

М302153

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское

ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

ФОМИН Виктор Иванович

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ,
ИМЕЮЩИХ ФОРМУ ПЛАСТИН

(01.02.06 - Динамика, прочность, надежность
машин, приборов и аппаратуры)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

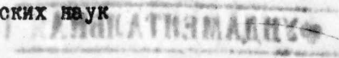
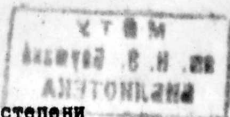
ФОМИН Виктор Иванович

на правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ,
ИМЕЮЩИХ ФОРМУ ПЛАСТИН

(01.02.06 - Динамика, прочность, надежность
машин, приборов и аппаратуры)

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



М302153

НТВ МГУ им. Н.Э.Баумана



1302153

Фомин В.И. Исследования ст

Работа выполнена в Московском высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана.

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Светлицкий В.А.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Усюкин В.И.
кандидат технических наук Ушаков А.И.

Ведущее предприятие: Политехнический институт, г. Каунас.

Защита диссертации состоится " " _____ 1977 г.
на заседании Совета по машиностроению Общетеchnического факультета
МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу:
107005, г. Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., дом 5.

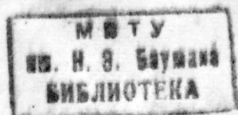
Ваши отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные
печатами, просим направлять по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ
имени Н.Э.Баумана.

Автореферат разослан " " _____ 1977 г.

Ученый секретарь Совета
К.Т.Н.

Попов Н.К.



Общая характеристика работы

Актуальность темы. Широкое применение в прецизионных измерительных приборах, корректирующих и управляющих устройствах находят пьезоэлектрические преобразователи, в которых используется прямой и обратный пьезоэффект. В диссертации рассматриваются упругие элементы линейных пьезоэлектрических акселерометров и пьезоэлектрических приводов и, в более общей постановке, упругие элементы пьезоэлектрических преобразователей, имеющих форму пластины, область применения которых постоянно расширяется. Линейный пьезоэлектрический акселерометр является одним из основных элементов инерциальной системы наведения. Любое движение элементов приборов можно выполнить, используя пьезоэлектрический привод. Пьезоэлектрические устройства приборов являются компактными и надежными. Поэтому разработка методов исследования и проектирования конструкций типа линейный пьезоэлектрический акселерометр и пьезоэлектрический привод принципиально новым механизмом функционирования приборов является необходимой.

Цель работы — разработка методов расчета упругих элементов преобразователей типа пьезоэлектрического линейного акселерометра, а также пьезоэлектрического пластинчатого (электростриктер) и стержневого (пьезосканер) привода.

Метод исследования. Исследование упругих пьезоэлектрических элементов, представляющих системы пластин и стержней, проведено методами прикладной теории упругости и механических колебаний, где используется основная гипотеза классической теории изгиба о недеформируемости нормали.

Научная новизна. К наиболее существенным новым результатам исследования можно отнести: 1) теоретический и экспериментальный анализ напряженного и деформированного состояния упругого элемента акселерометра как системы пластины при цилиндрическом изгибе с учетом геометрической нелинейности; 2) анализ работы электростриктера как одностороннеступенчатой круглой биластины при осесимметричной и асимметричной деформации, что связано с совместным решением плоской задачи теории упругости и задачи изгиба пластины; 3) анализ статических и динамических характеристик акселерометра и пьезосканера как сложных стержневых систем с использованием метода начальных параметров.

Научная достоверность результатов диссертационной работы подтверждена удовлетворительным совпадением данных теоретического и экспериментального исследования моделей конструкций (акселерометр) и реальных объектов (электростриктер и пьезосканер).

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1) разработана методика исследования упругих элементов пьезоэлектрических преобразователей конкретного назначения, которая позволяет проектировать и конструировать названные упругие элементы с широким диапазоном измеряемых величин или необходимой зоной обзора, обеспечивая надежную и эффективную работу приборов;

2) проведенные исследования пьезоэлектрических преобразователей выходят за рамки вышеперечисленных назначений и могут быть использованы для расчета и проектирования широкого класса упругих элементов, имеющих форму пластин.

Апробация. Результаты работы докладывались и обсуждались на научном и методическом семинаре кафедры "Динамика и прочность машин" МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1974 и 1976 гг.

