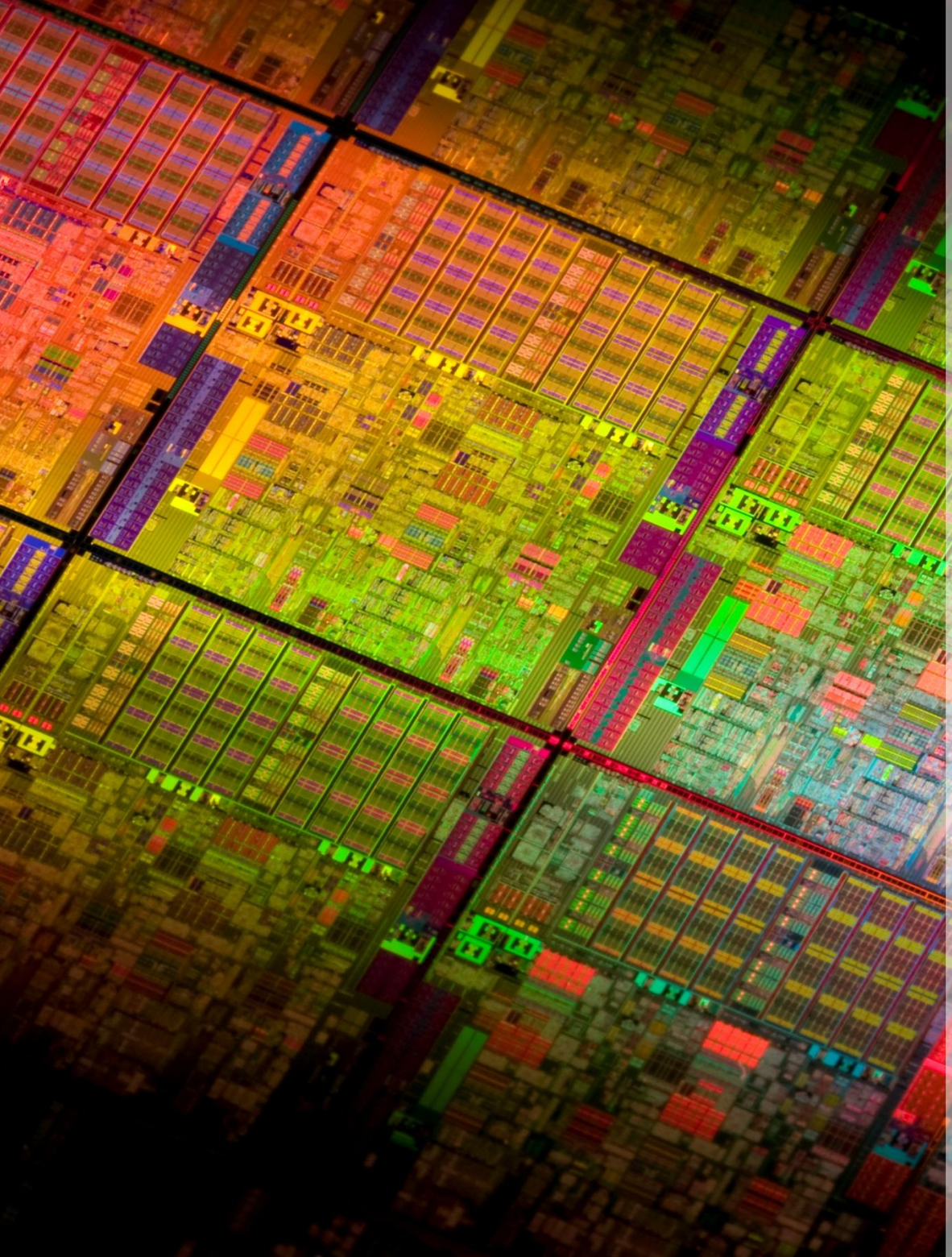
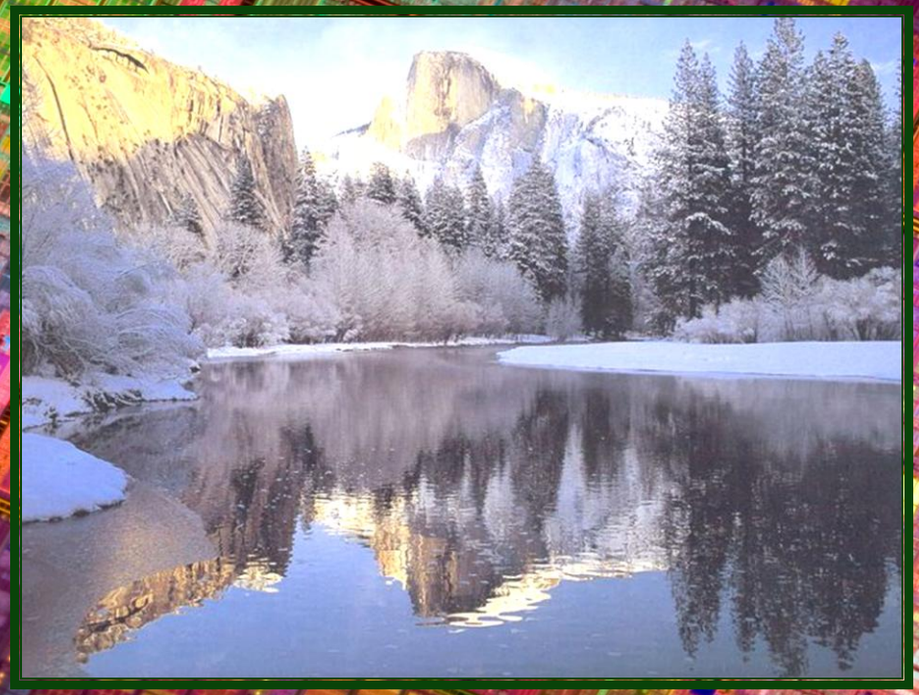


ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИИ ТОМ 2

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ в МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИИ

Том 2

В.А. Васин Е.Н. Ивашов
П.С.Кузнецов В.В. Слепцов



Сведения об авторах учебного пособия

ВАСИН Владимир Анатольевич, к.т.н., доцент.
Доцент кафедры «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» «МАТИ» – Российского государственного технологического университета имени К.Э. Циолковского

ИВАШОВ Евгений Николаевич, д.т.н., профессор.
Профессор кафедры «Электроника и наноэлектроника» МИЭМ НИУ ВШЭ

КУЗНЕЦОВ Павел Сергеевич, к.т.н.
Начальник сектора ОАО «ГосНИИП»

СЛЕПЦОВ Владимир Владимирович, д.т.н., профессор.
Зав. кафедрой «Радиоэлектроника, телекоммуникации и нанотехнологии» «МАТИ» – Российского государственного технологического университета имени К.Э. Циолковского

ISBN 978-5-905872-20-4

9 785905 872204

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИИ

Учебное пособие

Том 2

В.А. Васин Е.Н. Ивашов
П.С. Кузнецов В.В. Слепцов

НИИПТ

Издательство НИИ предельных технологий
2014

УДК 621.01/.03 + 621.315 + 621.37/.39
ББК 34.44
И 1

Рецензенты: **Глазунов В.А.,** доктор технических наук и доктор философских наук, профессор, заведующий лабораторией ФГБУН Институт машиноведения имени А.А. Благонравова РАН,

Шалумов А.С., доктор технических наук, профессор, генеральный директор ООО «CALS-технологии»

И 1 Информационные технологии проектирования в микро- и наноинженерии: Учебное пособие. В 3-х томах. Том 2. **В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, В.В. Слепцов.** – Ивантеевка М.о.: Издательство НИИ предельных технологий, 2014. – 223 с.

ISBN 978-5-905872-20-4

Рассмотрены некоторые вопросы информационных технологий проектирования в микро- и наноинженерии, в частности, моделирование упругих чувствительных элементов туннельных преобразователей, высоковакуумная коммутационная аппаратура, прецизионные устройства перемещения на основе пьезоэффекта, особенности создания элементов автоматизированной системы проектирования пьезосканеров и система поддержки принятия решений при проектировании объектов лазерной обработки.

Учебное пособие рекомендовано студентам бакалавриата и магистратуры, обучающимся по направлениям 210100 – «Электроника и наноэлектроника», 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи», 211000 – «Конструирование и технология электронных средств».

ISBN 978-5-905872-20-4 УДК 621.01/.03 + 621.315 + 621.37/.39

© В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, П.С. Кузнецов, В.В. Слепцов, 2014
© Издательство НИИ предельных технологий, 2014
© МИЭМ НИУ ВШЭ, 2014

ИНФОРМАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ В МИКРО- И НАНОИНЖЕНЕРИИ:

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Том 2

ВАСИН Владимир Анатольевич
ИВАШОВ Евгений Николаевич
КУЗНЕЦОВ Павел Сергеевич
СЛЕПЦОВ Владимир Владимирович

Редактор **И. С. Кравчук**
Технический редактор **П. С. Костомаров**
Рисунок на обложке выполнен художником **Н.Г. Фатьяновой**

Подписано в печать 25.02.2014. Формат 60x84/16.
Бумага типографская. Печать – ризография.
Усл. печ. л. 11,8. Уч.-изд. л. 12,4. Тираж 300 экз.
Заказ 4 Изд. № 5

Издательство НИИ предельных технологий
141282 Мос. обл., г. Ивантеевка, ул. Ленина, 44.
Отпечатано в НИИ предельных технологий
141282 Мос. обл., г. Ивантеевка, ул. Ленина, 44.

ВВЕДЕНИЕ

За несколько десятков лет развития микроэлектромеханики было создано огромное количество разнообразных приборов, при этом основными их видами являются интегральные датчики и исполнительные механизмы (приводы). В последние десятилетия в данной области техники произошел значительный качественный скачок, связанный с появлением широкого спектра так называемых микроэлектромеханических систем (МЭМС) – полупроводниковых приборов, совмещающих на одном чипе электронную и механическую части, изготавливаемые в едином технологическом процессе. Современная измерительная МЭМС содержит на одном кристалле, как правило, несколько механических (чувствительных) элементов вместе со сложными электронными схемами управления, преобразования и обработки сигнала, выдающими на выходе информацию об измеряемой величине в цифровой форме.

В качестве перспективного направления развития таких устройств необходимо отметить так называемые НЭМС (НЭМС – «наноэлектромеханические системы»), о которых в настоящее время все чаще встречаются упоминания в литературе. Под НЭМС понимаются микросистемы, содержащие в себе элементы, либо сами по себе имеющие нанометровый размер, либо разнесенные друг от друга на расстояния того же порядка. Функционирование НЭМС основано на физических эффектах, наблюдаемых на этих расстояниях, таких, например, как действие атомных сил или туннелирование электронов. По этой причине туннельные интегральные преобразователи также относятся к классу НЭМС.

Следует отметить, что линейки оборудования, имеющиеся в распоряжении отечественных преприятий радиоэлектронной промышленности, в которых нормы топологии создаваемых приборов составляют 1,5÷0,8 мкм, соответствуют уровню 20÷30-ти летней давности. Снятие этих линеек с эксплуатации и их замена более совершенным оборудованием – вопрос ближайшего

будущего. Однако, выводимое из эксплуатации оборудование может быть успешно использовано при производстве микро- и наносистем, что открывает дополнительную возможность наиболее рационального его использования.

Одной из главных тенденций развития мировой радиоэлектронной, космической, медицинской и других отраслей наукоёмкой промышленности начала XXI века является широкое использование высоких технологий, требующих создания и поддержания в течении процесса обработки изделий высокого и сверхвысокого вакуума или сред со специальными свойствами. Важную роль в поддержании достигнутого вакуума играет коммутационная вакуумная запорно-регулирующая аппаратура.

К настоящему времени принцип управляемой упругой деформации теоретически достаточно проработан, хорошо зарекомендовал себя при создании ряда устройств внутрикамерной вакуумной механики, в том числе, манипуляторов, транспортных систем, мониторов для измерения параметров ионных пучков, устройств для экранирования тепловых и молекулярных потоков, координатных столов, коллиматоров и др.

Понимание возможности применения принципа управляемой упругой деформации для создания высоковакуумной запорной аппаратуры стимулировало работы в этом направлении.

При этом проблема обеспечения герметичности при малых перепадах давления и быстродействия вакуумной коммутационной аппаратуры для конкретных условий эксплуатации явились основой данной работы.

В связи с этим появилась потребность постановки ряда новых, не рассмотренных ранее исследований с использованием математического моделирования и проведения серии натурных и машинных экспериментов.

Микроминиатюризация изделий и повышение их качества во многих областях науки и техники поставили задачу обеспечения сверхточного позиционирования функциональных механизмов при выполнении установочных перемещений, в том числе по нескольким координатам одновременно. Сверхмалая, с точки зрения механики, длительность процессов в автомати-

зированном технологическом и аналитическом оборудовании (от 100 мс до 0,1 мс и менее) предъявляет жёсткие требования к динамическим параметрам модулей линейных перемещений. Во многих случаях, эти модули должны работать в вакуумной среде, которая создает проблемы даже для обычных диапазонов позиционирования.

В нанотехнологии перемещение и позиционирование связано с малыми размерами. В современном технологическом и аналитическом оборудовании используются различные типы устройств прецизионных перемещений, в частности, устройств на пьезопреобразователях, пьезосканеры, отличительной особенностью которых является их безынерционность. Принцип их действия основан на преобразовании электрической энергии в механическую.

Для пьезосканеров характерны: микроперемещения с погрешностью не более ± 0,1 нм; высокая чувствительность и плавность перемещений, высокое быстродействие (постоянная времени срабатывания пьезосканера составляет не более 0,2 мс); возможность реверсивных перемещений. При работе пьезосканера не происходит его нагрева и влияния температурных деформаций на точность перемещения.

Широкое внедрение пьезосканеров сдерживается сложностью их проектирования и отсутствием способов оценки конструкций на отдельных стадиях проектирования.

Важным моментом применения пьезосканеров в нанотехнологическом оборудовании является линейная зависимость их перемещений от приложенного напряжения, то есть простота управления процессом перемещения.

Автоматизированная система проектирования пьезосканеров может играть роль мощного средства для создания пьезосканеров, эффективное применение которых невозможно без разработки комплекса методических указаний и инструкций, используемых на каждом этапе и регламентирующих последовательность их выполнения.

Перспективным направлением в проектировании сканеров для зондовых микроскопов является использование эффекта магнитострикции.

Создание автоматизированной системы проектирования сканеров для зондовых микроскопов невозможно без создания информационной системы поддержки принятия решений для каждого этапа проекта.

Необходимость автоматизации ранних этапов проектирования технических объектов связана с тем, что выявление отказов основных узлов технической системы на завершающих этапах (начиная с технического проектирования) путем испытаний опытного образца, приводит к длительным операциям по отработке конструкции, а значит и к резкому возрастанию материальных затрат и увеличению сроков процесса проектирования.

Одним из наиболее мощных средств для исследования и проектирования технических систем является моделирование. Использование моделирования, начиная с ранних стадий, и постепенное накопление информации за счёт уточнения и детализации модели позволяет говорить о расширяемой адаптивной модели всего цикла проектирования. Соответственно, при анализе различных свойств объекта проектирования модельное представление должно формироваться наиболее подходящим для этой цели образом, независимо от конкретного процесса или этапа проектирования, и сохранять все требуемые свойства разрабатываемого объекта.

Для реализации процесса проектирования, в первую очередь, необходимо осуществить сбор, требуемой для расчетов информации, провести её обработку, включающую многоаспектный анализ и оптимизацию параметров узлов объекта проектирования. Полученные результаты расчёта должны быть сохранены в базе данных с целью формирования отчётной документации. Проектирование рационально строить на основе методов и программно-технических средств с целью снижения затрат, времени и использования информационного ресурса.

Для развития субмикронных технологий и нанотехнологий, в отличие от традиционных технологий, характерен «индивидуальный» подход, при котором внешнее «управление» достигает отдельных атомов и молекул, что позволяет создавать из них как «бездефектные» материалы с принци-

пиально новыми физико-химическими свойствами, так и новые классы устройств с характерными нанометровыми размерами.

Одним из направлений решения этой проблемы является создание и развитие автоматизированных систем проектирования различных технологических процессов, в том числе процессов формирования объектов лазерной обработки.

Фокусируя короткий лазерный импульс с определенными параметрами на заданном типе материала, возможно смещение атомов с их начальных позиций. Это позволяет принимать конструктивные решения в нанометровых масштабах.

Учебное пособие рекомендовано студентам бакалавриата и магистратуры, обучающимся по направлениям 210100 – «Электроника и наноэлектроника», 210700 – «Инфокоммуникационные технологии и системы связи».

ГЛАВА 7. МОДЕЛИРОВАНИЕ УПРУГИХ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ТУННЕЛЬНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ

7.1. Конечноэлементный расчет напряженно-деформированного состояния многослойных упругих чувствительных элементов туннельных преобразователей

Настоящий раздел посвящен численному расчету напряженно-деформированного состояния упругих чувствительных элементов (УЧЭ) монолитного туннельного преобразователя. В основу предлагаемой методики положен метод конечных элементов (МКЭ) [1]. Необходимость выбора данного метода обусловлена тем, что элементы современных интегральных микроэлектромеханических устройств (в частности, УЧЭ туннельного преобразователя) представляют собой многослойные конструкции сложной геометрии, не поддающиеся аналитическому расчету. Для моделирования напряженно-деформированного состояния подвижных компонентов МЭМС предлагается использовать конечноэлементный метод расчета многослойных пластин.

Методика расчета динамического напряженно-деформированного состояния многослойных пластин

Задача об изгибе и колебаниях многослойных пластин сложной геометрии решалась при помощи метода конечных элементов [1,5,42]. Сущность этого метода состоит в разбиении сплошного тела на отдельные элементы, взаимодействующие между собой лишь в узловых точках, в которых вводятся фиктивные силы, эквивалентные поверхностным напряжениям, распределенным по границам элементов.

