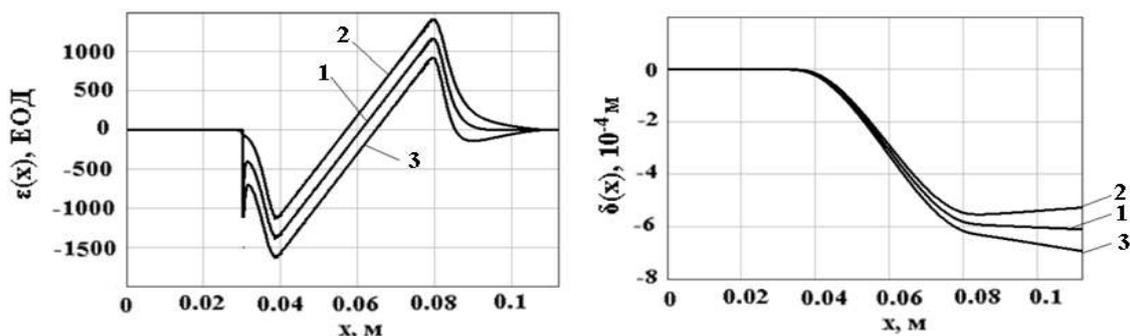


Рис.5 Распределение продольной деформации и вид упругих линий

Для нахождения значений угла кручения свободного конца УЭ в плоскости XZ была разработана специальная методика, которая заключается в следующем. Для расчета углов была рассмотрена только часть упругой линии, описывающая перемещение свободного конца УЭ. На рис.6 эти части упругих линий показаны жирными линиями.

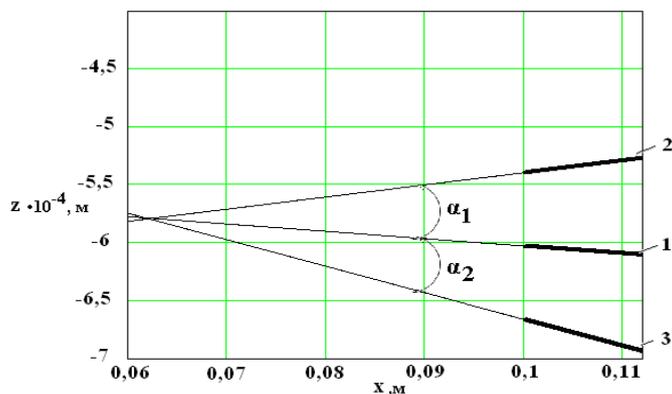


Рис.6 Углы кручения свободного конца упруго элемента в плоскости XZ

Углы кручения (рис.6) свободного конца УЭ в плоскости XZ можно найти из выражений:

$$\alpha_1 = \arctg\left(\frac{A_1 - A_2}{1 + A_1 A_2}\right) \text{ и } \alpha_2 = \arctg\left(\frac{A_1 - A_3}{1 + A_1 A_3}\right),$$

где α_1 – угол кручения при положительном продольном моменте; α_2 – при

отрицательном; A_i – коэффициенты чувствительности прямых 1-3(рис.6), аппроксимирующих массивы точек, по которым построены упругие линии свободного конца УЭ при различных способах нагружения.

Влияние поперечного момента (вращение УЭ вокруг оси Y) в диссертации исследуется аналитически с использованием известных формул кручения балок сложного сечения.

Третья глава посвящена разработке рекомендаций по снижению дополнительной погрешности (1) нецентрального нагружения ВУ с тензорезисторными датчиками силы.

В УЭ тензорезисторных датчиков распределение полезных продольных деформаций $\varepsilon(x)$, как правило, сильно неоднородно (рис.1б), поэтому реальные значения чувствительности тензорезисторных каналов в значительной мере определяется местом установки и выбором размера (базы) тензорезистора.

Реальный тензорезистор преобразует в изменение сопротивления среднее значение относительной деформации, зависящее от координаты c центра и величины базы d тензорезистора:

$$\varepsilon(c, d) = \frac{1}{d} \int_{c-0.5d}^{c+0.5d} \varepsilon(x) dx .$$

В этом случае случайный разброс чувствительности любого из четырех тензорезисторных каналов зависит от величины базы d и технологических отклонений τ центра тензорезистора от точки с координатой, соответствующей одному из экстремумов распределения $\varepsilon(x)$:

$$\gamma_s(\tau, d) \approx \frac{\varepsilon_i - \varepsilon(x_i + \tau, d)}{\varepsilon_i} \cdot 100\% ,$$

где x_i – значения координаты x , соответствующей экстремальному значению ε_i относительной продольной деформации $\varepsilon(x)$.