Предлагаемый в диссертации метод исследования упругих элементов пьезоэлектрических преобразователей, имеющих форму пластин и стержней, внедрен при расчетах новых конструкций акселерометров и приводов, что подтверждено соответствующим актом.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано три статьи.

Объем работы. Диссертация состоит из предисловия, введения, трех глав, общих выводов и трех приложений. Изложена на 93 страницах машинописного текста, содержит 56 рисунков, 2 таблицы и список цитированной литературы из 36 наименований.

Предисловие. Сведения по расчету и проектированию пьезоэлектрических преобразователей в таких специфических областях как датчики ускорения и приводы для получения определенных линейных и угловых перемещений элементов конструкций весьма ограничены и представлены в технической отечественной и зарубежной литературе или принципиальными схемами работы устройств, или, в редких случаях, исследованиями статических и динамических характеристик изолированных пьезоэлектрических стержней с использованием приближенных методов.

Объектами исследования настоящей диссертации являются упругие элементы линейных пьезоэлектрических акселерометров и пьезоэлектрических приводов, представляющие системы пьезоэлектрических пластин или стержней, для которых требуется разработка специальных методов исследования напряженного и деформированного состояния названных устройств с учетом специфики пьезоэффекта и условий работы.

Введение. В технической литературе взаимодействие электрического и упругого поля получило особый термин электроупругость. В работах И.А.Вековичевой получены основные уравнения электроупругости и отмечено, что решение задач электроупругости сводится к совместному решению уравнений электростатики и теории упругости. Однако для ряда технических приложений электроупругости уравнения электростатики и теории упругости оказываются формально несвязанными (как и в термоупругости). Поэтому в данной работе при рассмотрении задач, связанных с прямым пьезоэффектом, прежде всего исследуется напряженное состояние элементов конструкций, зная которое легко подсчитать электрические параметры по соотношениям электроупругости, т.е. фактически механика деформируемого тела отделена от электростатики. При решении задач, определяемых обратным пьезоэффектом, пьезоэлектрические составляющие деформации можно учесть в физических уравнениях или же специфика обратного пьезоэффекта может быть отражена в уравнениях равновесия и граничных условиях (как и в термоупругости), так как феноменологически воздействие электрического и температурного поля на конструкцию одинаково.

В трудах отечественных и зарубежных ученых Григолюка Э.Л., Дурье А.И., Вальмира А.С., Феодосьева В.И., Амбарцумяна С.А., Андреевой Л.Е., *Reismann H.*, *Reissner H.* и др. рассмотрен широкий круг практически важных вопросов по исследованию деформаций пластин различной конфигурации в линейной и нелинейной постановке. Однако развитие науки и техники обусловило новые условия работы и назначения пластин, которые являются элементами современных приборов.

В качестве материалов для изготовления пластин пьезоэлектрических преобразователей используются срезы монокристаллов кварца или поликристаллические пьезоэлектрики - пьезокерамика. В работе рассмотрены подробно их упругие и электрические свойства.

Глава I. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК УПРУГОГО ЭЛЕМЕНТА ЛИНЕЙНОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО АКСЕЛЕРОМЕТРА

В первом параграфе отмечены особенности конструкции и работы акселерометра, дана расчетная схема его исследования. Акселерометры предназначены для измерения ускорений движущегося объекта под действием внешних сил. Наиболее широкое распространение получили линейные акселерометры. Линейный акселерометр (устройство для измерения линейных ускорений) является основным элементом современных инерциальных систем навигации, основанных на определении абсолютного ускорения. Чувствительным элементом такого акселерометра является груз. При воздействии на движущийся объект внешних сил вдоль измерительной оси акселерометра груз перемещается. Его перемещение является мерой ускорения, воздействующего на объект. В настоящей работе рассматривается линейный акселерометр, в котором, вследствие прямого пьезоэффекта, перемещение груза трансформируется в электрический сигнал. В качестве упругого чувствительного элемента линейного акселерометра (рис. I) используется рама, состоящая из двух параллельных близко расположенных пластин, представляющих срезы кристалла кварца. Конфигурация пластин в плане представляет прямоугольник, трапецию или кусочно-линейный контур — равнопрочный профиль.