Конечноэлементное уравнение движения выглядит следующим образом:

$$[K]\{\delta\}+[C]\frac{\partial}{\partial t}\{\delta\}+[M]\frac{\partial^2}{\partial t^2}\{\delta\}+\{F\}=0, \qquad (7.1.1)$$

где [K] и {F} – матрицы жесткости и сил ансамбля, а {δ} – узловые степени свободы.

Матрицы [C] и [M] составляются из матриц отдельных элементов, задаваемых в виде:

$$[c_{ij}]^e=\int_{V^e}[N_i]^T\mu[N_j]dV,$$
$$[m_{ij}]^e=\int_{V^e}[N_i]^T\rho[N_j]dV. \qquad (7.1.2)$$

Матрица $[m_{ij}]^e$ известна как матрица масс элемента, а матрица ансамбля $[M]$ – как матрица масс системы. Матрица $[C]$ описывает вязкое демпфирование, $[N]$ – функции формы элемента, e – номер элемента. Для двумерных задач интегрирование производится по площади e-го элемента.

Если рассматривается динамическая задача без демпфирования ($[C]=0$), то собственные частоты колебаний пластины определятся из условия:

$$\det\left|[K]-(2\pi f_n)^2[M]\right|=0, \qquad (7.1.3)$$

где f_n – n-я собственная частота.

Глобальная матрица жесткости системы $[K]$ определяется по формуле

$$[K_{ij}]=\int[B_i][D][B_j]dV, \qquad (7.1.4)$$

где интегрирование ведется по всей области.

Матрица $[B]$ связывает обобщенные деформации по всей пластине $\{\varepsilon\}$ со степенями свободы в узлах $\{\delta\}$:

$$\{\varepsilon\}=[B]\{\delta\}, \qquad (7.1.5)$$

а матрица $[D]$ – обобщенные напряжения $\{\sigma\}$с обобщенными деформациями:

$$\{\sigma\}=[D]\{\varepsilon\}. \qquad (7.1.6)$$

Рассмотрим задачу об изгибе многослойной пластины (рис.7.1.1). Пластина состоит из n слоев трансверсально-изотропного материала постоянной для слоя, но различной для слоев толщины h_k ($k = 1, 2, \ldots, n$).

Плоскости изотропии параллельны наружным поверхностям. Слои несжимаемы и закон Гука для каждого из них имеет вид:

$$\sigma_x^k = \frac{E_k}{1-\mu_k^2}(\varepsilon_x^k + \mu_k \varepsilon_y^k); \sigma_y^k = \frac{E_k}{1-\mu_k^2}(\varepsilon_y^k + \mu_k \varepsilon_x^k);$$
$$\tau_{xy}^k = \frac{E_k}{2(1+\mu_k)}\varepsilon_{xy}^k; \tau_{xz}^k = G_k \gamma_{xz}^k; \tau_{yz}^k = G_k \gamma_{yz}^k, \qquad (7.1.7)$$

где $E_k = E_k(z)$, $\mu_k = \mu_k(z)$ – модуль продольной упругости и коэффициент Пуассона в плоскости изотропии; $G_k = G_k(z)$ – модуль поперечного сдвига.

Примем следующие гипотезы:

1) внешняя нагрузка $p = p(x, y)$ направлена по нормали z к плоскости пластины xOy;
2) слои работают совместно – без отрыва и проскальзывания;
3) материал каждого слоя подчиняется закону Гука в вышеприведенной форме, т.е. $\sigma_z^k = 0$;
4) нормальные перемещения постоянны по толщине пакета слоев: $w_k(x, y, z) = w(x, y)$;
5) тангенциальные перемещения координатной поверхности $z = 0$ пренебрежимо малы: $u(x, y) = 0$; $v(x,y) = 0$;
6) приняты во внимание деформации поперечного сдвига:

$$\gamma_{xz}^k = \frac{\partial \chi}{\partial x}\frac{d\psi_k(z)}{dz}; \gamma_{yz}^k = \frac{\partial \chi}{\partial y}\frac{d\psi_k(z)}{dz}, \qquad (7.1.8)$$

где $\chi = \chi(x, y)$ – искомая функция сдвига, а

$$\psi_k(z) = \int_0^z \frac{1}{G_k}\left(\int_{-\delta_1}^z E_k z dz\right) dz.$$

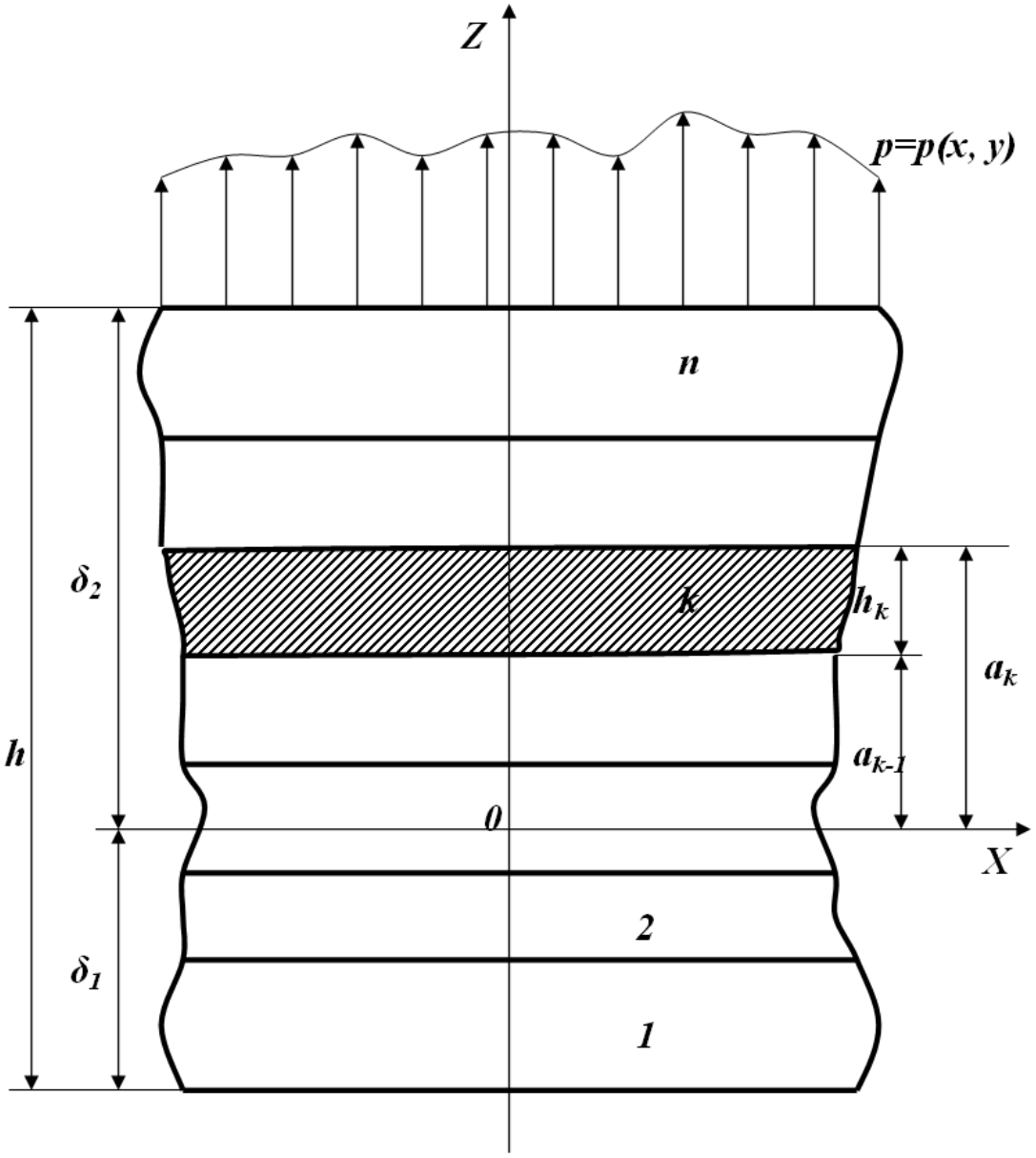


Рис. 7.1.1. Структура многослойной пластины

δ_1 – расстояние, определяющее положение координатной поверхности z = 0, для которого справедлива формула:

$$\delta_1 = \left(\sum_{k=1}^{n} \int_{c_{k-1}}^{c_k} E_k z_k dz_k \right) : \left(\sum_{k=1}^{n} \int_{c_{k-1}}^{c_k} E_k dz_k \right). \qquad (7.1.9)$$

Здесь $z = z_k - \delta_1$, z_k отсчитывается от нижней поверхности пластины, c_k – расстояние от нижней поверхности пластины до верхней поверхности k-го слоя.

При расчете многослойных пластин методом конечных элементов в

каждом узле вводятся 6 степеней свободы – 3 изгибных и 3 сдвиговых:

$$\{\delta_n\} = \begin{Bmatrix} w_n \\ \varphi_{x_n} \\ \varphi_{y_n} \end{Bmatrix}, \{\overline{\delta_n}\} = \begin{Bmatrix} \overline{w_n} \\ \overline{\varphi_{x_n}} \\ \overline{\varphi_{y_n}} \end{Bmatrix}, \tag{7.1.10}$$

где φ_x и φ_y - соответственно производные прогиба w по x и y – углы поворота нормали, а n – номер узла. Сдвиговый прогиб равен $\overline{w} = c_1\chi$, где χ – искомая функция сдвига. Здесь

$$\begin{aligned} & c_1 = D_{12}/D_{11}; c_2 = D_{22}/D_{12}; \mu_{rs} = \overline{D_{rs}}/D_{rs}; \\ & D_{rs} = \sum_{k=1}^{n} \int_{a_{k-1}}^{a_k} \frac{E_k}{1-\mu_k^2} F_{rk} F_{sk} dz; \\ & \overline{D_{rs}} = \sum_{k=1}^{n} \int_{a_{k-1}}^{a_k} \frac{E_k \mu_k}{1-\mu_k^2} F_{rk} F_{sk} dz; \\ & r, s = 1,2; F_{1k} = z; F_{2k} = -\psi_k(z). \end{aligned} \tag{7.1.11}$$

Векторы обобщенных деформаций и напряжений запишем в виде:

$$\{\varepsilon\} = \begin{Bmatrix} \kappa_x \\ \kappa_y \\ \kappa_{xy} \\ \overline{\kappa_x} \\ \overline{\kappa_y} \\ \overline{\kappa_{xy}} \\ \overline{\varphi_x} \\ \overline{\varphi_y} \end{Bmatrix}; \{\sigma\} = \begin{Bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ \overline{M_x} \\ \overline{M_y} \\ \overline{M_{xy}} \\ \overline{Q_x} \\ \overline{Q_y} \end{Bmatrix}, \tag{7.1.12}$$

где

$$\kappa_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \kappa_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \kappa_{xy} = -\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \tag{7.1.13}$$

– кривизны изгиба в направлениях x, y и смешанная кривизна соответственно;

$$\overline{\kappa_x} = -\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial x^2}; \overline{\kappa_y} = -\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial y^2}; \overline{\kappa_{xy}} = -\frac{\partial^2 \overline{w}}{\partial x \partial y} \qquad (7.1.14)$$

– кривизны сдвига – аналоги кривизны изгиба;

$$\overline{\varphi_x} = \frac{\partial \overline{w}}{\partial x}; \overline{\varphi_y} = \frac{\partial \overline{w}}{\partial y} \qquad (7.1.15)$$

– сдвиговые углы поворота – аналоги углов поворота нормали;

$$M_x = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_x^k z dz; M_y = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_y^k z dz; M_{xy} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{xy}^k z dz \qquad (7.1.16)$$

– изгибающие и крутящий моменты;

$$\overline{M_x} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_x^k \psi_k(z) dz; \overline{M_y} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \sigma_y^k \psi_k(z) dz; \overline{M_{xy}} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{xy}^k \psi_k(z) dz \qquad (7.1.17)$$

– обобщенные моменты высшего порядка – сдвиговые;

$$\overline{Q_x} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{xz}^k \frac{d\psi_k(z)}{dz} dz; \overline{Q_y} = \int_{-\delta_1}^{\delta_2} \tau_{yz}^k \frac{d\psi_k(z)}{dz} dz \qquad (7.1.18)$$

– обобщенные поперечные силы высшего порядка.

Компоненты векторов напряжений и деформаций связаны следующими соотношениями:

$$\begin{aligned}
&M_x = D_{11}[(\kappa_x + \mu_{11}\kappa_y) + (\overline{\kappa_x} + \mu_{12}\overline{\kappa_y})];\\
&M_y = D_{11}[(\kappa_y + \mu_{11}\kappa_x) + (\overline{\kappa_y} + \mu_{12}\overline{\kappa_x})];\\
&M_{xy} = 2D_{11}[(1-\mu_{11})\kappa_{xy} + (1-\mu_{12})\overline{\kappa_{xy}}];\\
&\overline{M_x} = -D_{11}[c_1(\kappa_x + \mu_{12}\kappa_y) + c_2(\overline{\kappa_x} + \mu_{22}\overline{\kappa_y})];\\
&\overline{M_y} = -D_{11}[c_1(\kappa_y + \mu_{12}\kappa_x) + c_2(\overline{\kappa_y} + \mu_{22}\overline{\kappa_x})];\\
&\overline{M_{xy}} = -2D_{11}[c_1(1-\mu_{12})\kappa_{xy} + c_2(1-\mu_{22})\overline{\kappa_{xy}}];\\
&\overline{Q_x} = D_{11}\overline{\varphi_x}; \overline{Q_y} = D_{11}\overline{\varphi_y}.
\end{aligned} \qquad (7.1.19)$$

Отсюда получаем компоненты матрицы $[D]$.

Пример применения изложенной методики для расчета прогиба диафрагмы УЧЭ туннельного преобразователя под действием внешней нагрузки

Диафрагма чувствительного элемента туннельного преобразователя имеет форму правильного восьмиугольника и в определенных случаях может рассматриваться как тонкая слоистая пластина. Форма восьмиугольника была выбрана как допустимое удобством технологической реализации приближение к круглой форме диафрагмы. Помимо основного поликремниевого слоя (толщина может варьироваться от 1 до 3 мкм) имеется слой платиновой (или силицидной) металлизации толщиной 100 или 200 нм в зависимости от варианта изготовления с подслоем титана толщиной 50 нм. Прочие (кроме толщин) размеры должны быть подобраны после соответствующих расчетов исходя из требований, предъявляемых к конкретной модели преобразователя. Закрепление краев диафрагмы может быть как жестким, так и упругим – это зависит от отсутствия или наличия гофров.

Для того чтобы между иглой и электродом диафрагмы появился туннельный ток, необходимо подвести их друг к другу на туннельное расстояние. Как уже было сказано выше, это осуществляется путем подачи разности потенциалов между диафрагмой и отклоняющим электродом, которые в совокупности друг с другом образуют плоский конденсатор емкости $c=\varepsilon_0 A/d$, где $\varepsilon_0 = 8.85\cdot10^{-12}$ Ф/м – диэлектрическая проницаемость вакуума, A – площадь диафрагмы, d – расстояние между диафрагмой и отклоняющими электродами. Если между диафрагмой и отклоняющим электродом приложить разность потенциалов V, то начальная интенсивность нагружения диафрагмы определится по формуле $q = \varepsilon_0 V^2 / 2d^2$.

Предложенный выше метод был использован для вычисления значений максимального статического прогиба диафрагмы УЧЭ под действием приложенной разности потенциалов в приближении малых прогибов (предполагая, что электростатическая нагрузка не изменяется при изменении межэлектродного зазора), а также для расчета частоты основного тона

ее собственных колебаний. На рис.7.1.2 изображена диафрагма УЧЭ, покрытая конечноэлементной сеткой.

Поперечный размер диафрагмы в рассматриваемом случае составлял 2000 мкм, толщины слоев платины, титана и кремния – соответственно h_{Pt} = 200 нм, h_{Ti} = 50 нм, h_{Si} = 1 мкм. Модули Юнга и коэффициенты Пуассона для поликремния, титана и платины были приняты равными соответственно E_{Si} = 140 ГПа, ν_{Si} = 0.32, E_{Ti} = 130 ГПа, ν_{Ti} = 0.32 и E_{Pt} = 160 ГПа, ν_{Pt} = 0.32. Края диафрагмы жестко закреплены. При проведении численных расчетов на ЭВМ был использован конечноэлементный программный пакет ANSYS.

Для сравнения были проведены аналитические расчеты тех же параметров для тонкой круглой кремниевой пластинки радиуса 1000 мкм и толщины 1 мкм с жестко закрепленными краями. В случае равномерного нагружения с интенсивностью q круглой пластинки уравнение, описывающее прогиб w, выглядит так [67]:

$$\frac{d}{dr}\left[\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{dw}{dr}\right)\right]=\frac{qr}{2D}, \qquad (7.1.20)$$

где $D=\dfrac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$ – цилиндрическая жесткость, E и ν – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала пластинки, h – ее толщина.