На рис. 7 представлены результаты моделирования вариаций чувствительности тензорезисторного канала, реагирующего на деформацию сжатия.

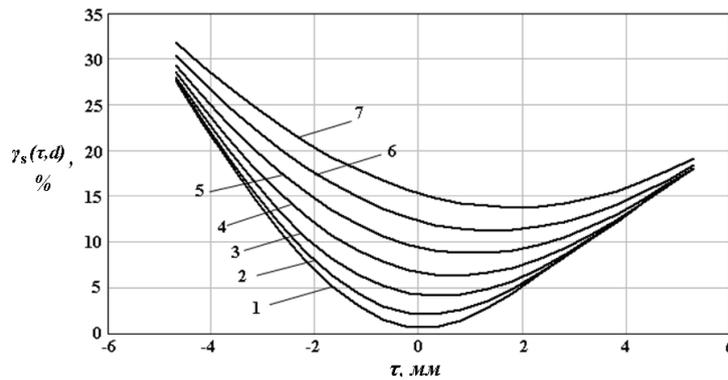


Рис. 7 Зависимость вариаций чувствительности тензорезисторного канала в датчике силы с рамочным упругим элементом:

1 – $d=2$ мм; 2 – $d=4$ мм; 3 – $d=6$ мм; 4 – $d=8$ мм; 5 – $d=10$ мм; 6 – $d=12$ мм;
7 – $d=14$ мм

Из результатов моделирования видно, что как ошибка установки, так и увеличение базы d тензорезистора приводит к снижению чувствительности тензорезисторного канала.

Асимметрия модулей пиковых значений деформации зависит от конструктивных параметров УЭ, в качестве которых были использованы относительная толщина выемки λ и относительная длина выемки μ (рис.8), определяемых выражениями:

$$\lambda = \frac{2R}{H} \cdot 100 \% ; \quad \mu = \frac{L - a - c}{L} \cdot 100 \% .$$

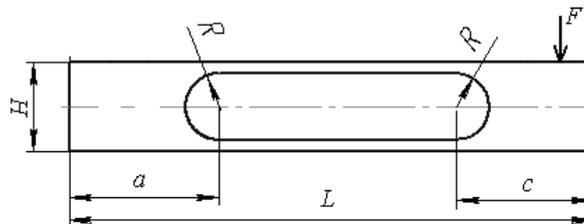


Рис.8 Эскиз упругого элемента

Обработка результатов численного моделирования асимметрии распределения продольной деформации проводилась по формуле:

$$\gamma_\varepsilon(\lambda, \mu) = 1 - \left| \frac{\varepsilon_2(\lambda, \mu)}{\varepsilon_1(\lambda, \mu)} \right| \cdot 100\% ,$$

где ε_1 и ε_2 – пиковые значения продольной деформации по нижнему основанию рамы (рис.1б). На рис.9 изображено семейство кривых, характеризующих зависимость степени асимметрии модулей пиковых значений деформации от конструктивных параметров УЭ.

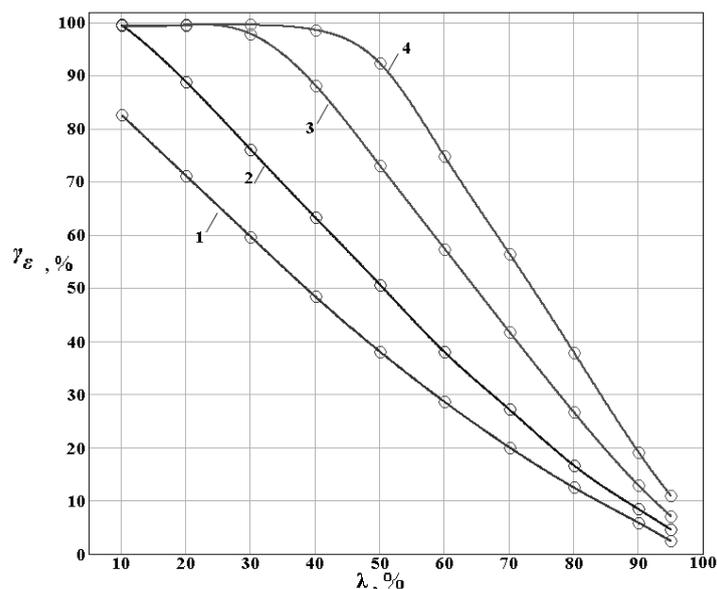


Рис. 9 Зависимость степени асимметрии модулей пиковых значений деформации от конструктивных параметров λ и μ :
 1 – $\mu=70\%$; 2 – $\mu=50\%$; 3 – $\mu=30\%$; 4 – $\mu=20\%$