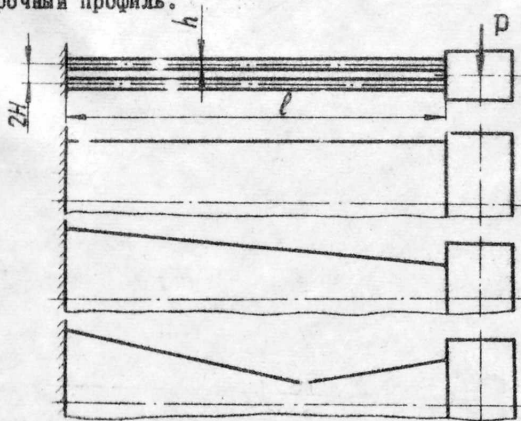


Рис. I

Ниже данная система может именоваться стержневой, поскольку будет рассматриваться цилиндрический изгиб. В стержнях возникают нормальные напряжения от изгиба и растяжения (сжатия). Мощность сигнала пьезоэлектрического эффекта о величине ускорения пропорциональна деформации нейтрального слоя, т.е. величине растягивающего и сжимающего усилия в пластинах элемента. При возрастании поперечной нагрузки и достижения прогибов пластин величин, близких к высоте поперечного сечения, система обнаруживает существенную нелинейность, которую необходимо учитывать при оценке прочности и жесткости упругого элемента. Диапазон измеренных ускорений ограничен потерей несущей способности упругого элемента, что практически проявляется в разрушении конструкции, в потере устойчивости его элементами и возникновении резонансных колебаний. Предметом исследования этой главы является прочность и жесткость упругого элемента в зависимости от его геометрических параметров при действии поперечной статической нагрузки.

Основопологающими исследованиями цилиндрического изгиба пластин в нелинейной постановке являются исследования И.Г.Бубнова. Дальнейшее развитие это направление исследования получило в работах С.П.Тимошенко и Стюарта Уэй, С.А.Амбарцумяна и др. Однако в работах названных исследователей рассмотрены прямоугольные изолированные пластины.

Новым в диссертации является то, что рассматривается система связанных пластин, ширина которых меняется по кусочно-линейному закону. Учитывается анизотропия материала.

Второй параграф посвящен исследованию напряженного и деформированного состояния линейного акселерометра с прямоугольным профилем пластин. Для выяснения существенных закономерностей работы упругого элемента акселерометра прежде всего рассмотрена конструкция с прямоугольными пластинами, хотя этот профиль и не является оптимальным по мощности электрического сигнала. Однако элементы с таким профилем нашли практическое применение из-за прочности и жесткости. Исследование проведено по расчетной схеме продольно-поперечного цилиндрического изгиба с учетом растяжения нейтрального слоя. Пластины упругого элемента представляют срезы кристалла кварца первоначальной ориентации. Анизотропия материала отражена в цилиндрической жесткости пластин. Общее решение дифференциальных уравнений цилиндрических поверх-

ностей верхней и нижней пластин записано в элементарных функциях. Постоянные интегрирования, а также внутренние силовые факторы находятся из уравнений равновесия и условий совместности перемещений с учетом граничных условий, которые образуют систему девяти нелинейных алгебраических уравнений. Система уравнений сведена к одному трансцендентному уравнению, содержащему в качестве неизвестного продольную силу, которое решено численным приближенным методом.

В третьем параграфе анализируются результаты исследования напряженного и деформированного состояния акселерометра с прямоугольным профилем пластин. Критическое значение нагрузки, найденное теоретически по графику зависимости вертикального перемещения свободного конца элемента от поперечной нагрузки и экспериментально, отличаются менее чем на 5%. Эпюры максимальных нормальных напряжений от совместного действия изгиба и растяжения для верхнего стержня и — изгиба и сжатия для нижнего стержня при $P/p_{кр} = 0,8$ показывают существенное (более 30%) отличие результатов расчета по схемам поперечного и продольно-поперечного изгиба.

В четвертом параграфе анализируется влияние расстояния между пластинами акселерометра на его статические характеристики. Именно расстояние между пластинами при фиксированной их длине определяет величину внутренней продольной силы, а следовательно, и мощность пьезоэлектрического сигнала. В работе показано, что продольная сила резко уменьшается с увеличением расстояния между пластинами, а следовательно, электрический сигнал становится более слабым. Поэтому практически используются элементы с малым расстоянием между пластинами $H < 2h$.