В случае приложения нагрузки, равной, как и раньше, $q=\varepsilon_0 V^2/2d^2$, максимальный прогиб (наблюдаемый в центре пластинки) будет равен:

$$w_{\max}=\frac{\varepsilon_0 V^2 R^4}{128 d^2 D}. \qquad (7.1.21)$$

Для вычисления собственных частот колебаний такой пластинки необходимо решить уравнение

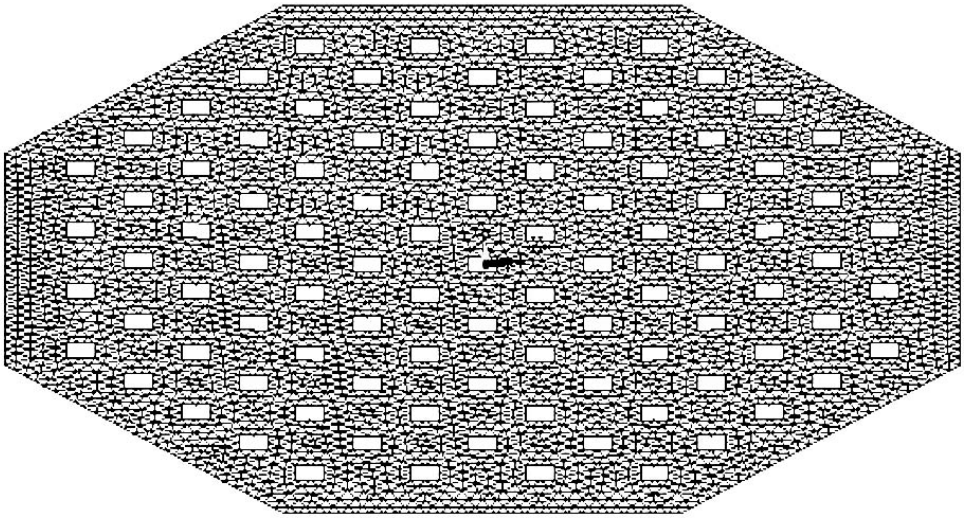


Рис. 7.1.2. Конечноэлементное разбиение диафрагмы чувствительного элемента

$$\Delta\Delta w = -a^2 w_{tt}, \qquad (7.1.22)$$

где $a^2 = \dfrac{\rho h}{D}$, ρ – плотность кремния, равная $2{,}33 \cdot 10^3$ кг/м^3. Для диафрагмы с защемленными краями получим следующее выражение для резонансных частот (см. [68] или [69]):

$$p_{mn} = \frac{x_{mn}^2 h}{2\pi R^2}\sqrt{\frac{E}{12\rho(1-\nu^2)}}, \qquad (7.1.23)$$

где x_{mn} – m-й корень уравнения $\dfrac{J_n(x)}{J_n'(x)} = \dfrac{I_n(x)}{I_n'(x)}$. Здесь $J_n(x)$ и $I_n(x)$ – соответственно обыкновенная и модифицированная функции Бесселя порядка n.

Для круглой кремниевой диафрагмы радиуса $R = 1000$ мкм и толщины $h = 1$ мкм вычисленная таким образом частота основного тона $f_0 = p_{10} = 3067$ Гц.

Частота основного тона для восьмиугольной двухслойной диафрагмы (параметры приведены выше), вычисленная методом конечных элемен-

Таблица 7.1.1

Зависимость максимального прогиба диафрагмы от приложенного напряжения при различных начальных расстояниях d между диафрагмой и отклоняющим электродом

V (d=1.5 мкм), В	V (d=3 мкм), В	V (d=6 мкм), В	$w1_{max}$, мкм	$w2_{max}$, мкм
0.1	0.2	0,4	0,02	0,019
0,2	0,4	0,8	0,09	0,074
0,25	0,5	1,0	0,15	0,115
0,3	0,6	1,2	0,21	0,165
0,35	0,7	1,4	0,29	0,224

тов, составила $f_{0мкэ}$ = 3050 Гц.

Табл.7.1.1 показывает зависимость максимального прогиба диафрагмы от приложенного напряжения при различных начальных расстояниях *d* между диафрагмой и отклоняющим электродом.

$w1_{max}$ – значение максимального прогиба, вычисленное по формуле (7.1.21) для круглой кремниевой пластины.

$w2_{max}$ – значение максимального прогиба, вычисленное для восьмиугольной трехслойной (Si-Ti-Pt) диафрагмы методом конечных элементов.

Параметры диафрагм приведены выше.

Незначительное отличие результатов конечноэлементного и аналитического расчетов обусловлено тем, что поперечные размеры рассчитываемых диафрагм гораздо больше их толщин, а также незначительной разницей между принятыми значениями модулей Юнга кремния и платины. На практике существует необходимость в экспериментальном определении упругих констант материалов МЭМС [6,7]. Это обусловлено тем, что упругие механические константы, такие как модуль упругости и коэффициент Пуассона поликремниевых пленок, используемых при изготовлении широкого спектра МЭМС (в частности, и туннельных преобразователей) нахо-

дятся в тесной зависимости от технологического маршрута, выполняемого при изготовлении изделия [8÷10,51].

Следует также отметить, что в реальной диафрагме туннельного преобразователя (как и любого другого преобразователя, изготовленного по технологии МЭМС) проделываются периодические отверстия (показаны на рис.7.1.2), необходимые для вытравливания т.н. «жертвенного слоя» на конечных этапах технологии изготовления изделия. В одном из вариантов изготовления устройства они имеют размер 5×5 мкм и располагаются в шахматном порядке с шагом 20 мкм. При моделировании напряженно-деформированного состояния подвижных элементов МЭМС целесообразно учитывать их влияние. Однако, если их размеры намного меньше размеров задачи, это затрудительно сделать путем сгущения конечноэлементной сетки из-за ограниченности вычислительных ресурсов существующих ЭВМ. Эта задача может быть решена при помощи методов осреднения, использующихся в механике композиционных материалов [11].

7.2. Эффект схлопывания электродов (pull-in instability) электростатического актюатора УЧЭ туннельного преобразователя

Эффект неконтролируемого схлопывания электродов (pull-in instability) имеет место практически во всех видах микроэлектромеханических актюаторов с электростатическим управлением, накладывая ощутимые ограничения на характеристики МЭМС- и НЭМС-устройств. Впервые исследованием этого явления занялся английский ученый Тейлор, поставив в конце 1960-х годов ряд экспериментов по слиянию капель электропроводящей жидкости (расположенных достаточно близко друг от друга) под действием приложенной к ним разности электрических потенциалов [12]. Как только разность потенциалов достигала некоторого порогового значения, капли сливались друг с другом, несмотря на то, что между ними оставался еще достаточный запас расстояния. В работе [13] была разрабо-

тана математическая модель этих экспериментов в приближении малого аспектного соотношения. Задача была сведена к нелинейному обыкновенному дифференциальному уравнению, описывающему поведение диафрагмы. Полученное уравнение было решено численно.

Примерно в это же время был создан первый кремниевый микромеханический прибор – транзистор с резонансным затвором, в котором наблюдался этот же эффект [14,15]. Прибор включал в себя металлизированную консольную балку, нависающую над канальной областью МОП-транзистора. В указанных работах было проанализировано его поведение при различных значениях отклоняющего напряжения и впервые введен термин «pull-in instability». Эксперимент и расчеты показали, что как только конец балки переместится приблизительно на треть своего пути к отклоняющему электроду, положение балки станет неустойчивым, и она самопроизвольно переместится на остальное расстояние в результате быстрого возрастания электростатических сил на ее конце. Для расчетов использовалась модель простейшей электромеханической системы (mass spring model) (рис.7.2.1).

С тех пор было разработано и создано множество микромеханических устройств различного назначения. В большинстве из них для управления движением упругого элемента используется электрическое поле (как и в рассматриваемых туннельных преобразователях). При проектировании туннельных преобразователей требуется учет описанного эффекта схлопывания для разных вариантов преобразователя и, если необходимо, предложение методик борьбы с его влиянием. Это было сделано на основе подходов, описанных в работах [13÷29, 46÷48].

В данном разделе описаны эффект схлопывания электродов и методы его подавления в планарных микро- и наномеханических системах. Указывается на необходимость учета казимировского взаимодействия, наблюдающегося на субмикронных и нанометровых расстояниях между электродами. Рассматриваются описания актюаторов с использованием нес-

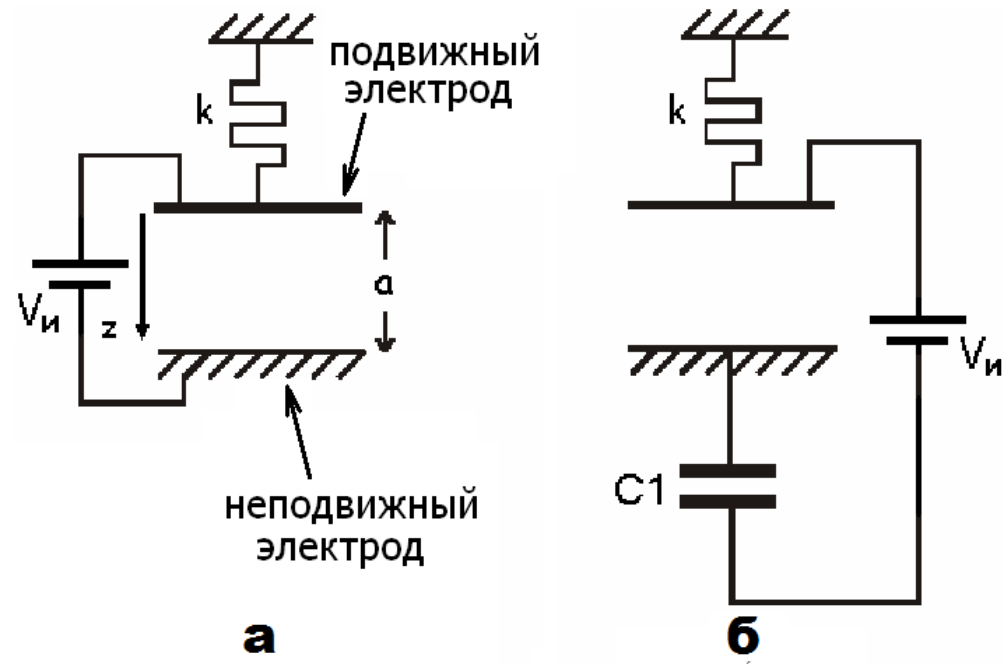


Рис. 7.2.1. Схема простейшей электромеханической модели (пластина на упругом подвесе) для анализа электростатического схлопывания: а – приложение управляющего напряжения непосредственно к электродам; б – приложение управляющего напряжения через последовательно включенный конденсатор

кольких типов моделей – пластина на упругом подвесе, круглая диафрагма, тонкие пластины произвольной геометрии. Описанные методы и соотношения могут быть использованы для расчета и оптимизации параметров упругого элемента диафрагменного типа, применяемого в туннельном преобразователе.

Простейшая модель упругого элемента – пластина на упругом подвесе

Эта простейшая электромеханическая модель (рис.7.2.1,а), пригодная для описания эффекта электростатического схлопывания в ряде устройств, использовалась при расчете транзистора с резонансным затвором [14,15]. Предполагается, что на подвижный электрод действуют следую-

щие силы: сила упругости пружины $F_{Упр} = -kw$, сила электростатического притяжения $F_{Пр} = \dfrac{\varepsilon_0 \varepsilon\ SV^2}{2(a-w)^2}$ и внешняя сила $F_{Вн} = pS$. Здесь k – жесткость упругого подвеса, ε_0 – электрическая постоянная, ε - относительная диэлектрическая проницаемость среды, a – начальное расстояние между подвижным и неподвижным электродами, S – площадь электрода, V – прикладываемое напряжение, p – внешнее давление. В случае, иллюстрируемом рис.7.2.1,а, $V=V_И$. Уравнение равновесия имеет следующий вид:

$$kw = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon\ S\ V^2}{2(a-w)^2} + pS\,. \qquad (7.2.1)$$

Переходя к безразмерным переменным

$W = w/a,\ \ \beta = \dfrac{\varepsilon_0 \varepsilon\ S\ V_И^2}{2ka^3}, P = \dfrac{pS}{ka}$, получим:

$$(W-P)(1-W)^2 = \beta\,. \qquad (7.2.2)$$

В работе [27] величина β названа «приведенным напряжением». Анализируя последнее уравнение, можно убедиться, что для описанной системы при $P = 0$ расстояние, пройденное подвижным электродом до точки схлопывания, $w_{Кр} = a/3$ или $W_{Кр} = 1/3$ [14÷15,27]. Этому расстоянию соответствует критическое значение напряжения $V_{Кр} = 0.183 \cdot 10^6 \sqrt{\dfrac{ka^3}{\varepsilon\ S}}$. На рис. 7.2.2 изображены графики зависимости относительного отклонения W от «приведенного напряжения» β, построенные по формуле (7.2.2) для разных значений P. Для случая $P = 0$ обозначены критические значения $W_{Кр}$ и $\beta_{Кр}$.

Как видно из рис. 7.2.1, равновесие возможно как при $W < W_{Кр}$, так и при $W > W_{Кр}$, то есть одному значению β могут соответствовать два состояния системы. Однако для случая $W > W_{Кр}$ равновесие является неустойчивым, и любые флуктуации в сторону увеличения смещения способны вы-

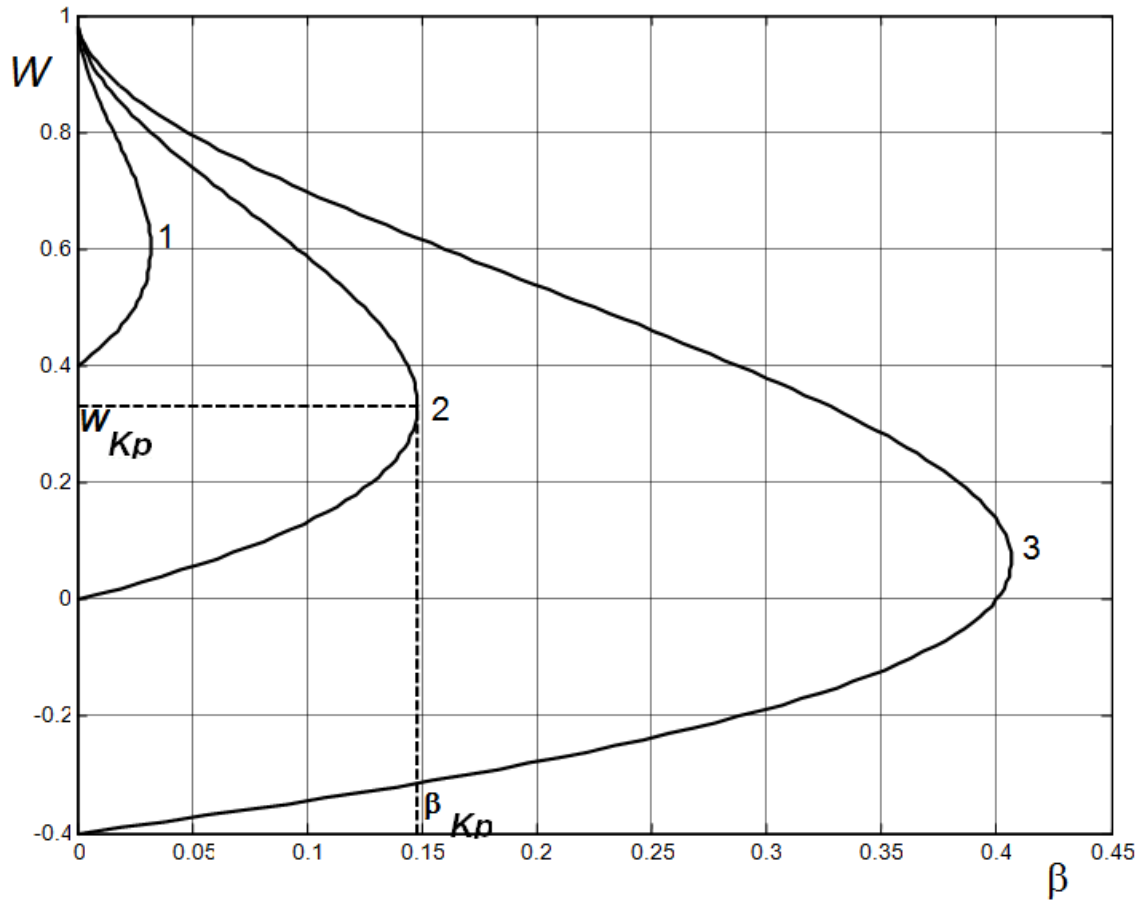


Рис. 7.2.2. Зависимость относительного отклонения W от «приведенного напряжения» β для пластины на упругом подвесе в случае приложения управляющего напряжения непосредственно к электродам при:

1 – P = 0,4;

2 – P = 0;

3 – P = -0,4

вести систему из равновесия и привести к схлопыванию электродов [18].

Для увеличения значения W_{Kp} и, следовательно, сведения к возможному минимуму влияния эффекта неконтролируемого электростатического притяжения существует ряд методов. Так, для этого предлагались специальные конструкции как упругих подвесов [21], так и всего электромеханического узла, обеспечивающего движение упругого элемента под действием электростатических сил [23,26], предлагалось также использование

петли обратной связи [22].

Однако самым простым и удачным с точки зрения технологической реализации методом оказалось последовательное включение в цепь конденсатора [24÷26] или варикапа [24,28] (на рис. 7.2.1,б обозначен как C_1).

В случае использования последовательно включенного конденсатора управляющее напряжение V между подвижным и неподвижным электродами можно определить по формуле

$$V = \frac{V_И}{1 + \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{(a - w)\ C1}}. \qquad (7.2.3)$$

А уравнение (2.25) преобразуется к виду:

$$(W - P)(1 - W + \chi)^2 = \beta, \qquad (7.2.4)$$

где $\chi = \frac{\tilde{N}_0}{\tilde{N}_1}$, а $C_0 = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{a}$ – начальная емкость устройства.

Графики зависимостей W от β для разных значений χ и P приведены соответственно на рис.7.2.3. Видно, что при использовании в устройстве конденсатора емкостью $\tilde{N}_1 = \frac{\tilde{N}_0}{2}$ возможно устойчивое отклонение подвижного электрода на всю величину начального межэлектродного зазора при $P = 0$. Приложение положительной внешней нагрузки P тоже частично подавляет эффект неконтролируемого электростатического притяжения.