Как видно из рис.9, наибольшие значения асимметрии модулей экстремальных значений $\varepsilon(x)$ полезной деформации характерны для малых значений параметров μ и λ . Это приводит к существенному снижению величины знаменателя в формуле (1), и, следовательно, повышению чувствительности к паразитным моментам. При достаточно больших значениях параметров μ и λ , например, $\mu = 70\%$ и $\lambda = 95\%$, $\gamma_\varepsilon(\lambda, \mu) = 3\%$ и ее влияние на величину дополнительной погрешности становится несущественным.

Далее в диссертации получены зависимости паразитных продольных деформаций $\varepsilon_p(x)$, порождаемых нецентральной позицией измеряемой массы на грузоприемной платформе, от конструктивных параметров УЭ. Как и следовало ожидать, уровень паразитных деформаций не зависит от координаты x . На рис.10 изображены результаты численного моделирования зависимости уровня ε_p паразитных деформаций от конструктивного параметра λ при значениях параметров конструкции УЭ: $L=112$ мм, $c=32$ мм, $F=200$ Н, $R=8$ мм, $H=20$ мм, $P=20$ мм (ширина УЭ), $E=2,1 \cdot 10^{11}$ Па, $M=\pm 10$ Н·м (паразитный момент). Для всех вариантов УЭ, отличающихся значениями параметра λ , обозначенными на рис.10 кружками, полезная продольная деформация УЭ $\varepsilon_l = 1000$ ЕОД.

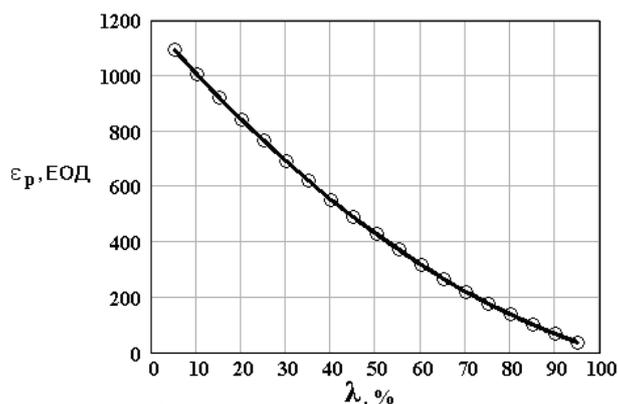


Рис.10 Зависимость абсолютных значений паразитных деформаций от параметра λ ($\mu=70\%$)

Из рис.10 видно, что при малых значениях параметра λ паразитные продольные деформации сравнимы с пиковыми значениями полезной продольной деформацией. Для подавления столь высокого уровня паразитных деформаций до $0,1\%$ технологический разброс чувствительности тензорезисторных каналов не должен превышать значения $0,1\%$. При увеличении параметра λ до 95% уровень паразитных деформаций уменьшается до 30 EOD , подавить который легче. Даже в этом случае, достижение класса точности ВУ $0,1\%$ возможно при степени разброса чувствительности тензорезисторных каналов $\gamma_k \leq 3\%$.

Четвертая глава посвящена разработке рекомендаций по снижению дополнительных погрешностей нецентрального нагружения ВУ с рамочным упругим элементом, снабженным емкостным измерительным преобразователем.

Известно, что ось кручения свободного конца УЭ в поперечной плоскости YZ совпадает с осью X (рис.2б). Оценить дополнительные погрешности (3), возникающие при смещении измеряемой массы от центра платформы вдоль оси Y , нетрудно, равно, как и сформулировать требования к Δ_y , обеспечивающие заданные значения γ_{1y} и γ_{2y} .