В пятом параграфе рассмотрены особенности расчета упругого элемента акселерометра с трапециевидным профилем пластин. Общее решение дифференциальных уравнений упругих цилиндрических поверхностей верхней и нижней пластин записано в функциях Бесселя. В работе отмечено, что обладая более мощным электрическим сигналом упругий элемент с трапециевидным профилем пластин имеет более узкий диапазон измеряемых ускорений, чем прямоугольный.

В шестом параграфе проведено исследование статических характеристик упругого элемента акселерометра с равнопрочным профилем пластин. Условие равнопрочности стержня определено напря-

жениями изгиба и растяжения. В работе показан вид кусочно-линейных (равнопрочных) прсрилей в зависимости от допускаемого напряжения и величины поперечной нагрузки, иллюстрируется влияние расстояния между пластинами упругого элемента на положение точки перегиба.

Исследовано напряженное и деформированное состояние равнопрочного элемента по расчетной схеме продольно-поперечного изгиба с учетом растяжения нейтрального слоя, что дало возможность определить диапазон измеряемых ускорений. Общее решение дифференциальных уравнений упругих цилиндрических поверхностей пластин равнопрочного элемента записано в функциях Бесселя.

В работе дано сравнение максимальных напряжений в пластинах упругого равнопрочного элемента, найденных по расчетным схемам поперечного и продольно-поперечного изгиба. Отмечено, что даже при невысоком уровне поперечной нагрузки ($P/P_{кр} = 0,42$) отличие в максимальных напряжениях составляет более 16%. Сильно уменьшается значение критической поперечной нагрузки для равнопрочного упругого элемента по сравнению с прямоугольным и трапециевидным. Таким образом, при проектировании равнопрочного упругого элемента, обладающего более мощным электрическим сигналом, следует иметь в виду, что при этом диапазон измеряемых ускорений будет более узким.

Седьмой параграф посвящен экспериментальному исследованию напряженного и деформированного состояния упругого элемента акселерометра методом муаровых полос, которое состояло в оценке целесообразности выбора расчетной схемы продольно-поперечного цилиндрического изгиба с учетом растяжения нейтрального слоя. Метод позволил получить наглядную картину деформированного состояния всей поверхности исследуемой пластины, кроме того, используя уравнение равновесия и специфику работы конструкции, определить величины мембранных напряжений.

Модель элемента, являясь геометрически подобной реальному объекту, изготовлялась из листового органического стекла (использовать реальный объект или изготовить модели пластин из кристалла кварца невозможно ввиду ограниченности их размеров).

Из анализа картин муаровых полос, показанных в работе, следует рациональность выбранной расчетной схемы цилиндрического изгиба: количество муаровых полос в поперечном направлении существенно меньше, чем в продольном, т.е. изменение углов φ ,

и φ_y в поперечном направлении незначительно. Полученное расхождение теоретического и экспериментального значения мембранных напряжений лежит в пределах 15%, что частично отражает несовершенство графического дифференцирования.

Глава II. ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАСТИНЧАТОГО ПЬЕЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПРИВОДА (ЭЛЕКТРОСТРИКТЕРА)

В параграфе первом отмечена особенность конструкции и работы электростриктера, т.е. пластинчатого пьезоэлектрического привода, предназначенного для обеспечения угловых и линейных перемещений зеркала (рис. 2). Электростриктер состоит из двух дисков. Несущий диск 1, представляющий единое целое с жестким центром (зеркалом) 3, изготавливается из кварцевого стекла. Пьезокерамический диск 2 наклеивается на кварцевый диск. Диаметр пьезокерамического диска меньше диаметра несущего стеклянного диска, что обеспечивает работу системы.