Вместо конденсатора для борьбы с эффектом схлопывания возможно также использовать полупроводниковый варикап [24], емкость C_B которого находится в следующей зависимости от прикладываемого к нему напряжения V_B [30]:

$$C_B = C_H \sqrt{\frac{1}{1 + \frac{V_B}{\varphi_K}}}, \qquad (7.2.5)$$

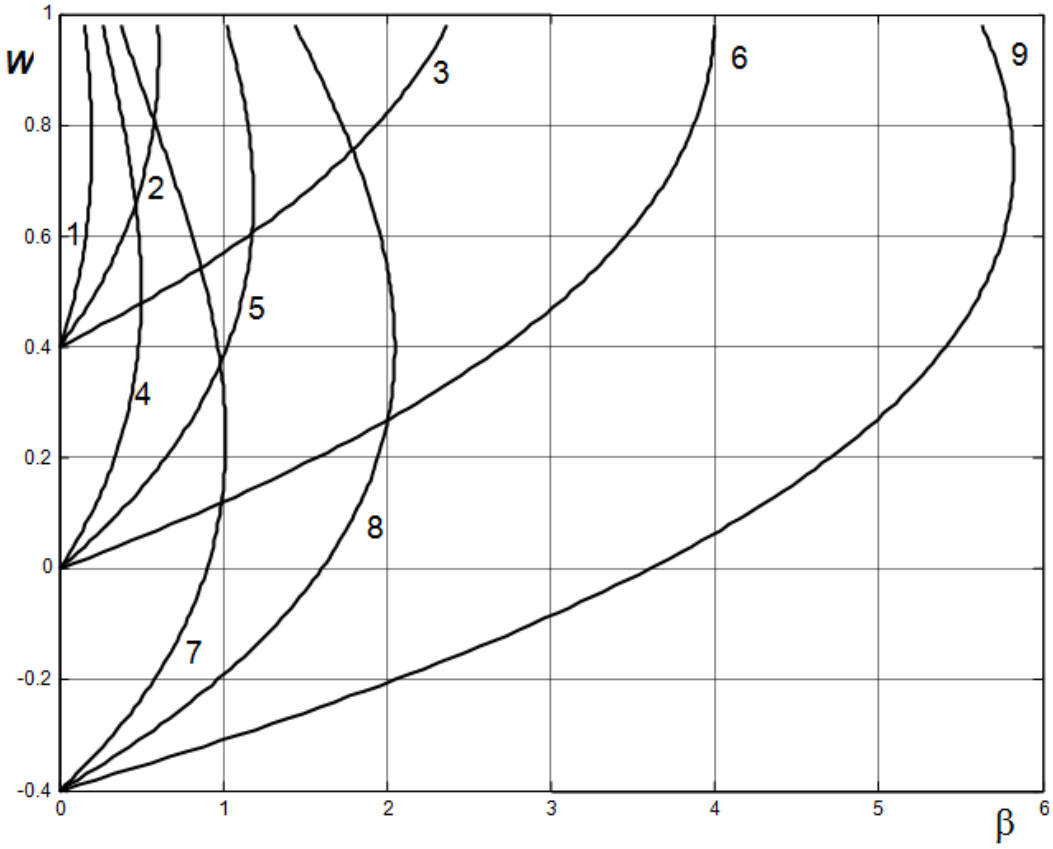


Рис. 7.2.3. Зависимости W от β для пластины на упругом подвесе при P = 0 в случае приложения управляющего напряжения через последовательно включенный конденсатор для разных значений χ и P: 1, 4, 7 – χ=0.5 соответственно при P = 0.4, P = 0 и P = -0.4; 2, 5, 8 – χ=1 соответственно при P = 0.4, P = 0 и P = -0.4; 3, 6, 9 – χ=2 соответственно при P = 0.4, P = 0 и P = -0.4

где φ_K – контактная разность потенциалов, а C_H – емкость варикапа при нулевом напряжении.

В этом случае W и β удовлетворяют более сложному уравнению:

$$\chi_1\sqrt{(W-P)+\frac{(W-P)}{\sqrt{\Phi_k}}(\sqrt{\beta}-\sqrt{(W-P)(1-W)^2})}-\sqrt{\beta}+\sqrt{(W-P)(1-W)^2}=0 \quad (7.2.6)$$

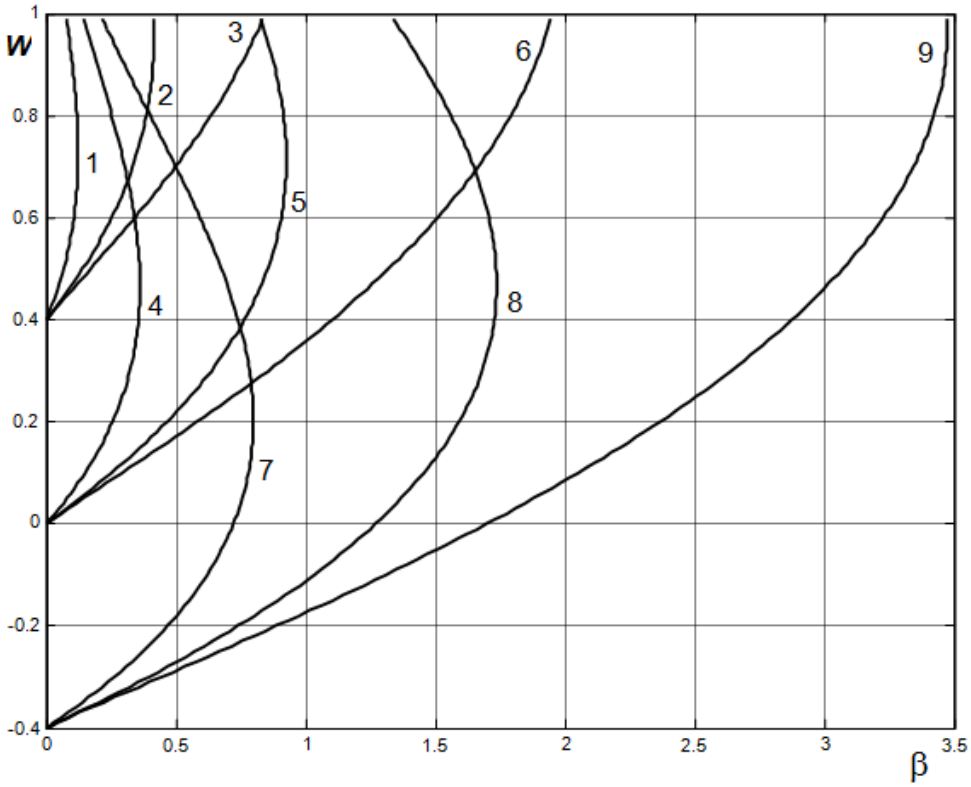


Рис. 7.2.4. Зависимости W от β для пластины на упругом подвесе при P = 0 в случае приложения управляющего напряжения через последовательно включенный варикап:

при P = 0,4: 1: χ_1 =0,3, Φ_k = 0,5; **2**: χ_1 =0,6, Φ_k = 0,5;

3:χ_1=0,6, Φ_k = 0,1;

при P = 0: 4: χ_1 =0,3, Φ_k = 0,5; **5**: χ_1 =0,6, Φ_k = 0,5;

6:χ_1=0,6, Φ_k = 0,1;

при P = -0,4: 7: χ_1 =0,3, Φ_k = 0,5; **8**: χ_1 =0,6, Φ_k = 0,5;

9:χ_1=0,6, Φ_k = 0,1

Здесь $\chi_1 = \dfrac{C_0}{C_H}$, $\Phi_k = \dfrac{\varepsilon\varepsilon_0 S}{2ka^3}\varphi_k^2$.

Последнее уравнение было решено численно. Графики зависимостей W от β для разных значений χ_1, Φ_k и P изображены на рис. 7.2.4.

Из рисунка видно, что использование варикапа также позволяет добиться увеличения диапазона устойчивого отклонения подвижного электрода. При этом прикладываемые напряжения меньше, чем в случае применения конденсатора фиксированной емкости. Уменьшение Φ_k в некоторых случаях позволяет приблизить зависимость W от β к линейной.

Упругий элемент – диафрагма конечной толщины и произвольной геометрии

Материалы, из которых выполняется основной несущий слой диафрагм микроэлектромеханических устройств, могут быть различными – поликремний, SiO_2, Si_3N_4, кремний, легированный бором [49÷52]. Основным требованием, предъявляемым к диафрагмам, является наличие растягивающих усилий в их срединной плоскости. В противном случае подобные упругие элементы имеют тенденцию к прогибу, сморщиванию и в конечном итоге к разрушению.

При выборе математической модели, описывающей упругий элемент диафрагменного типа, ключевой является величина отношения h / l, где h – толщина диафрагмы, l – ее размер.

Если при описании поведения упругого элемента диафрагменного типа нельзя пренебречь изгибной жесткостью (что бывает при рассмотрении диафрагм конечной толщины), и, наряду с этим, диафрагма имеет сложную форму, аналитическое описание такого упругого элемента становится невозможным. Как правило, в большинстве случаев для этого используют методы конечных или граничных элементов [1,5,31], при помощи которых можно с высокой точностью моделировать поведение конкретной конструкции. Однако на начальном этапе проектирования часто бывает целесообразным воспользоваться приближенными методами расчета, дающими ответ в аналитической форме и позволяющими оценить поведение конструкции с приемлемой точностью. В [16÷19] описано применение вариационных энергетических методов к расчету микроэлектроме-

ханических упругих диафрагменных элементов различной геометрии.

Принцип виртуальных перемещений дает уравнение [2]:

$$\delta V_{деф} - \delta \iint p(x,y) w(x,y) dxdy = 0, \qquad (7.2.7)$$

где

$$V_{деф} = \frac{Eh^3}{24(1-\mu^2)} \iint \left\{ \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} \right) - 2(1-\mu) \left[\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} - \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y} \right)^2 \right] \right\} dxdy +$$

$$+ \frac{Eh}{2(1-\mu^2)} \iint \left\{ \left(\frac{\partial u}{\partial x} \right)^2 + \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial y} \right)^2 + \frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{4} \left[\left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right]^2 + \right.$$

$$+ 2\mu \left[\frac{\partial u}{\partial x} \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{1}{2} \frac{\partial v}{\partial y} \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{2} \frac{\partial u}{\partial x} \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right] + \frac{1-\mu}{2} \left[\left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)^2 + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial v}{\partial x} + \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 + \right.$$

$$\left. \left. + 2 \frac{\partial u}{\partial y} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} + 2 \frac{\partial v}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial x} \frac{\partial w}{\partial y} \right] \right\} dxdy + \frac{T_0}{2} \iint \left\{ \left(\frac{\partial w}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial w}{\partial y} \right)^2 \right\} dxdy \qquad (7.2.8)$$

– энергия деформации диафрагмы, состоящая из изгибной и мембранной частей, *w(x,y)* – прогиб диафрагмы под действием нагрузки $p(x,y)$, E и μ – соответственно модуль упругости и коэффициент Пуассона материала диафрагмы, h – ее толщина, T_0 – начальное натяжение диафрагмы (предполагается однородным). Интегрирование ведется по площади диафрагмы. Выражение (7.2.8) для энергии деформации соответствует случаю больших прогибов пластинки, подвергнутой предварительному однородному растяжению в плоскости (x, y).

Применяя энергетический метод, необходимо в каждом частном случае принять надлежащие выражения для смещений *u*, *v* и *w*. Эти выражения должны удовлетворять граничным условиям и содержать несколько произвольных параметров, значения которых подлежат определению методом виртуальных перемещений.

7.3. Особенности функционирования электростатических актюаторов с субмикронным межэлектродным зазором. Расчет отклонения диафрагменного актюатора под действием электрического поля

Развитие планарной технологии предусматривает дальнейшую миниатюризацию производящихся в соответствии с ней устройств, в том числе и микроэлектромеханических. При достижении элементами МЭМС субмикронных и нанометровых размеров, ощутимое влияние на их работу начнут оказывать силовые взаимодействия, слабо проявляющиеся на «больших» расстояниях в единицы микрон, характерных для сегодняшних микроэлектромеханических устройств. К этим силам могут быть отнесены силы Ван-дер-Ваальса и Казимира, которые являются основными учитываемыми взаимодействиями в некоторых режимах атомно-силовой микроскопии [53,54]. Они также должны быть приняты во внимание при расчете МЭМС с элементами, разнесенными друг от друга на субмикронные расстояния, если же расстояния между элементами уменьшатся до единиц или десятков нанометров (в НЭМС), эти силы будут полностью определять работу прибора. В частности, казимировское взаимодействие начинает оказывать ощутимое влияние на функционирование некоторых актюаторов диафрагменного типа уже при достижении межэлектродным зазором величины около 0,5 мкм [32÷33, 45]. Силы Ван-дер-Ваальса менее дальнодействующие и проявляются на расстояниях, меньших характерной длины волны спектра поглощения [33]. Эффект Казимира выражается в том, что на единицу площади двух проводящих плоскопараллельных пластин действует сила притяжения

$$F_C = \frac{\gamma \hbar c \pi^2}{240 a^4}, \qquad (7.3.1)$$

где c – скорость света в вакууме, $\hbar$ – постоянная Планка, a – расстояние между пластинами, $\gamma \leq 1$ – коэффициент, зависящий от диэлектрической

проницаемости пластин и среды между ними (для сверхпроводящих пластин в вакууме $\gamma = 1$). Эффект может быть объяснен изменением спектра нулевых колебаний из-за обращения в нуль тангенциальной составляющей электрического поля на пластинах [34]. Вид формулы (7.3.1) может меняться в зависимости от формы взаимодействующих тел.

Рассмотрим электростатический актюатор, описываемый простейшей электромеханической моделью с одной степенью свободы (рис.7.3.1). С учетом эффекта Казимира уравнение (7.2.6), описывающее случай применения варикапа для увеличения диапазона хода подвижного электрода, примет вид:

$$\sqrt{W-P-\frac{\alpha}{(1-W)^4}}\left\{1-W+\chi_1\sqrt{1+\frac{\left(\sqrt{\beta}-\sqrt{\left(W-P-\frac{\alpha}{(1-W)^4}\right)(1-W)^2}\right)}{\sqrt{\Phi_k}}}\right\}-\sqrt{\beta}=0. \quad (7.3.2)$$

Здесь $\alpha = \dfrac{\gamma\pi^2\hbar cS}{240ka^5}$.

Положив $\Phi_k = \infty$ и заменив χ_1 на χ, придем к уравнению для случая использования конденсатора фиксированной емкости, которое при $\chi = 0$ описывает случай приложения отклоняющего напряжения непосредственно к электродам.

При помощи полученных соотношений был рассчитан диапазон устойчивого отклонения изображенного на рис.7.3.1 упругого поликремниевого элемента и подобраны параметры конденсатора и варикапа, предназначенных для расширения этого диапазона. Упругий элемент представляет собой электростатически отклоняемую квадратную пластину, подвешенную на четырех консольных балках (кантилеверах). Микромеханические кантилеверы широко используются в задачах атомно-силовой микроскопии [35÷36], поэтому хорошо известна зависимость их жесткости от конструктивно-технологических параметров. Обычно коэффициент жест-

кости изменяется в диапазоне 0,01-50 Н/м [36]. Его величину для прямоугольного кантилевера можно определить по формуле:

$$k_K = \frac{Eh^3C}{4L^3}, \qquad (7.3.3)$$

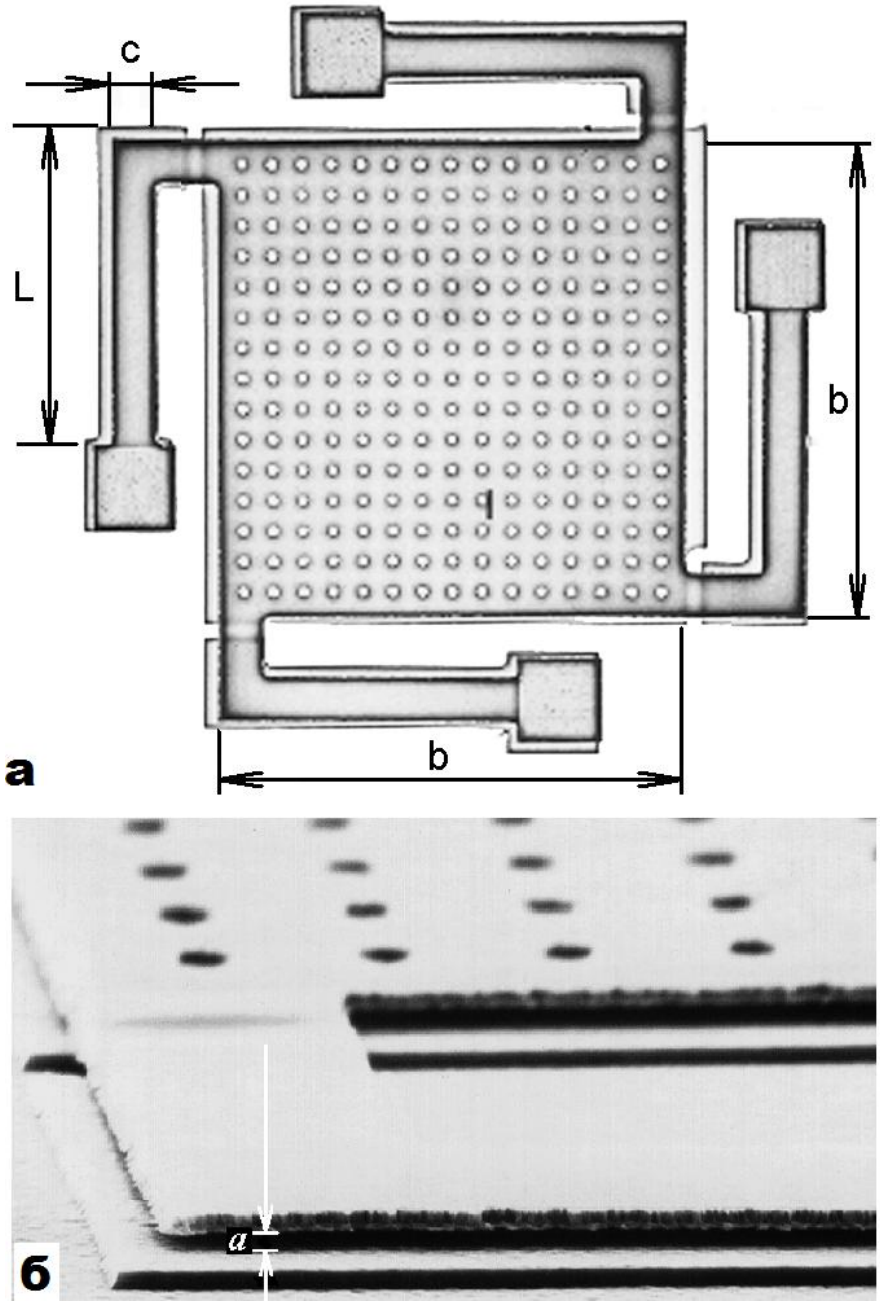


Рис. 7.3.1. Вариант электростатического актюатора – пластина, подвешенная на 4 х консольных балках

где h, C и L – соответственно толщина, ширина и длина кантилевера, а E – модуль Юнга материала. Для поликристаллического кремния модуль Юнга составляет $E \approx 160$ ГПа [37].Диафрагма чувствительного элемента туннельного преобразователя имеет форму правильного восьмиугольника и в определенных

Для поликремниевого кантилевера с размерами L=250 мкм, C = 30 мкм, h = 1 мкм коэффициент жесткости составит k_K = 0,07 Н/м, а суммарная жесткость подвеса $k = 4k_K$ = 0,3 Н/м. Если b = 400 мкм, то площадь электрода $S = b^2$ = =1,6·10^{-7} м^2.