Для снижения дополнительной погрешности (2) было предложено совместить центр подвижного электрода с координатой x_0 центра поворота свободного конца УЭ. При отсутствии нагрузки центр подвижного электрода расположен в точке A с координатами $(x_0, 0)$ (рис.11). При наложении на грузоприемную платформу измеряемой массы центр подвижного электрода перемещается в точку A' с координатами (x_0, z_m) , где координата z_m пропорциональна измеряемой массе:

$$z_m = k \cdot g \cdot m .$$

Для определения координаты x_0 , зависящей от геометрических размеров и физических свойств материала УЭ, были выполнены расчеты упругих линий (рис.11) при различных способах нагружения весового устройства. На рис.11 прямая 1 описывает перемещение свободного конца УЭ при центральном расположении массы на грузоприемной платформе, прямые 2 и 3 изображают случаи при смещении массы вдоль оси X на величину l_x и $-l_x$ соответственно.

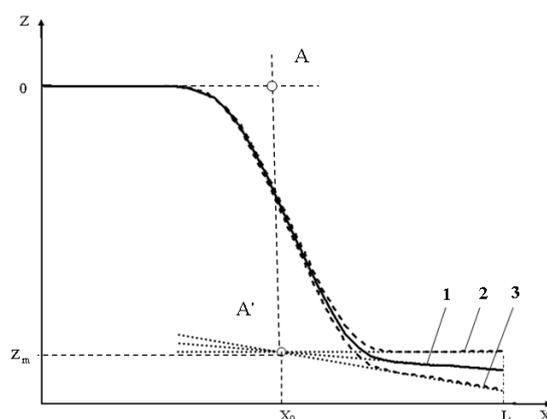


Рис.11 Расчет точки кручения упругого элемента

Координату x_0 оси, относительно которой происходит закручивание, можно получить как точку пересечения прямых 1,2,3. Обозначим координаты x_{01} и x_{02} как координаты пересечения прямых 1,2 и 1,3:

$$x_{01} = \frac{B_2 - B_1}{A_1 - A_2} \quad x_{02} = \frac{B_3 - B_1}{A_1 - A_3}, \quad (4)$$

где A_i и B_i — коэффициенты прямых $Z_i = A_i x + B_i$ ($i = 1, 2, 3$), аппроксимирующих массивы точек, описывающих перемещение свободного конца УЭ при различных способах нагружения.

Упругие линии изучались на образце весового устройства с УЭ имеющим параметры: $R=8\text{мм}$, $L=112\text{мм}$, $a=38\text{мм}$, $c=32\text{мм}$, $H=20\text{мм}$, $P=20\text{мм}$, $E=2,1 \cdot 10^{11} \text{Па}$ (модуль Юнга), $F=200 \text{Н}$, $M=10 \text{Н}\cdot\text{м}$.

При решении задачи (4) выяснилось, что пересечение прямых 1,2,3 в одной точке возможно лишь при закреплении грузоприемной платформы в определенной точке УЭ, в которой углы поворота свободного конца УЭ при воздействии положительного и отрицательного продольных моментов одинаковы. Координата x этой точки равна 90мм .

Результаты этих исследований показаны на рис.12. На рис.12 а, б, в, показаны положения точек пересечения прямых 1,2 и 1,3 для случая закрепления грузоприемной платформы в точках УЭ с координатами

$x=85,90,95$ мм соответственно.