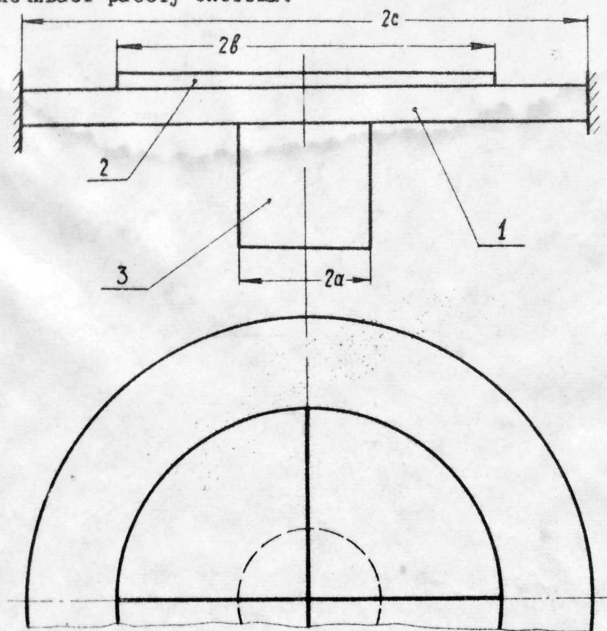


Рис. 2

При воздействии электрического поля на весь пьезокерамический диск или на его отдельные секторы происходит их стесненное расширение, т.е. феноменологически процесс одинаков с равномерным нагревом всего пьезокерамического диска или его отдельных секторов, что приводит к возникновению соответственно осесимметричной и асимметричной деформации конструкции. Главной характеристикой данной системы является осевые и угловые перемещения жесткого центра (зеркала). Теоретически для получения максимальных перемещений толщины дисков должны быть минимальными, однако условия прочности (связанные с действием внешней нагрузки - большого равномерного давления на пластину) и технологии изготовления ограничивают минимальную толщину. Механические напряжения в конструкции, связанные с характером работы системы, невелики.

Основной задачей исследования является анализ влияния геометрических размеров конструкции на характеристики электростриктера, к которым относятся угловые и линейные перемещения зеркала. Важно также, чтобы радиальные перемещения зеркала были минимальными.

Во втором параграфе дается обоснование выбора расчетной схемы и метода исследования конструкции типа электростриктер. Поскольку действие электрического и температурного поля феноменологически одинаково, поэтому для исследования напряженного и деформированного состояния электростриктера использован метод фиктивных нагрузок, применяемый в термоупругости. Согласно этому методу перемещения, возникающие в конструкции от изменения температуры или в данном случае напряженности электрического поля, будут точно такими, как перемещения при действии объемных сил (R, T - радиальные и тангенциальные составляющие):

$$R = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot \frac{\partial U}{\partial r}, \quad T = \frac{\alpha \cdot E}{1 - \mu} \cdot \frac{\partial U}{r \partial \varphi},$$

и нормальных растяжений

$$p_r = \frac{\alpha \cdot E U}{1 - \mu},$$

действующих соответственно в области и по границе области влияния электрического поля (для плоского напряженного состояния и полярной системы координат) $U(r, \varphi)$ - напряженность электрического поля, α - пьезоэлектрический модуль. Действительные механи-

ческие напряжения определяются суммой напряжений от фиктивных нагрузок R , T и постоянного гидростатического давления P_0 .

Расчетную схему конструкции типа электростриктер можно назвать одностороннеступенчатая круглая бипластина, т.е. пластина, у которой срединные или исходные плоскости смещены параллельно на различных участках. В диссертации проведен анализ напряженного и деформированного состояния одностороннеступенчатой круглой бипластины при осесимметричном и асимметричном нагружении в плоскости, параллельной исходной плоскости пластины. Предполагается, что коэффициенты Пуассона для слоев бипластины одинаковы, а модули упругости различны.

В третьем параграфе рассмотрена осесимметричная деформация электростриктера, соответствующая поступательному перемещению зеркала. Процесс описан линейными дифференциальными уравнениями, общее решение которых дано в элементарных функциях. Постоянные интегрирования определены из граничных условий, которые в соответствии с двумя участками пластины образуют систему восьми линейных алгебраических уравнений.

Проведена оценка целесообразности выбора расчетной схемы: круглая одностороннеступенчатая пластина, где проанализировано влияние точного решения плоской задачи теории упругости при определении перемещений зеркала.

В работе представлен в виде графиков анализ влияния основных геометрических размеров электростриктера при шарнирно спертом и заделанном наружном контуре кварцевой пластины на перемещения зеркала, что может быть использовано в практике проектирования аналогичных конструкций.