Пусть начальное расстояние между нижним и верхним электродами a = 1 мкм, а внешнее давление P = 0. Начальная емкость рассматриваемого устройства $C_0 = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon\ S}{a} = 1{,}41$ ïÔ . Для расширения диапазона движения подвижного электрода целесообразно использовать конденсатор емкостью $C1 = \frac{C_0}{2} = 0{,}7$ пФ. Для этой цели можно также использовать варикап с начальной емкостью $C_Н$=0,89пФ и контактной разностью потенциалов φ_K=0,25В. Приведенная контактная разность потенциалов составит Φ_k=0,15, а χ_1=0,63. На рис.7.3.2 представлены зависимости величины отклонения подвижного электрода w от приложенного напряжения $V_И$ для изображенного на рис.7.3.1 устройства при использовании упомянутых конденсатора и варикапа с учетом и без учета казимировского взаимодействия (принимается γ=1, P=0).

Из рисунка видно, что в рассмотренном устройстве из-за действия казимировских сил невозможно добиться устойчивого отклонения подвижного электрода на всю величину зазора путем использования конденсатора или варикапа. Казимировское взаимодействие начинает оказывать существенное влияние на работу прибора при величине зазора около 0,5 мкм.

Еще одним примером микроэлектромеханического устройства, при расчете которого должно быть учтено казимировское взаимодействие, может

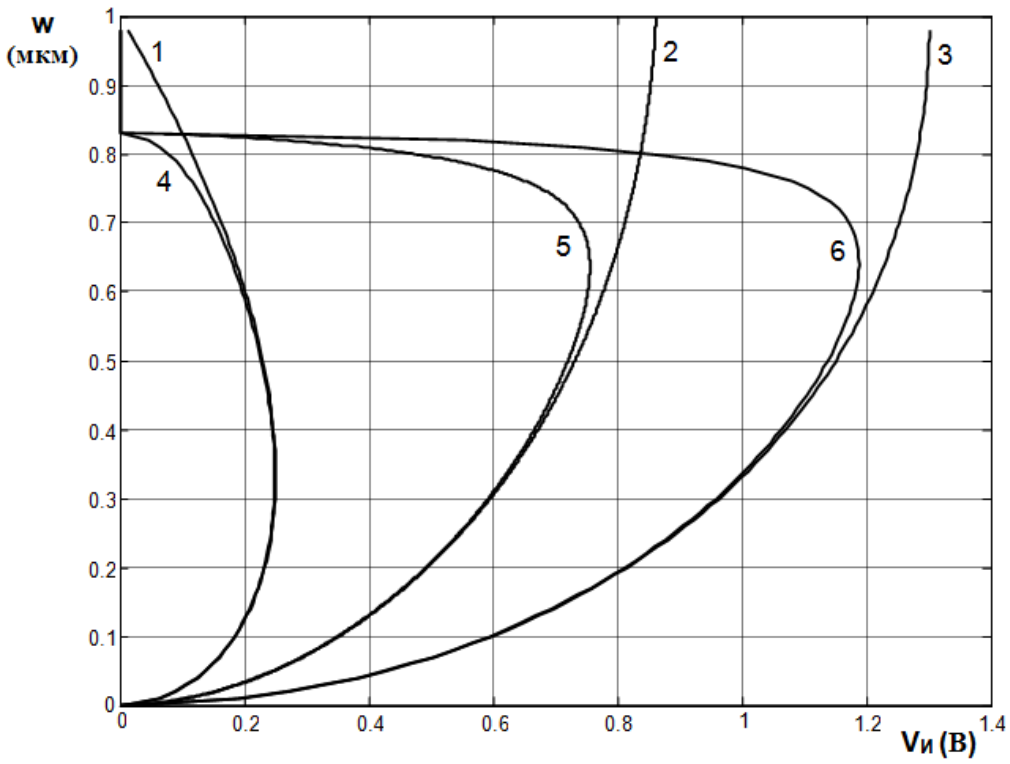


Рис. 7.3.2. Зависимости отклонения подвижного электрода *w* от управляющего напряжения $V_И$ для изображенного на рис.7.3.1 устройства соответственно без учета и с учетом казимировского взаимодействия:

1, 4 – приложение управляющего напряжения непосредственно к электродам;

2, 5 – использование варикапа (χ_1=0,63, φ_K = 0,25 В);

3, 6 – использование конденсатора (χ =2)

служить электростатический актюатор диафрагменного типа, изображенный на рис.7.3.3. Используемая в приборе поликремниевая диафрагма, имеющая форму правильного восьмиугольника, подвешена над отклоняющим электродом на расстоянии порядка одного или нескольких микрон.

Для расчета отклонения такой диафрагмы под действием внешних сил можно воспользоваться вышеупомянутым энергетическим методом.

Выберем пробные функции перемещений вдоль координатных осей в следующем виде:

$$w = w_0\left((y-0.7D)^2 - x^2\right)^2\left((y+0.7D)^2 - x^2\right)^2\left(x^2 - 0.25D^2\right)^2\left(y^2 - 0.25D^2\right)^2, \quad (7.3.4)$$

$$u = u_0 x\left((y-0.7D)^2 - x^2\right)^4\left((y+0.7D)^2 - x^2\right)^4\left(x^2 - 0.25D^2\right)^2\left(y^2 - 0.25D^2\right)^4, \quad (7.3.5)$$

$$v = u_0 y\left((y-0.7D)^2 - x^2\right)^4\left((y+0.7D)^2 - x^2\right)^4\left(x^2 - 0.25D^2\right)^4\left(y^2 - 0.25D^2\right)^2, \quad (7.3.6)$$

где D – размер диафрагмы, ν – коэффициент Пуассона материала, w_0, u_0 – варьируемые параметры. Справедливы следующие соотношения:

$$\frac{\partial V_{деф}}{\partial w_0}\delta w_0 = \delta\iint p(x,y)w(x,y)dxdy, \quad (7.3.7)$$

$$\frac{\partial V_{деф}}{\partial u_0} = 0, \quad (7.3.8)$$

из которых возможно найти w_0 и u_0. Энергия деформации $V_{деф}$ определяется в соответствии с (7.2.8). Интегрирование ведется по площади диафрагмы.

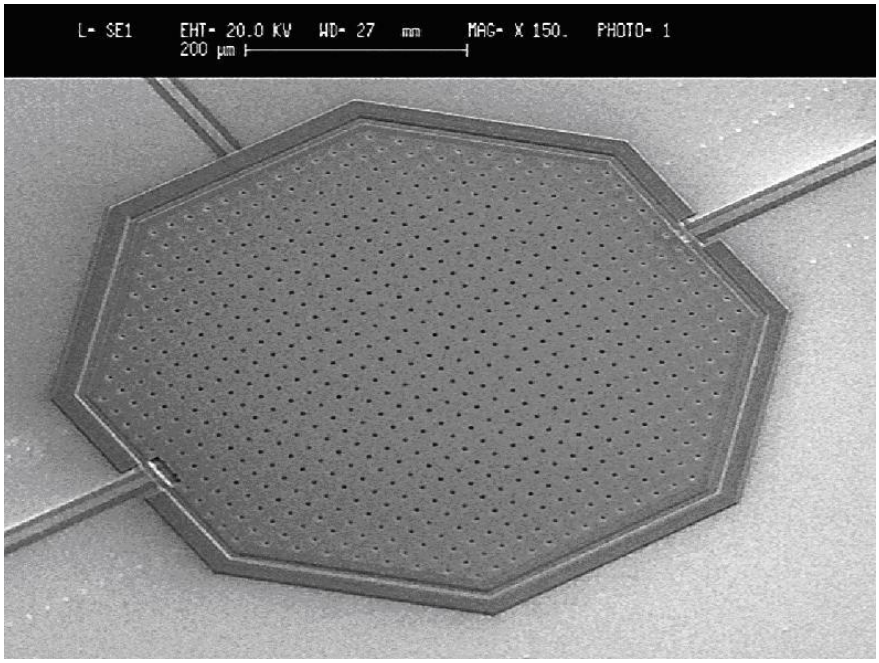


Рис. 7.3.3. Электростатический актюатор диафрагменного типа

Нагрузка, действующая на диафрагму, в нашем случае равна (учитываются внешнее давление, электростатические и казимировские силы):

$$p(x,y) = p_{âí} + \frac{\varepsilon\varepsilon_0 V^2}{2(a - w(x,y))^2} + \frac{\gamma\,\hbar c\pi^2}{240(a - w(x,y))^4} \qquad (7.3.9)$$

V – напряжение между диафрагмой и отклоняющим электродом. В случае приложения управляющего напряжения $V_И$ непосредственно к обкладкам $V = V_И$.

При использовании конденсатора и варикапа верны соотношения:

Рис. 7.3.4. Зависимости максимального прогиба изображенной на 7.3.3 диафрагмы w_{max} от управляющего напряжения $V_И$ с учетом казимировского взаимодействия: 1 – приложение управляющего напряжения непосредственно к электродам; 2 – использование конденсатора (С1=0.7пФ)

для конденсатора: $V_И = V\left(1+\dfrac{\varepsilon\varepsilon_0\iint\dfrac{dxdy}{a-w(x,y)}}{C1}\right)$, (7.3.10)

для варикапа: $V_И = V\left(1+\sqrt{1+\dfrac{V_И - V}{\varphi_k}}\,\dfrac{\varepsilon\varepsilon_0\iint\dfrac{dxdy}{a-w(x,y)}}{C_H}\right)$. (7.3.11)

Используя соотношения (7.2.7÷7.2.8, 7.3.4÷7.3.11), можно определить зависимость отклонения изображенной на рис.7.3.3 диафрагмы от подаваемого напряжения. Эти зависимости изображены на рис.7.3.4. D=600мкм, a=1 мкм, h=1 мкм. Приняли также γ=1, что соответствует случаю сверхпроводящих обкладок.

Из приведенных графиков можно сделать вывод, что для актюаторов диафрагменного типа использование последовательно включенной емкости с целью подавления эффекта схлопывания малоэффективно.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 7

1. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике / М. Мир 1975.
2. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки / М., «Наука», 1966.
3. Курант Р., Гильберт Д. Методы математической физики / Гос. издательство технико-теоретической литературы М.-Л., 1951.
4. Коренев Б.Г. Введение в теорию бесселевых функций / М., «Наука», 1971.
5. Балан Н.Н. Определение упругих свойств подвижных элементов MEMS-структур // Микросистемная техника №2, 2004.
6. Taechung Yiand and Chang-Jin Kim. Measurement of mechanical properties for MEMS materials. Meas. Sci. Technol. 10 (1999) 706–716.
7. David Herman, Michael Gaitan , and Don DeVoe. MEMS Test Structures for Mechanical Characterization of VLSI Thin Films. // Proc. SEM Conference, Portland Oregon, June 4-6 2001.
8. Wolf S., Tauber R.N. Silicon Processing for the VLSI Era / vol.1, Lattice Press, Sunset Beach, CA, 1986.
9. Vossen J.L. Thin Film Processes / Academic Press, New York, 1978.
10. Maisel L.I., Glang R. Handbook of Thin Film Technology / McGraw-Hill, New York, 1970.
11. Бахвалов Н.С, Панасенко Г.П. Осреднение процессов в периодических средах – математические задачи механики композиционных материалов / М., Наука, 1984.
12. Taylor G.I. The coalescence of closely spaced drops when they are at different electric potentials //Proc. Roy. Soc. A, 1968, v. 306, P. 423-434.
13. Ackerberg R.C. On a nonlinear differential equation of electrodynamics //Proc. Roy. Soc. A, 312 (1969), P. 129-140.

14. Nathanson H.C., Wickstrom R.A. A resonant-gate silicon surface transistor with high-Q bandpass properties // Applied Physics Letters, 1965, v.7, P. 84.
15. Nathanson H.C., Newell W.E., Wickstrom R.A., Davis J.R. The resonant-gate transistor //IEEE Trans. Electron. Devices, 1967, v. ED-14, P. 117.
16. Алексенко А.Г., Балан Н.Н. Анализ эффекта схлопывания электродов электростатических актюаторов (pull-in instability) в МЭМС- и НЭМС-устройствах // Нано- и микросистемная техника №7, 2005.
17. Драгунов В.П. Влияние формы упругого элемента на характеристики микроэлектромеханических систем // Микросистемная техника. №1. 2004.
18. Драгунов В.П. Нелинейность упругих элементов микромеханических систем // Микросистемная техника. №5. 2004.
19. Драгунов В.П. Нелинейная модель упругого элемента микромеханических систем // Микросистемная техника. №6. 2004.
20. Драгунов В.П. Нелинейная модель упругого элемента микромеханических систем // Микросистемная техника. 2004. №6. С.19-24.
21. Hung E.S., Senturia S.D. Leveraged bending for full-gap positioning with electrostatic actuation //Technical Digest of Solid State Sensor and Actuator Workshop. Hilton Head. 1998. P. 83-86.
22. Chu P.B., Pister S.J. Analysis of closed-loop control of parallel plate electrostatic microgrippers //Proc. IEEE International Conference on Robotics and Automation. San Diego. May 1994. P. 820-825.
23. Busta H., Amantea R., Furst D., Chen J.M., Turowsky M., Mueller C. A MEMS shield structure for controlling pull-in forces and obtaining increased pull-in voltages //J. Micromech. Microeng. 2001. 11. P. 720-725.

24. Seeger J.J., Crary S.B. Stabilization of Electrostatically Actuated Mechanical Devices //Proc. of the 1997 International Conference on Solid-State Sensors and Actuators. 1997. P. 1133-1136.
25. Seeger J.J., Crary S.B. Analysis and Simulation of MOS Capacitor Feedback for Stabilizing Electrostatically Actuated Mechanical Devices //Second Int. Conf. on the Simulation and Design of Microsystems and Microstructures – MICROSIM97. 1997. P. 199-208.
26. Chan E.K., Dutton R.W. Effects of Capacitors, Resistors and Residual Charge on the Static and Dynamic Performance of Electrostatically Actuated Devices //Proc. of SPIE. 1999. 3680. P. 120-130.
27. Bernstein D., Guidotti P., Pelesko J.A. Analytical and numerical analysis of electrostatically actuated MEMS devices //Proc. of MSM. 2000. P.489-492.
28. Pelesko J.A., Triolo A.A. Nonlocal problems in MEMS device control //J. Eng. Math. 2001. 41. 345-366.
29. Pelesko J.A., Chen X.Y. Electrostatic deflections of circular elastic membranes //J. of Electrostatics. 2003. 57. P. 1-12.
30. Шалимова К.В. Физика полупроводников /М. Энергоатомиздат, 1985.
31. Masters N.D. and Ye W. Fast BEM Solution for Coupled 3D Electrostatic and Linear Elastic Problems //Proc. of the 2004 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show. 2004. P. 426-429.
32. Serry F.M., Walliser D., Maclay G.J. The role of the Casimir effect in the static deflection and stiction of membrane strips in microelectomechanical systems (MEMS) // Journal of applied physics. 1998. Vol. 84(5). P. 2501-2506.
33. Ding Jian-Ning, Wen Shi-Zhu, Meng Yong-Gang Theoretical study of the sticking of a membrane strip in MEMS under the Casimir effect // Journal of Micromechanics and Microengineering. 2001. 11. P. 202-208.

34. Мостепаненко В.М., Трунов Н.Н. Эффект Казимира и его приложения // УФН. Том 156. Вып.3. 1988.
35. Быков В.А. Микромеханика для сканирующей зондовой микроскопии и нанотехнологии //Микросистемная техника. 2000. №1. С.21-33.
36. Арутюнов П.А., Толстихина А.Л. Конструктивные и электрофизические характеристики датчиков силы в атомно-силовой микроскопии //Микроэлектроника. 1998. Том 27. №4. С.304-316.
37. http://www.memsnet.org/material/
38. Agache V., Ringot R., Bigotte P., Senez V., Legrand B., Buchailot L., Collard D. Modeling and experimental validation of sharpening mechanism based on thermal oxidation for fabrication of ultra-sharp silicon nanotips // IEEE Trans. on Nanotechnology. 2005. Vol. 4. №5. P. 548-554.
39. Djuzhev N. A., Beliaev S. N., Vlasenko V. A., Gogin A. A., Gontar V. M., Deniskin V. V., Mazaev A. A., Nevsky A. B., Tishin Y. I., Shokin A. N. A Silicon Gated Field Edge Cathode // The 16th International Vacuum Microelectronics Conference. 2003. Senri Life Science Center. Osaka. Japan.
40. C.W. Dyck, J.H. Smith, S.L. Miller, E.M. Russick, C.L.J. Adkins Supercritical carbon dioxide solvent extraction from surface-micromachined micromechanical structures // SPIE Micromachining and Microfabrication, Oct. 1996.
41. Mulhern G.T., Soane D.S. and Howe R.T. Supercritical Carbon Dioxide Drying of Microstructures // The 7th Int. Conf. On Solid-State Sens. And Act., Yokohama, Japan, June 7-10, 1993, pp.296-299.
42. Балан Н.Н. Резонансная модель чувствительной части акустических туннельных сенсоров // Научная сессия МИФИ-2002: Сб. науч. тр., Москва, 21-25 янв. 2002 г. – М. : МИФИ, 2002. – Т.4. – С. 189.