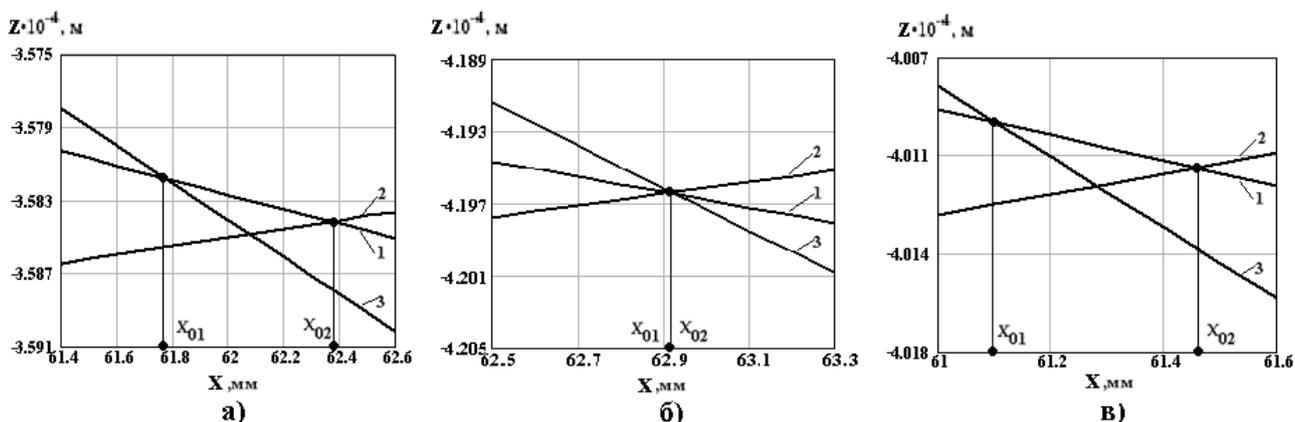


Рис.12 Фрагменты аппроксимирующих прямых, в окрестности их пересечения

Из рис.12 следует, что при $x=90$ мм упомянутые точки совпадают, а координата точки, через которую проходит ось кручения в плоскости XZ , оказывается равной $x_0=62,92$ мм.

Были также вычислены погрешности оценки координаты x_0 . Для этого определялись средние квадратические значения коэффициентов A_1, A_2, B_1, B_2 аппроксимирующих прямых. Затем методом Монте-Карло определялся одномерный массив случайных координат точки пересечения прямых. Оценка среднего квадратического значения элементов массива составила $s_x=3$ мкм. Это значение определяет потенциальную точность совмещения центра подвижного электрода с координатой x_0 значением $\Delta_x \approx \pm 10$ мкм. Для снижения требований по точности совмещения центра подвижного электрода емкостного преобразователя с осью X и точкой x_0 в диссертации выполнена разработка УЭ с большим соотношением поворотной и изгибной жесткостей. На рис.13 показана зависимость углов α и β от ширины P и формы профиля выемки УЭ. Конструктивные параметры восьми вариантов УЭ задавались таким образом, чтобы значения прогиба свободного конца, максимальные механические напряжения, номинальная нагрузка и крутящий момент составляли 250 мкм, 250 МПа, 150 Н, 15 Н·м соответственно.

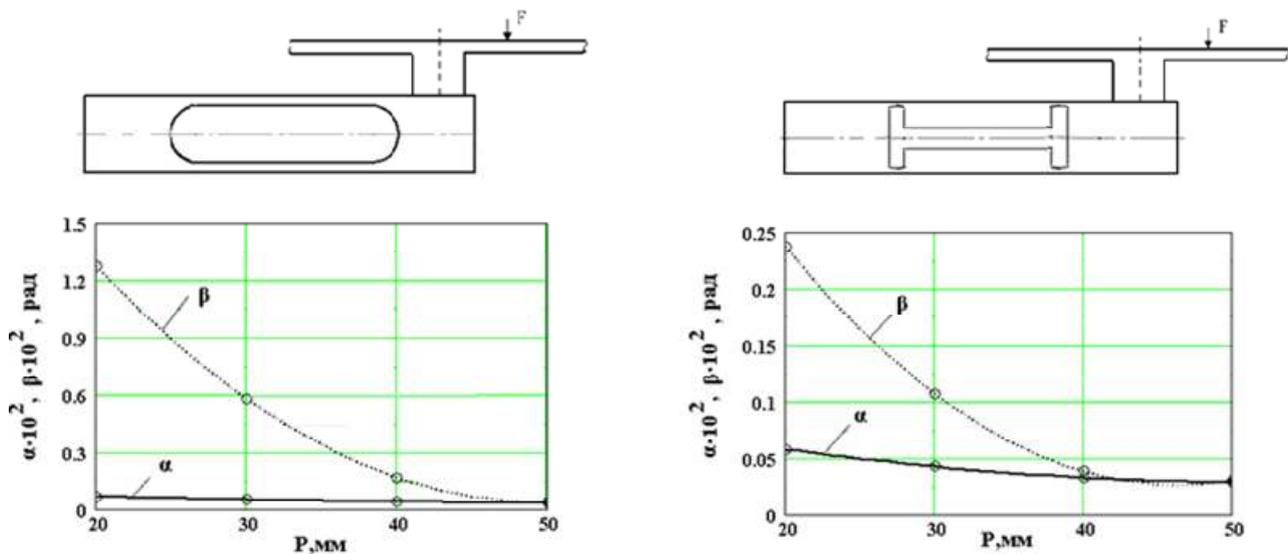


Рис.13 Углы поворота при ширине УЭ $P=20, 30, 40, 50$ мм

Из рис.13 видно, что наибольший эффект по увеличению поворотной жесткости может быть получен при использовании УЭ с профилем выемки специальной формой (ПСФ). В частности, применение УЭ с ПСФ и шириной 50 мм позволяет снизить значения углов кручения до $\alpha \approx 2,8 \cdot 10^{-4}$ рад, $\beta \approx 2,8 \cdot 10^{-4}$ рад.