В четвертом параграфе исследована асимметричная деформация электростриктера, что соответствует повороту зеркала. Фиктивная нагрузка (P_0), действующая на пластину, приведена к исходной поверхности и представлена в виде рядов Фурье. Расчет конструкции типа электростриктер при асимметричной деформации сведен к совместному, за счет односторонней ступенчатости, решению плоской задачи теории упругости и задачи изгиба пластины. Для анализа расчетной схемы одностороннеступенчатая пластина при асимметричном нагружении использованы уравнения Ламе плоской задачи теории упругости и бигармоническое уравнение изгиба пластин, решение которых соответственно двум участкам дано в виде

$$U = \sum_{k=1,3,5} A_k(z) \cos k\varphi, \quad V = \sum_{k=1,3,5} D_k(z) \sin k\varphi, \quad W = \sum_{k=1,3,5} F_k(z) \cos k\varphi, \quad a < z < b, \quad 0 < \varphi < 2\pi;$$

$$U = \sum_{k=1,3,5} C_k(z) \cos k\varphi, \quad V = \sum_{k=1,3,5} B_k(z) \sin k\varphi, \quad W = \sum_{k=1,3,5} f_k(z) \cos k\varphi, \quad b < z < c, \quad 0 < \varphi < 2\pi.$$

Постоянные интегрирования найдены из граничных условий, условий равновесия и совместности перемещений, которые образуют систему шестнадцати линейных алгебраических уравнений для каждой гармоники. Основные результаты исследования асимметричного деформирования электростриктера, необходимые для проектирования реальных конструкций, представлены в диссертации в виде графиков, где показана зависимость углов поворота и радиального смещения зеркала от основных геометрических параметров стеклянного и пьезокерамических дисков.

Глава III. ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПЬЕЗОСКАНЕРА И АКСЕЛЕРОМЕТРА

В третьей главе рассмотрена работа пьезосканера — элемента следящей или сканирующей системы в оптической линии связи. В более общей постановке это — исследование работы стержневого пьезокерамического привода, обеспечивающего вращательное и поступательное движение элементов приборов.

В первом параграфе описаны особенности конструкции и работы пьезосканера. Конструкция пьезосканера (рис. 3) состоит из четырех приводов I, которые крепятся с одной стороны к зажимным узлам, а с другой — при помощи пружин 2 к зеркалу. Приводы представляют две склеенные металлизированные пластины из пьезокерамического материала. При подаче электрического напряжения на электроды одна из пластин стремится расшириться, а другая — сжаться, будучи разноименными полосами, что приводит к изгибу привода. Воздействие электрического напряжения на приводы, которые расположены попарно перпендикулярно или параллельно, приводит к повороту зеркала в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Изменяя величину электрического напряжения, можно получить требуемый угол поворота зеркала в любой вертикальной плоскости. Эффект подаваемого электрического напряжения эквивалентен действию изгибающего момента M (рис. 3), величина которого зависит

от напряженности электрического поля и геометрических параметров привода.

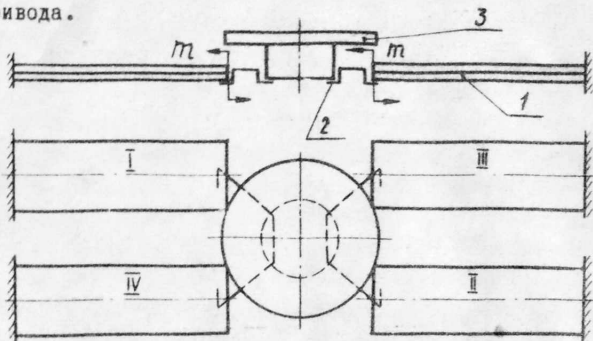


Рис. 3

Основной характеристикой конструкции является максимальный угол поворота зеркала. В процессе работы зеркало образует круговую развертку определенной частоты. Снижая жесткость конструкции, мы сможем увеличить угол поворота зеркала, однако это приведет к снижению собственных частот колебаний и возникновению резонанса, что недопустимо. Таким образом, задача сводится к выбору геометрических размеров элементов конструкции с целью получения необходимого соотношения между максимальными углами поворота зеркала и собственными частотами колебаний. Исследованы два варианта конструкции с перпендикулярным и параллельным расположением приводов. Обе разновидности конструкции имеют свои преимущества; первая обеспечивает больший обзор пространства, а вторая имеет меньшие габаритные размеры, что практически важно.

Во втором параграфе дано обоснование выбора расчетной схемы, метода исследования и построен алгоритм расчета конструкции типа пьезосканер. Конструкция пьезосканера рассмотрена как пространственная рама (стержневая система). При решении использован метод начальных параметров.