43. Балан Н.Н., Груздев А.О., Невский А.Б., Гаврин С.С. Контроль структурных и электрофизических свойств пленок SiPt-металлизации электродов туннельного датчика методами сканирующей зондовой микроскопии // Научная сессия МИФИ-2006: Сб. науч. тр., Москва, 23-27 янв. 2006 г. – М. : МИФИ, 2006. – Т.1. – С. 70-71.
44. Balan N.N., Gruzdev A.O., Nevsky A.B., Frolov V.D. SPM-control of structural and electrical properties for PtSi-layers of electrode metallization in tunneling sensor // International conference «Micro- and nanoelectronics -2005»: Book of abstracts, 3-7 oct. 2005. – Moscow Zvenigorod, Russia: SPIE, 2005. – P. PI-11.
45. Lin Wen-Hui, Zhao Ya-Pu. Nonlinear behavior for nanoscale electrostatic actuators with Casimir force // Chaos, Solitons and Fractals. 2005. Vol. 23. P. 1777-1785.
46. Алексенко А.Г., Балан Н.Н., Волков Ю.А. О динамическом поведении упругих элементов МЭМС-устройств в присутствии эффекта электростатического схлопывания - Нано- и микросистемная техника №2, 2008 стр. 47-53.
47. Балан Н.Н., Волков Ю.А. Моделирование работы НЭМС туннельного сенсора // Всероссийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях ММПСН-2008»: Сб. науч. тр. конф., Москва, 12-14 марта 2008 г. – М.: МИФИ, 2008. – С. 26.
48. Балан Н.Н., Волков Ю.А. Численное моделирование МЭМС- и НЭМС-устройств с управлением электрическим полем // Всероссийская конференция «Многомасштабное моделирование процессов и структур в нанотехнологиях ММПСН-2008»: Сб. науч. тр. конф., Москва, 12-14 марта 2008 г. – М. : МИФИ, 2008. – С. 48.
49. Petersen K.E. Silicon as a mechanical material //Proc. IEEE, 70(5), 420-457 (May 1982).

50. Jerman H., Terry S. Sensors and Actuators /Ed. by P. Rai-Choudhury, Handbook of Microlitography, Micromachining and Microfabrication, vol.2: Micromachining and Microfabrication, p. 379, ISBN 0-8194-2379-3, SPIE Optical Engineering Press, Washington, 1997.
51. Ed. by Mohamed Gad-el-Hak, The MEMS Handbook. CRC Press. 2002.
52. Шурыгина В. Долгожданные МЭМС: технология малых форм // Электроника: Наука, Технология, Бизнес №4, 2002.
53. Дедков Г.В., Рехвиашвили С.Ш. Нанотрубки и силовые взаимодействия в атомно-силовом микроскопе // ЖТФ. Том 69. Вып.8. 1999.
54. Рехвиашвили С.Ш. Особенности силовых взаимодействий в бесконтактном режиме атомно-силового микроскопа // Письма в ЖТФ. Том 26. Вып.12. 2000.

ГЛАВА 8. ВЫСОКОВАКУУМНАЯ КОММУТАЦИОННАЯ АППАРАТУРА

8.1. Анализ многомодульного оборудования для обработки изделий в вакууме в едином технологическом цикле

При обработке изделий в вакууме в едином технологическом цикле используется принцип шлюзования изделий на позициях загрузки и выгрузки, предусматривающий наличие двух затворов, один из которых герметизирует шлюзовую камеру на границе атмосфера–вакуум, а другой на границе вакуум–вакуум [1].

В зависимости от количества технологических модулей используется соответствующее количество затворов, являющихся важными функциональными элементами оборудования. Этот вывод подтверждается анализом структурно компоновочных схем модульного оборудования различного назначения.

На рис. 8.1.1 приведена структурно компоновочная схема сверхвысоковакуумного многомодульного комплекса. Каждый модуль выполняет отдельные технологические операции, объединённые сверхвысоковакуумной транспортной линией, которая также является самостоятельным модулем [4].

Данный способ реализации транспортирования обрабатываемых изделий (пластин) позволяет проводить параллельные операции в различных модулях и в максимальной степени предотвращает загрязнение модулей продуктами разнородных технологических процессов при обработке подложек.

Эффективность магистрально-модульной компоновки рассмотренного типа состоит также в возможности согласования по времени различных технологических операций за счет варьирования состава модулей.

Так, например, если время подготовки и анализа состава поверхности подложки в модуле предварительной подготовки сопоставимо со вре-

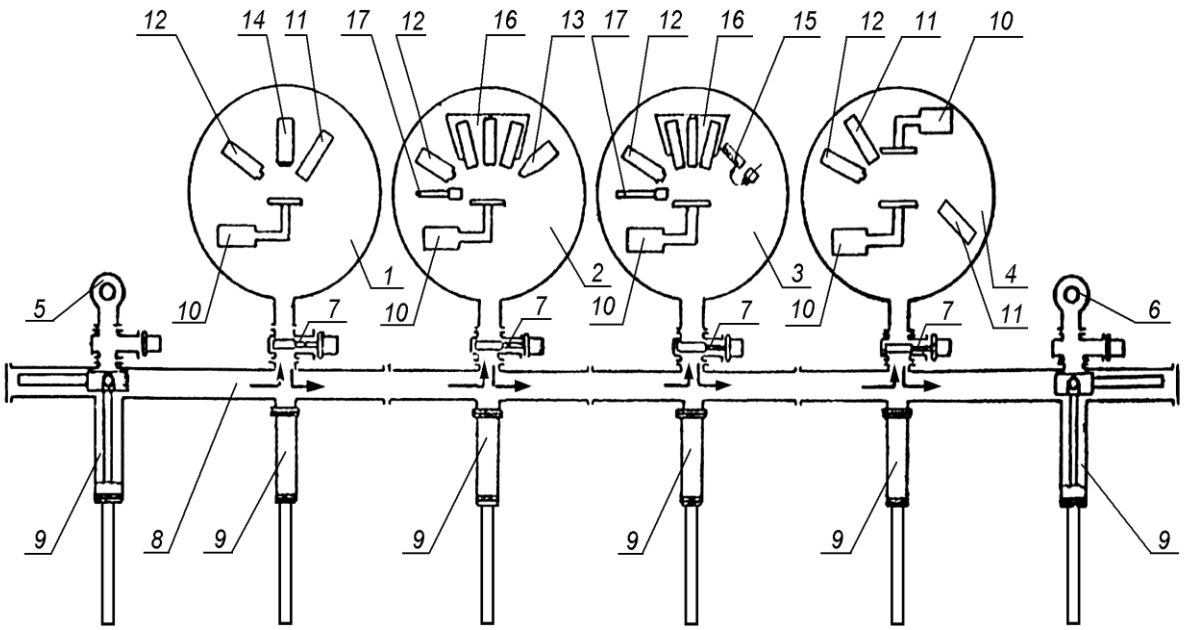


Рис. 8.1.1. Структурная схема сверхвысоковакуумного технологического комплекса:

1 – модуль подготовки подложек; 2 – модуль МЛЭ; 3 – модуль электронно-лучевого испарения; 4 – модуль электронно-лучевого осаждения; 5 – модуль загрузки; 6 – модуль выгрузки; 7 – шибер; 8 – транспортная вакуумная магистраль; 9 – манипулятор передающий; 10 – манипулятор прецизионный; 11 – источник ионов; 12 – квадрупольный фильтр масс; 13 – дифрактометр быстрых электронов; 14 – оже-анализатор; 15 – источник электронов; 16 – блок молекулярных источников; 17 – измеритель потоков

менем выращивания эпитаксиальной структуры в модуле молекулярной эпитаксии, то во избежание простоя модуля целесообразно иметь один модуль предварительной подготовки подложек и один модуль эпитаксии.

В состав комплекса входят:

1 – модуль подготовки подложек;

2 – модуль молекулярно-лучевой эпитаксии;

3,4 – модули электронно-лучевого испарения и осаждения;

5 – модуль загрузки;

6 – модуль выгрузки;

7 – затвор;

8 – транспортная магистраль;

9,10 – манипулятор;

11 – источник ионов;

12 – квадрупольный фильтр масс;

13 – дифрактометр быстрых электронов;

14 – оже-анализатор;

15 – источник электронов;

16 – блок молекулярных источников;

17 – измеритель.

Загрузочно-транспортная система с выносным вакуумным транспортёром обеспечивает многомодульный принцип построения оборудования. Каждый технологический модуль соединяется с вакуумным транспортёром посредством вакуумного затвора, разделяющего вакуумные рабочие объёмы в процессе транспортирования и передачи изделий и позволяющего проводить операции их загрузки и выгрузки параллельно с выполнением основных операций.

Для наибольшей наглядности рассмотрим коммутационную часть исполнительной аппаратуры.

Функциональное назначение затвора обуславливает предъявляемые к нему определённые эксплуатационные требования, в числе которых обязательными являются: обеспечение требуемого уплотнения, быстродействие, надёжность, отсутствие узлов, генерирующих привносимую дефектность в виде микрочастиц износа.

Однако, в рассмотренном комплексе последнее требование не удовлетворяется.

Другим примером многомодульного оборудования, требующего

применения затворов как на входном и выходном шлюзах, так и при перегрузке кремниевых пластин из автоматической вакуумно-транспортной системы в технологические модули, является линия для производства БИС, блок-схема которой приведена на рис. 8.1.2 [2]. Эта линия по своей структуре повторяет использованное в предыдущем комплексе решение.

В то же время она отличается некоторыми конструктивными особенностями. Данная линия состоит из набора унифицированных технологических модулей индивидуальной обработки пластин. Модули объединены единой герметичной вакуумной системой и изолируются между собой шлюзовыми устройствами, состоящими из автоматически действующих затворов, работа которых согласована с действиями манипулятора - перегрузчика передающего пластины с транспортёра в технологический модуль. Технологические модули используются на операциях ионного травления, нанесения резиста, экспонирования, плазмохимического травления, ионного легирования, фотонного обжига, магнетронного нанесения металлов и диэлектриков. Однотипность модулей создаёт как бы единый обменный фонд узлов и систем, значительно упрощает обслуживание линии и значительно повышает её работоспособность.

Несколько иная структура многомодульного оборудования для ионно-плазменного осаждения покрытий приведена на рис. 8.1.3 [3].

Каждая из камер, составляющих линию, имеет свою автономную вакуумную систему, а поддержание определённого уровня разрежения в камере достигается применением вакуумных затворов, которые на короткое время, необходимое для перемещения изделия из камеры в камеру, одновременно открываются (кроме первого и последнего затвора на позициях загрузки и выгрузки) и герметизируют рабочий объём каждой камеры.

В отличие от предыдущих схем, в этом оборудовании система транспортирования встроена в каждую камеру и также как и затворы является источником привносимой дефектности. Частота срабатывания затворов лимитируется временем нанесения покрытий в камерах, а длительность пребывания в открытом положении – скоростью перемещения изделия.

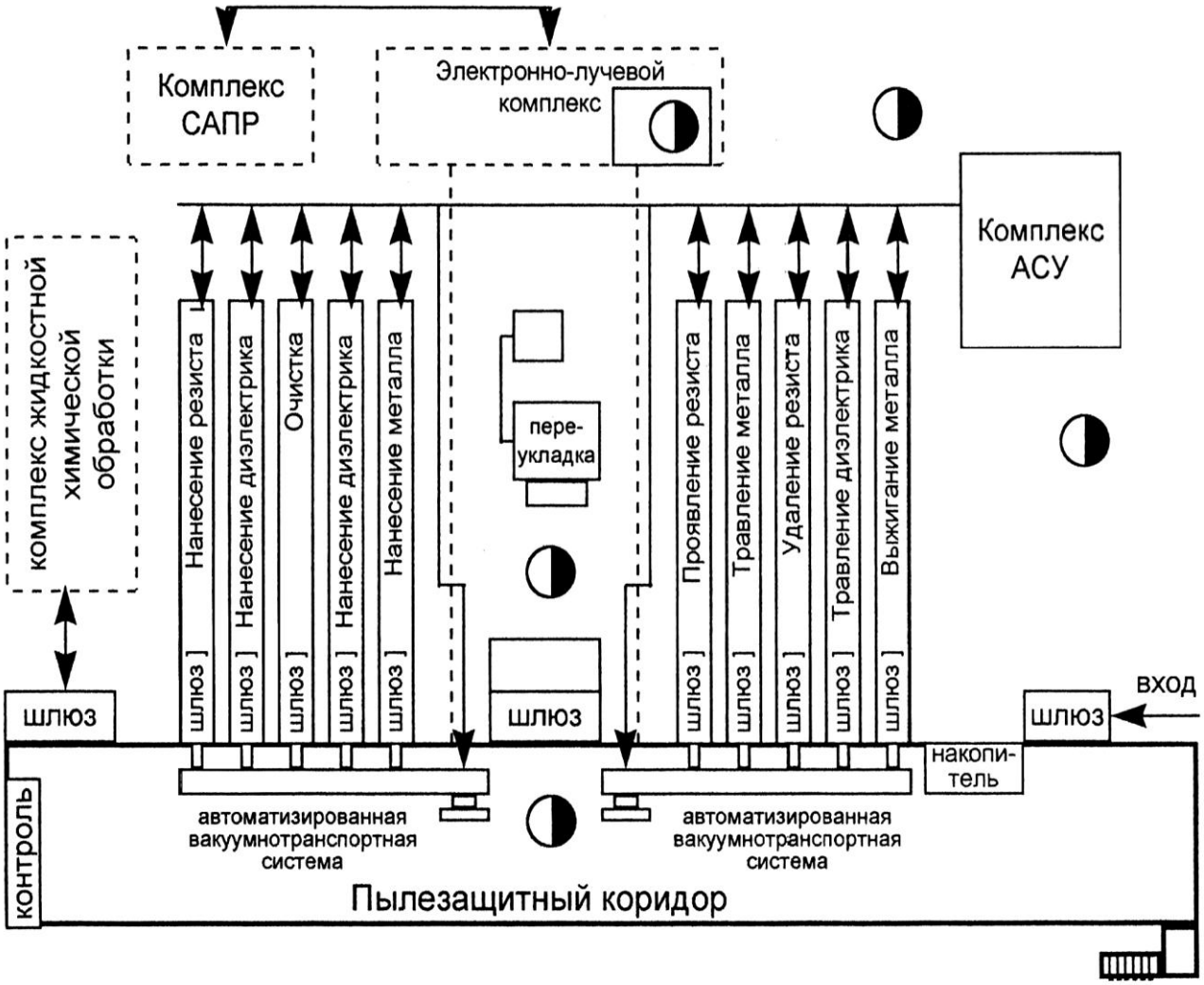


Рис. 8.1.2. Блок схема для производства БИС

Структурно-компоновочная схема многомодульной высоковакуумной установки для изготовления ЭОП (электронно-оптические преобразователи) имеет параллельно-последовательное соединение вакуумных камер между собой с помощью вакуумных затворов [30] (рис. 8.1.4).

В процессе изготовления ЭОП катодные узлы в приспособлениях - спутниках помещаются через загрузочное шлюзовое устройство 1 и камеру металлизации герметизируемых поверхностей 2 в камеру 3, где производится их обработка на восьмипозиционной карусели 4.