Для снижения дополнительной погрешности до уровня 0,01% в ВУ с выше упомянутым УЭ достаточна точность установки подвижного электрода ЕП не превышающая значений $\Delta_x \leq 0,2$ мм, $\Delta_y \leq 0,2$ мм. Таким образом, ВУ с рамочными УЭ и емкостными измерительными преобразователями могут быть вполне конкурентоспособны с тензорезисторными ВУ.

В пятой главе представлены результаты экспериментального обоснования разработанного в четвертой главе метода снижения дополнительной погрешности нецентрального нагружения ВУ с емкостным датчиком силы. Для этого был разработан макет весового устройства, внешний вид которого показан на рис.14а. Он содержит грузоприемную платформу 1, размером 200x200 мм, и раму 2, с которыми жестко соединен УЭ, конструкция которого соответствует рис.8. На рис.14 б,в показан УЭ с держателями 3 и 4 вставок 5 и 6, в которых установлены рабочие электроды емкостного преобразователя. Держатели снабжены пазами, в которых вставки с электродами могут перемещаться по осям X и Z (рис.14 г).

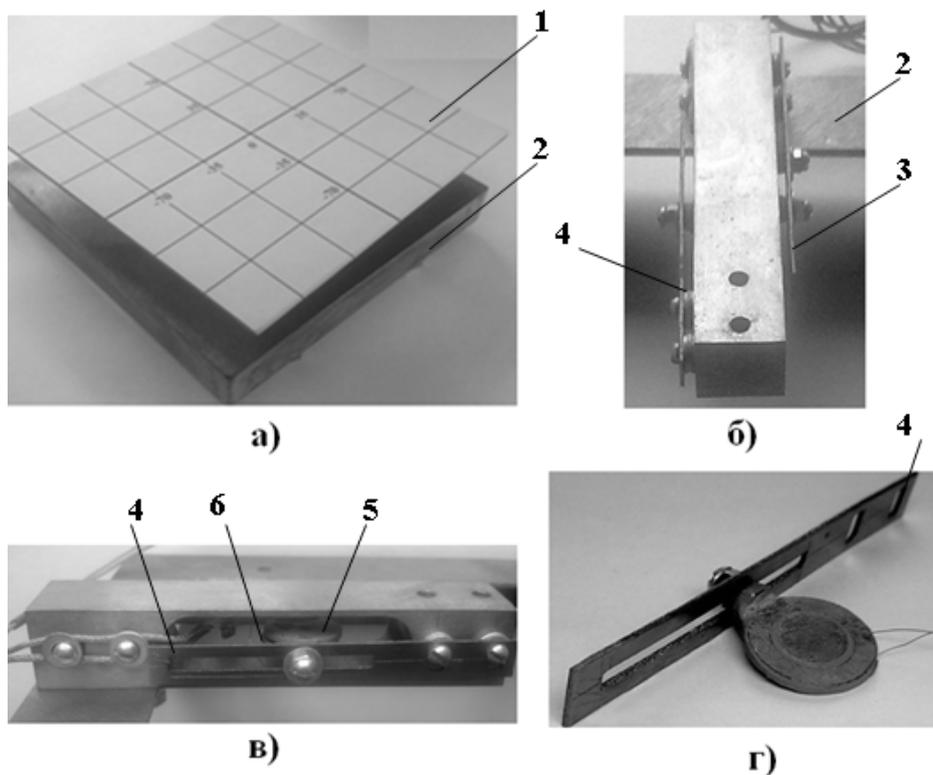


Рис.14 Макет весоизмерительного устройства
 а) внешний вид; б),в) вид на УЭ; г) крепление электрода

Электрическая емкость между рабочими электродами измерялась с помощью трансформаторного моста Р589, имеющего разрешение $0,001nФ$. Низкопотенциальный рабочий электрод имеет диаметр 10 мм и окружен соединенным с землей охранным электродом, внешний диаметр которого составляет 20 мм . Высокопотенциальный рабочий электрод имеет диаметр 20 мм . В воздушном зазоре благодаря этому поддерживается однородное электрическое поле, а рабочая емкость между электродами соответствует формуле плоского конденсатора. Схема соединения рабочих электродов ЕП с цифровым мостом Р589 изображена на рис.15. На рис. 15 указаны паразитные емкости C_{n1} и C_{n2} и сопротивления изоляции R_{n1} и R_{n2} рабочих электродов относительно корпуса (земли). Они составляют соответственно 30 нФ и 1 ГОм . На рабочей частоте 1000 Гц выходное сопротивление источника питания U и входное сопротивление указателя Y моста имеют существенно меньшие значения. Благодаря этому упомянутые значения паразитных параметров ЕП не влияют на результат измерения рабочей емкости.