В расчете учитывались изгиб в двух плоскостях, кручение, осевая сила и осевое перемещение, инерционность приводов при крутильных и изгибных колебаниях, инерционность жесткого центра. Пружина рассматривалась как безынерционный упругий элемент. Поэтому в связи с характером предлагаемого решения задачи амплитудные значения внутренних сил и перемещений характеризуются двенадцатимерным вектором:

$$\Gamma = [u_x, \varphi_x, M_x, Q_x, \varphi_z, M_z, u_z, \varphi_y, M_y, Q_y, u_z, N].$$

В связи с особенностями конструкции намечается четыре участка. Соответственно им сконструированы матрицы перехода. В соответствии с характером действия возмущающей нагрузки и особенностей конструкции постоянные находятся из следующих граничных условий:

$$X_I = [0, \varphi_x, 0, Q_y, 0, M_z, 0, 0, M_y, Q_x, \psi_z, 0];$$

$$X_{II} = [0, 0, M_x, Q_y, \varphi_z, 0, \psi_x, 0, M_y, 0, 0, N];$$

$$X_{III} = [\psi_y, 0, M_x, 0, 0, M_z, 0, 0, M_y, Q_x, 0, N].$$

Каждому из граничных условий соответствует система линейных алгебраических уравнений со своими коэффициентами. Частотные уравнения получаются из условия наличия ненулевых решений однородных систем.

В диссертации представлены основные результаты исследования конструкции типа пьезосканер (стержневой пьезоэлектрический привод), необходимые для проектирования аналогичных систем. Графики связывают собственные частоты колебаний конструкции, линейные и угловые смещения зеркала с основными геометрическими размерами элементов устройства при параллельном и перпендикулярном расположении приводов.

В параграфе третьем исследованы поперечные колебания и продольная устойчивость упругого элемента пьезоэлектрического линейного акселерометра. Несущая способность упругого элемента акселерометра может быть утрачена при воздействии на него вибрирующего объекта или некоторых его частей. Это вызывает необходимость проектировать упругий элемент акселерометра с определенной нижней границей спектра собственных частот поперечных колебаний.

Для исследования использован метод начальных параметров. Упругий элемент рассматривается как статически неопределимая система. Основная особенность рассматриваемой конструкции заключается в том, что при колебаниях на стержни действуют дополнительные продольные силы N , которые существенно меняют частотные характеристики системы. В диссертации показано, что при определении собственных частот колебаний системы для малых расстояний между стержнями (рис. I) $H < 3h$ влияние растяжения нейтрального соя весьма велико, поэтому его учет становится необ-

Общие выводы по работе

1. Впервые разработана методика теоретического и экспериментального анализа механических (статических и динамических) характеристик стержневого пьезоэлектрического акселерометра, определяющих диапазон измеряемых ускорений.

2. Экспериментальное исследование упругих элементов акселерометра методом муаровых полос подтвердило целесообразность выбранных расчетных схем и достоверность полученных теоретических результатов. Новым в экспериментальном исследовании является разработка методики определения мембранных напряжений при цилиндрическом изгибе.

3. Исследована продольная устойчивость упругого элемента акселерометра. Разработан алгоритм численного определения продольной критической нагрузки и собственных частот поперечных колебаний элемента.

4. Впервые разработана методика теоретического анализа механических характеристик пластинчатого пьезоэлектрического привода (электростриктера).

5. Впервые разработана методика расчета механических (статических и динамических) характеристик стержневого пьезоэлектрического привода (пьезосканера), определяющих информационные параметры системы.

6. Проведена оптимизация конструкций пьезоэлектрических приводов по геометрическим параметрам.

Основное содержание диссертации опубликовано в работах:

1. Фомин В.И. Деформации рамы, составленной из двух параллельных стержней. Известия вузов "Машиностроение", № 2, 1974, с. 9-13.

2. Светлицкий В.А., Фомин В.И. Определение собственных частот колебаний рамы с учетом растяжения нейтрального слоя стержней. Известия вузов "Машиностроение", 1974, № 4, с. 21-24.

3. Ушаков Б.Н., Фомин В.И. Метод муаровых полос при исследовании напряженно-деформированного состояния пластинчатых упругих элементов. Труды Всесоюзного семинара "Геометрические методы исследования деформаций и напряжений", т. I, Челябинск, 1975, с. 45-48.