Параллельно в камеру герметизации 5 через загрузочно-шлюзовое устройство 6 устанавливается спутник с анодными узлами и корпусом при-

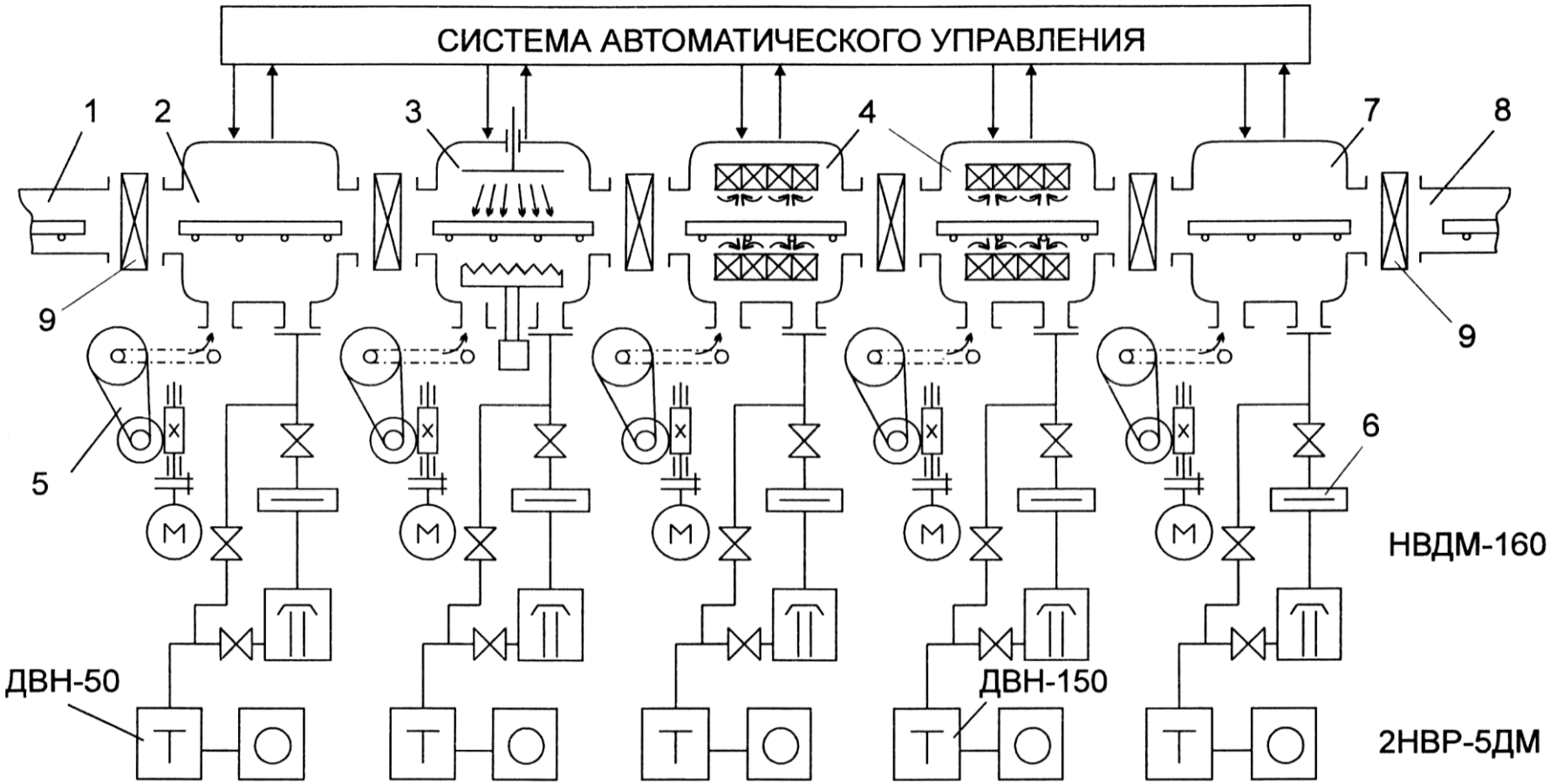


Рис. 8.1.3. Блок схема для производства БИС:
1 – загрузочное устройство; 2,7 – шлюзовые камеры; 3 – камера ионной очистки поверхности изделий; 4 – камеры ионно-плазменного осаждения покрытий; 5 – привод перемещения изделия; 6 – вакуумная система; 8 – устройство выгрузки; 9 – вакуумный затвор

боров. Узлы в каждом из спутников установлены соосно. Спутники загружаются партией на восьмипозиционную консоль камеры 5. Узлы прибора подвергаются термическому и электронному обезгаживанию а, также, другим операциям. При этом операция электронного обезгаживания выполняется параллельно на нескольких позициях. Катодные узлы передаются манипулятором через открытый затвор в камеру 8 для активировки в парах цезия.

В камере 5 обработка анодных узлов и корпусов завершается активировкой газопоглотителя, расположенного внутри корпуса. Сформированный фотокатод передаётся для дальнейшей обработки в камеру 5 манипулятором 9. Так как цикл обработки катодных узлов значительно меньше цикла обработки анодных узлов, для обеспечения непрерывности процесса производится параллельная обработка анодных узлов и корпуса в дублирующей камере герметизации 10 с определённым смещением по времени. Следующий подготовленный фото катодный узел подаётся в камеру герметизации 10 манипулятором 11. Из камеры 5 готовые приборы извлекаются через запорно-шлюзовое устройство 6 по завершении изготовления всей партии приборов.

Как видно из приведённой схемы все высоковакуумные функциональные модули соединены затворами, которые обеспечивают герметичное перекрытие технологических камер каждого модуля.

Близким по своей идее, но несколько отличающимся по структуре, является кластерное оборудование, представляющее собой интегрированные вакуумные технологические установки, в которых реализуется концепция выполнения многоступенчатого технологического процесса в едином вакуумном цикле.

Индивидуальная обработка пластины осуществляется в технологических модулях, в которые, расположенным в центральном модуле манипулятором, по заданной программе передаются пластины (рис. 8.1.5).

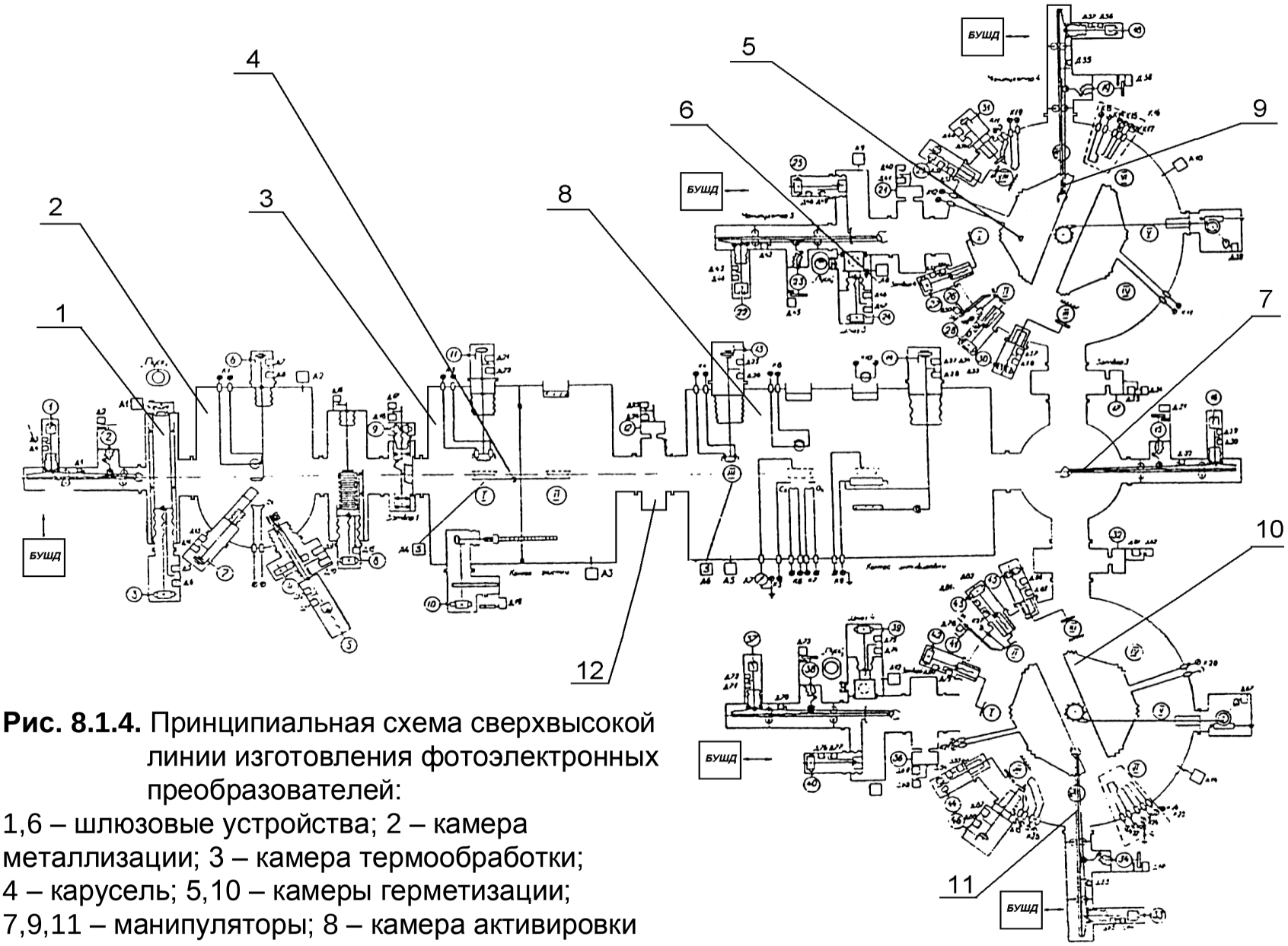


Рис. 8.1.4. Принципиальная схема сверхвысокой линии изготовления фотоэлектронных преобразователей:

1,6 – шлюзовые устройства; 2 – камера металлизации; 3 – камера термообработки; 4 – карусель; 5,10 – камеры герметизации; 7,9,11 – манипуляторы; 8 – камера активировки катодных узлов; 12 – вакуумный затвор

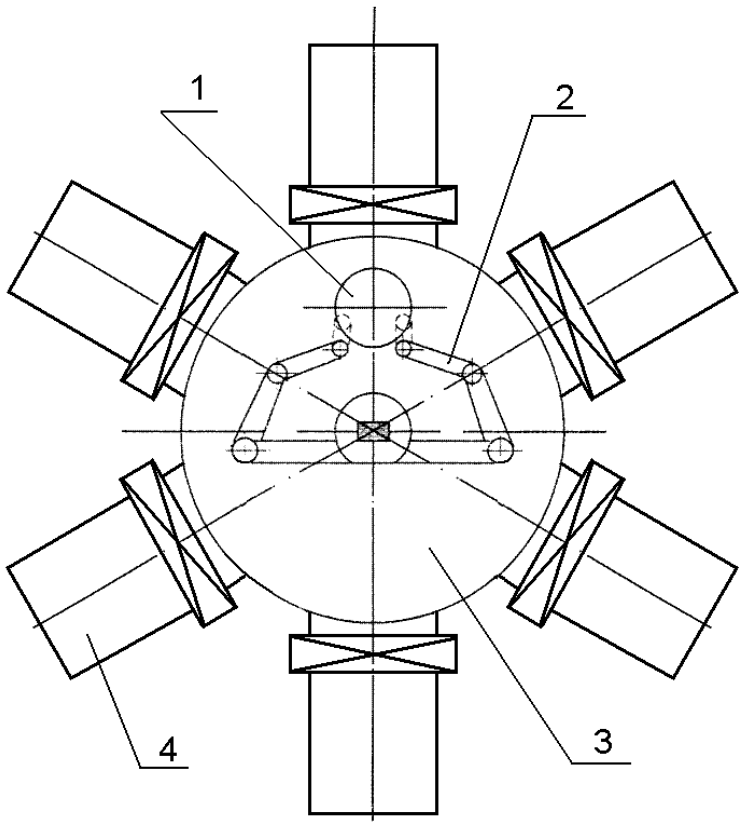


Рис. 8.1.5. Структурная схема кластерного оборудования:
1 – пластина; 2 – манипулятор; 3 – центральная камера;
4 – рабочие камеры

Низкий уровень привносимой дефектности обеспечивается не только индивидуальной откачкой каждого модуля но и герметичным разделением модулей вакуумными затворами щелевого типа [5].

Большим достоинством кластерных установок является их открытая архитектура, возможность замены и перестановки используемых модулей, что обеспечивает гибкое перестраивание системы применительно к различным технологическим процессам.

Трудно переоценить роль вакуумных затворов, разделяющих центральную и рабочие камеры. Именно они, наряду с вакуумными насосами способствуют созданию рабочей среды в технологических модулях, обеспечивая требуемую герметичность и чистоту технологической среды, свободную от привносимой дефектности. Это требует особого подхода к конструированию вакуумных затворов, и не только в приведённых здесь случаях.

Наряду с показанной классической схемой кластерного оборудования в мировой практике используются разнообразные компоновки, в которых вопросы бездефектного шлюзования изделий в рабочие камеры и их последующая герметизация в условиях малых перепадов давления является одной из важных проблем (при этом под привносимой дефектностью следует понимать совокупный фактор, то есть не только микрочастицы износа, но и газовые потоки, формируемые диффузией и десорбцией).

В настоящее время около 80% кластерных установок в микроэлектронике используется для выполнения процессов металлизации. Это связано с характерными требованиями к операциям при изготовлении методами планарной технологии. Так, например, при последовательном нанесении плёнок Ti-TiN-Al чистота поверхности не является критичным фактором после осаждения Ti .

В то же время даже небольшое загрязнение рабочей среды молекулами кислорода перед осаждением AI может привести к резкому ухудшению характеристик прибора [6]. Это позволяет прийти к выводу о необходимости создания конструкций всех входящих элементов с минимальными металлоёмкостью и поверхностями, обращёнными в вакуумный объём, а также с повышением быстродействия вспомогательных систем и устройств, связанных с передачей изделий из распределительной в рабочую камеру.

В первую очередь это относится к затворам, быстрота действия которых, естественно будет препятствовать распространению газовых потоков из камеры с большим общим и парциальным давлениями отдельных газов в камеру с меньшими давлениями (рабочую).

К выпуску оборудования кластерного типа переходят, в настоящее время, многие фирмы ведущих стран мира. При этом планируется осуществить в одной многомодульной установке весь комплекс обработки пластин.

8.2. Критерии надёжности коммутационной высоковакуумной аппаратуры в многомодульном технологическом оборудовании микроэлектроники

Тенденции развития микроэлектроники характеризуются неуклонным увеличением интеграции микросхем и, одновременно с этим, уменьшением размеров элементов. Последний фактор является критерием для установления допустимого размера и количества микро дисперсных частиц, попадающих на поверхность пластин в процессе выполнения технологических процессов.

С 1985 года этот фактор, не учитывавшийся ранее при проектировании оборудования микроэлектронного производства, стал одним из основных (рис. 8.2.1).

Статистическими наблюдениями по анализу брака микросхем установлено, что более 30% снижения выхода годных связано с загрязнениями, вносимыми при функционировании оборудования.

В прецизионной технологии микро- и наноэлектонники считаются критичными размеры микрочастиц, составляющие 0,1 от минимального размера топологического элемента схемы [7], что видно из таблицы 8.2.1. Это составляет 0,005÷0,008 мкм, при топологических размерах микросхемы 0.045-0.065 мкм. (® INTELL, Taiwan Semiconductor Manufacturing)*.

Генерация микродисперсных частиц износа распространяется со стороны функциональных устройств, расположенных внутри вакуумных камер, вакуумных затворов вводов движения, систем транспортирования подложек внутри камеры и подобных устройств.

Некоторые механизмы, в частности вакуумные затворы и передающие манипуляторы, имеют в своём составе до двух десятков узлов трения, которые в процессе работы генерируют сотни тысяч и миллионы микро-

---

* Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В. Особенности проектирования вакуумного технологического оборудования радиоэлектронной промышленности // Успехи современной радиоэлектроники №2, 2011. – С. 66-71.

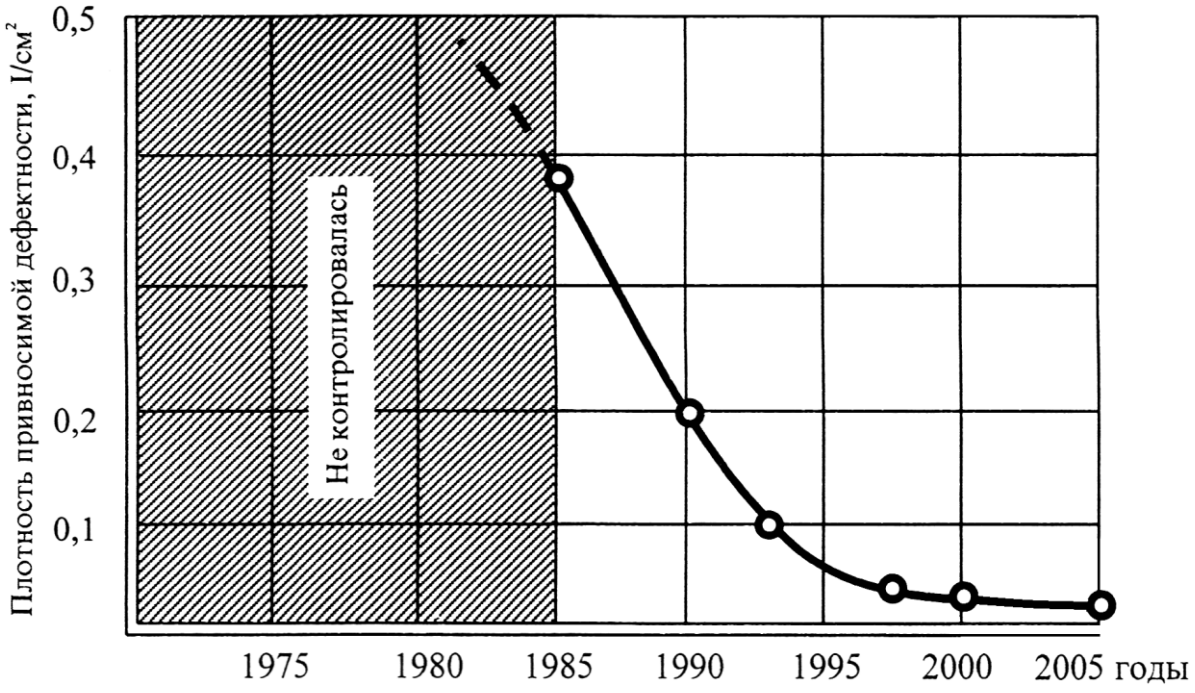


Рис. 8.2.1. Динамика требований по привносимой дефектности, предъявляемых к технологическому оборудованию

частиц износа размером до десятых долей микрометра.

При отрыве от поверхности микрочастицы, в большинстве случаев, приобретают электрический заряд, благодаря которому могут мигрировать в вакуумных объёмах и некоторые из них осаждаются на поверхность пластин.

Наглядным примером является результат исследования процесса формирования привносимой дефектности плёнок (рис. 8.2.2) [8].

Приведённая иллюстрация свидетельствует о том, что максимальный набор дозы микро дефектности возникает в шлюзовом устройстве 2 и практически сохраняется на всём протяжении вакуумного тракта установки. В дополнение к этому затворы на входе и выходе из рабочей камеры также вносят свою дозу микродефектности.