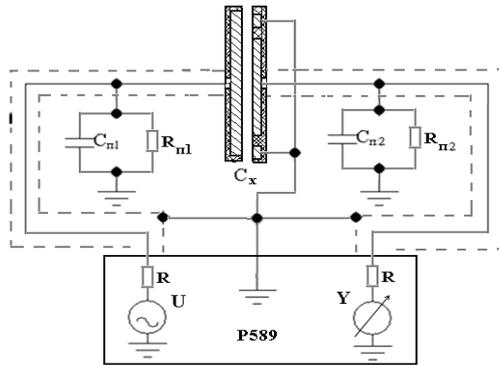


Рис.15 Схема подключения электродов ЕП

Начальный зазор между электродами ЕП составлял 420 мкм , а при номинальной нагрузке 150 Н достигал 680 мкм , что соответствует диапазону изменения электрической емкости от $1,660$ до $1,010 \text{ нФ}$. Для уменьшения влияния вибраций выполнялись многократные измерения (20 измерений для получения одной точки) с последующим усреднением, при этом среднее квадратическое значение не превышало $0,001 \text{ нФ}$.

Приведенная погрешность от нецентрального нагружения определялась по формуле:

$$\gamma = \frac{1 - \frac{C_m}{C_m^*}}{1 - \frac{C_m}{C_0}} \cdot 100\%,$$

где C_0 – значение рабочей емкости при отсутствии нагрузки, C_m – значение рабочей емкости при центральном нагружении номинальной массой, C_m^* – значение рабочей емкости при нецентральном нагружении (паразитном моменте M).

На рис.16а изображена зависимость дополнительной приведенной погрешности при смещении измеряемой массы от центра платформы вдоль оси X . Прямые 1,2,3 соответствуют случаям установки центра подвижного электрода в точки с координатой $y=0 \text{ мм}$ и координатами x соответственно равными $63,53,73 \text{ мм}$. Как видно из поведения прямых 2 и 3, существует возможность установки подвижного электрода в точку, где дополнительные погрешности должны быть равными нулю. Однако вследствие погрешности установки подвижного электрода ЕП на макетном образце ВУ, составляющей $\Delta_x \approx \pm 1 \text{ мм}$, дополнительную погрешность ниже $0,1\%$ (прямая 1) получить не удалось.

На рис.16б изображена зависимость дополнительной приведенной погрешности от ошибки совмещения центра подвижного электрода с осью X .

Прямые 4,5,6 соответствуют случаям установки центра подвижного электрода в точки с координатой $x=63$ мм и координатами y соответственно равными $0, -1, 1$ мм.

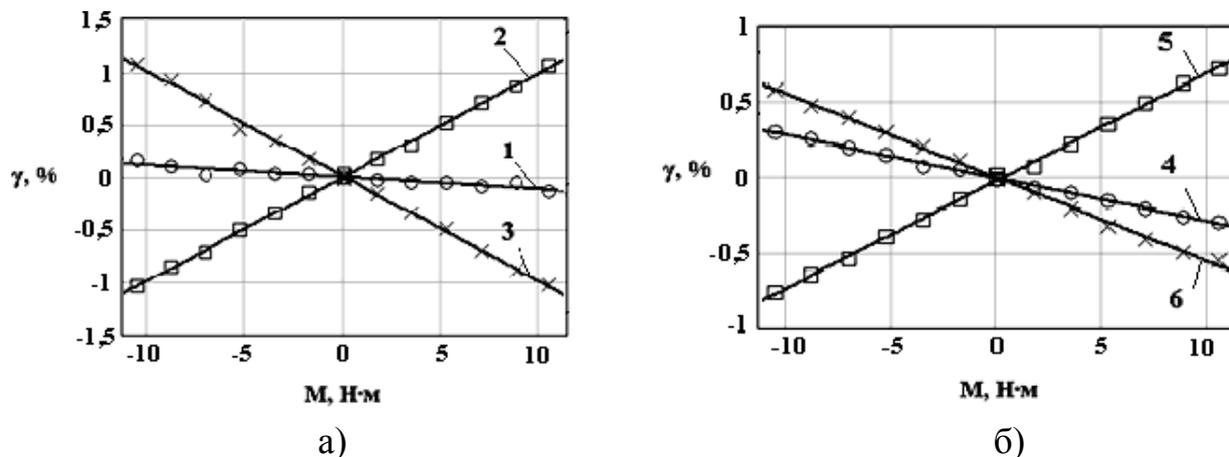


Рис. 16 Дополнительная погрешность датчика силы с ЕП

Результаты изображенные на рис.16б свидетельствуют о том, что для снижения дополнительной погрешности до величины, равной $0,1$ % при смещении измеряемой массы вдоль оси Y , точность установки подвижного электрода следует повысить до $\Delta y \approx \pm 0,1$ мм. Это обусловлено тем, что угол β существенно превышает угол α . Поэтому в ВУ с ЕП, целесообразно использовать рамочные УЭ повышенной поворотной жесткости, предложенные в главе 4. Подобные элементы при той же чувствительности к полезной нагрузке обеспечивают на порядок меньшие углы поворота α и β , а следовательно и меньшие допуски Δx и Δy на установку ЕП.

ВЫВОДЫ

1. Показано, что для снижения погрешности нецентрального нагружения тензорезисторных ВУ необходимо увеличивать относительную длину μ и относительную толщину выемки λ рамочных упругих элементов. Однако и в этом случаи, например при $\mu=70\%$ и $\lambda=95\%$ для достижения значений дополнительной погрешности на уровне $0,1\%$ степень разброса чувствительности тензорезисторных каналов не должна превышать 3% .
2. Предложен и обоснован теоретически и экспериментально метод снижения дополнительной погрешности нецентрального нагружения для ВУ с емкостными измерительными преобразователями, суть которого состоит в совмещении центра подвижного электрода ЕП с осью X УЭ и центром его поворота в плоскости XZ .
3. Для практической реализации метода предложен рамочный УЭ

специальной конструкции, обладающий большей поворотной жесткостью. Использование такой конструкции УЭ может позволить снизить дополнительную погрешность нецентрального нагружения до уровня $0,01-0,1\%$ при точности установки подвижного электрода ЕП по осям X и Y не более $\pm (0,2 - 2)$ мм.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ

1. Сушников, В.А. Моделирование упругой асимметрии весоизмерительной ячейки рамочного типа / В.А. Сушников // Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ». - 2011.-№2. - С.114-118.

2. Сушников, В.А. Оценка вариации чувствительности тензорезисторных каналов датчиков силы / Э.А. Кудряшов, В.А. Сушников // Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ». - 2011.- №3. С.135-141.

3. Сушников, В.А. Метод снижения погрешности нецентрального нагружения в одноточечном весоизмерительном устройстве с емкостным датчиком силы / Э.А. Кудряшов, В.А. Сушников // Журнал «Научно-технические ведомости СПбГПУ». - 2011. - №5. – С. 107-111

4. Сушников, В.А. Перспективы развития цифровой весоизмерительной техники / В.А.Сушников // Материалы Второй международной науч.-практ. конф. «Измерение в современном мире – 2009». – СПб. – 2009. – 367 с.

5. Сушников, В.А. Шумы в тензорезисторных каналах датчиков силы / В.А.Сушников // Материалы V международной науч.-практ. конф. «Наука и современность – 2010». – Новосибирск. – 2010. - ч.2. – 365 с.

6. Сушников, В.А. Оптимальные параметры конструкции упругого элемента типа двойная консольная балка тензорезисторного датчика силы/ Э.А. Кудряшов, В.А. Сушников // Материалы международной науч.-практ. конф. «XXXIX Неделя науки СПбГПУ» . – СПб. – 2010. – ч.8. – 176 с.

7. Сушников, В.А. Оценка влияния колебаний температуры на точность измерений тензорезисторных и емкостных преобразователей/ В.А. Сушников // Материалы VIII международной науч.-практ. конф. «Наука и современность – 2011». – 2011. – Новосибирск. – ч.2. – 254 с.

8. Сушников, В.А. Оценка влияния разброса допусковых размеров упругого элемента на точность измерения тензорезисторных и емкостных датчиков силы/ В.А. Сушников // Материалы Третьей международной науч.-практ. конф. «Измерение в современном мире – 2011». – СПб. – 2009. – 244 с.