Коэффициент выхода годных для микросхем по параметру "привносимая дефектность" выражается следующей зависимостью:

$$\eta_Г = \exp\left[-D \cdot A \cdot v \cdot P(d_ч - d_{кр})\right] , \qquad (8.2.1)$$

где D – доза привносимой дефектности, шт./см^2;

Таблица 8.2.1

Минимальные размеры топологии микросхем и соответствующие им критические размеры микрочастиц загрязнения (указаны в мкм) [31]

Фирма	Разрешение (по поверхности/эффективное)		Критический размер микрочастиц	
	2000 г.	**2015 г.**	**2000 г.**	**2015 г.**
FUJITSU	0.25/0.18; 0.35/0.28; 0.5/0.45	0.060	0.022; 0.032; 0.048	0.007
HITACHI	0.18/0.15; 0.2/0.18; 0.35/0.28; 0.4/0.35	0.065	0.016; 0.019; 0.032; 0.038	0.006
LG SEMICON	0.4/0.3	0.12	0.038	0.010
National Semiconductor	0.22/0.18	0.1	0.02	0.010
SIEMENS	0.25/0.22; 0.35/0.25; 0.5/0.3	0.1	0.023; 0.035; 0.05	0.009
Taiwan Semiconductor Manufacturing (TSMC)		0.080; 0.065		0.010; 0.008
Texas Instrument	0.23/0.18; 0.32/0.22 0.42/0.35	0.080	0.02	0.008
® INTELL		0.045		0.005

A – площадь кристалла, см^2;

ν – доля площади микрокристалла, занятая микроструктурами;

$P(d_ч - d_{кр})$ – доля попавших на кристалл микрочастиц с размером $d_ч$ большим $d_{кр}$;

$d_ч$ и $d_{кр}$ – средний и критический размеры микрочастиц.

Отсюда выражение для дозы привносимой дефектности имеет вид:

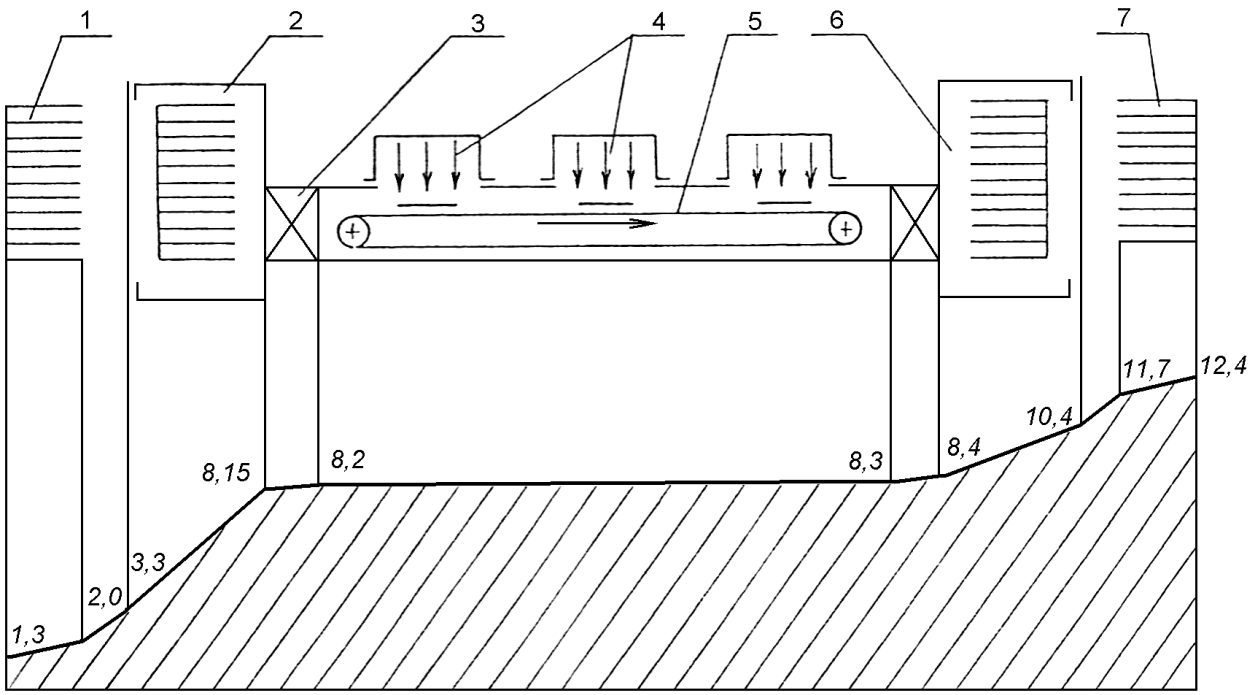


Рис. 8.2.2. Исследование процесса формирования привносимой дефектности в оборудовании термического осаждения пленок:

1 – загрузочное устройство; 2,6 – шлюзовые устройства; 3 – затвор; 4 – позиции осаждения покрытий; 5 – транспортная система; 7 – устройство выгрузки изделий

$$[D] = \frac{\ln\left(\dfrac{1}{\eta_Г}\right)}{A \cdot v \cdot \exp\left(\dfrac{d_{кр}}{d_4}\right)} . \qquad (8.2.2)$$

В суммарном потоке привносимой дефектности немалая доля принадлежит вакуумным затворам, которые, как известно, содержат собственные вводы движения и пары трения в подвижных элементах переноса уплотнительного узла и устройства формирующего усилие уплотнения.

Как было показано в разделе 8.1, количество затворов в некоторых видах многомодульного оборудования высоких вакуумных технологий лежит в пределе от нескольких единиц до нескольких десятков и, соответственно их количеству, увеличивается привносимая дефектность.

Другим важным фактором, способным дестабилизировать технологические условия обработки пластин, является формирование "паразитных" газовых потоков, распространяющихся не только из очагов трения, но и из конструкционных материалов в результате диффузии и десорбции, стимулируемых различными технологическими факторами: электронным, ионным и фотонным излучением, термическими внешними воздействиями и т.п.

В то же время ряд технологических процессов ионно-лучевой, плазмохимической и некоторых других технологий требуют строго регламентированного состава остаточной газовой среды.

В работе [9] показано, что дестабилизация вакуумной среды в результате формирования газовых потоков приводит к снижению надёжности оборудования вплоть до невозможности получения выхода годных изделий. Для этого случая вероятность безотказной работы оборудования $P(t)$ представлена следующим выражением:

$$P(t) = \prod_{i=1}^{k} P_i(t)\Phi\left[Q(t) - Q_{\text{доп}}\right], \qquad (8.2.3)$$

где $P_i(t)$ – вероятность безотказной работы i-го функционального устройства;

k – количество функциональных устройств рассматриваемого типа в составе оборудования;

$Q(t)$ – текущее значение газового потока, выделяющегося со стороны функциональных устройств в процессе работы оборудования;

$Q_{\text{доп}}$ – допустимое значение газового потока.

Очевидно, что если множитель $\Phi[Q(t) - Q_{\text{доп}}]$ при $Q(t) \geq Q_{\text{доп}}$ приобретает нулевое значение, то $P(t)$ также станет равным нулю.

Таким образом:

$$\Phi\left[Q(t) - Q_{\text{доп}}\right] = \begin{cases} 1, Q(t) \leq Q_{\text{доп}} \Leftrightarrow t \leq \overline{t} \\ 0, Q(t) > Q_{\text{доп}} \Leftrightarrow t > \overline{t} \end{cases} \qquad (8.2.4)$$

где t – текущее значение времени;

$\bar{t}$ – критическое значение времени.

На рис. 8.2.3 показана кинетика газовыделения водорода из очага трения пары 38ХМЮА - 38ХМЮА от нормальной нагрузки в контакте и различных скоростей скольжения.

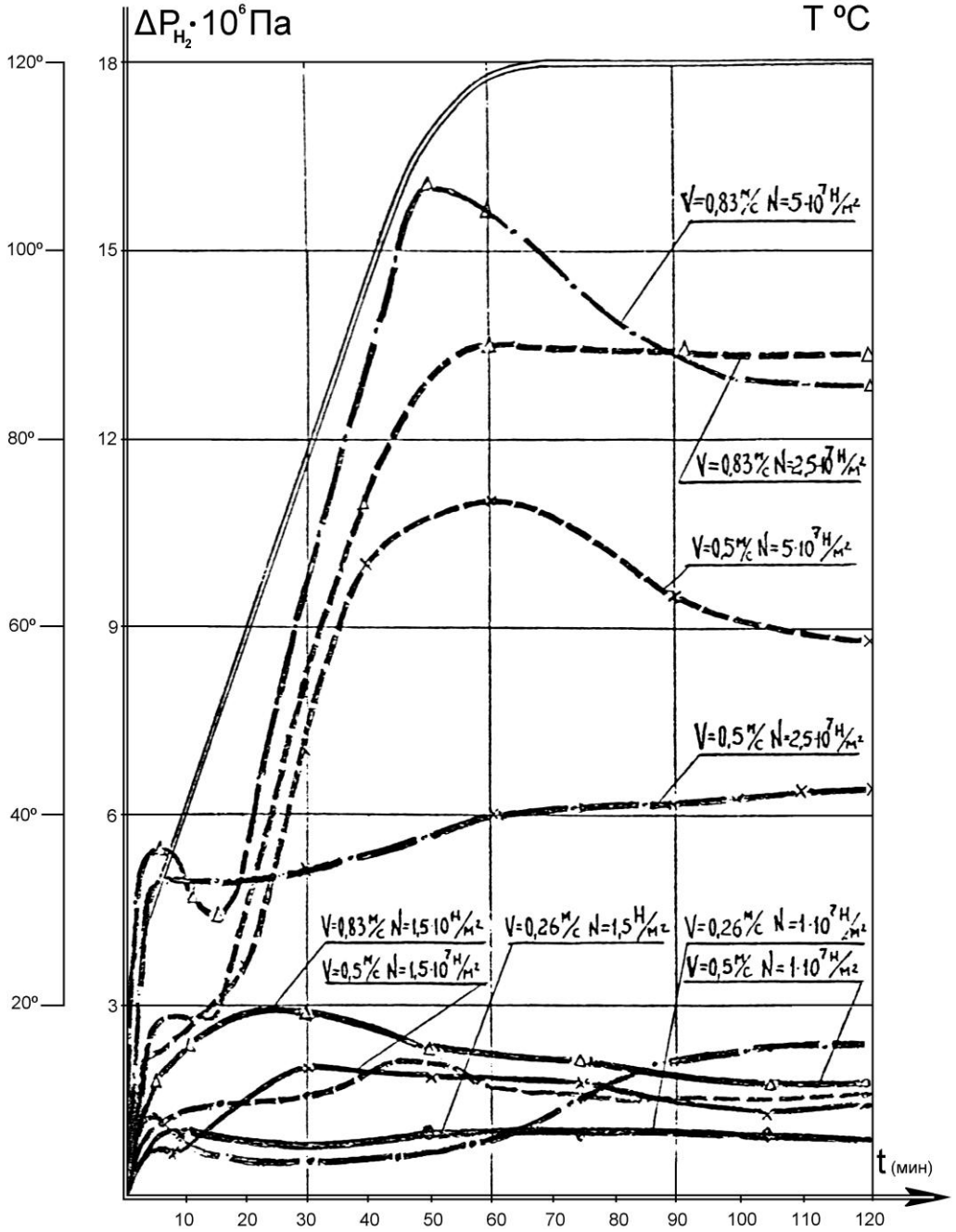


Рис. 8.2.3. Кинетика газовыделения водорода из очага трения пары 38ХМЮА–38ХМЮА от нормальной нагрузки в контакте и скорости относительного скольжения

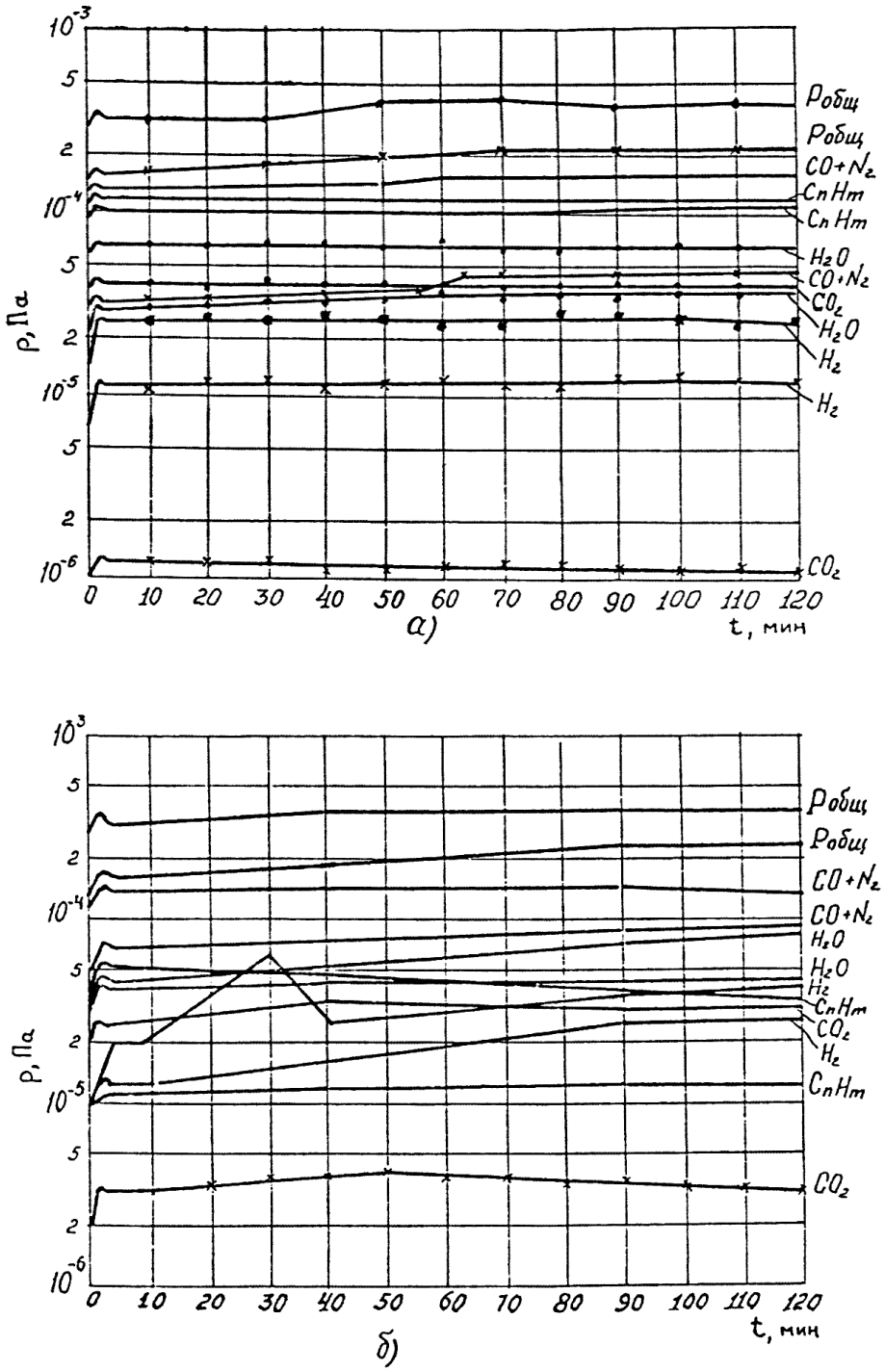


Рис. 8.2.4. Графики приращения парциальных давлений активных составляющих суммарного газового потока при работе пары 38ХМЮА–38ХМЮА в вакууме в течение 2-х часов: **а)** T=2930K; **б)** T=5730K; V=0,26 м/с

Любопытны также данные, полученные в работе [10] по характеру приращения парциальных давлений активных составляющих суммарного газового потока в том числе H_2, CO_2, H_2O, CO, N_2, C_nH_m при работе той

же, что и в предыдущем случае, пары трения в течении двух часов (рис. 8.2.4,а,б).

Приведённые графики соответствуют удельной нагрузке, равной $5 \cdot 10^7$ Н/м^2 и скорости скольжения $v = 0{,}26$ м/с при температурах $T = 293$ ^{0}К и $T = 373$ ^{0}К.

Отсюда следует вывод о необходимости особого подхода к конструированию оборудования и его элементов в направлении снижения металлоёмкости функциональных устройств и систем, предельно возможного уменьшения площадей поверхностей, обращённых в вакуумный объём и уменьшения до минимума или полного исключения пар трения.

Вакуумные клапаны и затворы традиционного исполнения удовлетворяют этим требованиям далеко не полностью, о чём свидетельствует анализ многочисленные отечественных и зарубежных публикаций.

8.3. Современный уровень развития коммутационной вакуумной аппаратуры

Одним из важнейших функциональных элементов вакуумных систем оборудования высоких технологий, предназначенных для герметичного перекрытия газовых потоков, являются вакуумные клапаны и затворы.

Несмотря на кажущуюся простоту выполняемых функций, создание вакуумной коммутационной аппаратуры, отвечающей современным требованиям микроэлектронного производства, является серьёзной научно-технической задачей, требующей решения сложных теоретических, конструкционных, технологических и материаловедческих проблем.

Они возникают в процессе новых разработок оборудования, совершенствования конструкций существующей вакуумной коммутационной аппаратуры, оптимизации ее параметров при появлении новых требований, предъявляемых к динамично развивающимся в мире вакуумным технологиям.

Основными направлениями совершенствования и создания новой

вакуумной коммутационной аппаратуры являются:

– обеспечение надёжности и улучшения эксплуатационных характеристик клапанов и затворов;
– использование в качестве уплотнительных материалов термостойких эластомеров и решение гарантированной герметизации вакуумных объёмов в области сверхвысокого вакуума, вплоть до 10^{-7} Па;
– создание облегчённых конструкций клапанов и затворов для герметизации объёмов в области высокого вакуума с перепадами давления на 2÷3 порядка;
– улучшение эксплуатационных характеристик по проводимости, быстродействию, энергопотреблению, ресурсу;
– возможность обезгаживающего прогрева;
– минимальный поток собственного газовыделения;
– отсутствие привносимой дефектности, поступающей в герметизируемый объём оборудования.

Следует отметить, что ранее разработанные вакуумные клапаны и затворы непрерывно модернизируются.

На рис. 8.3.1 приведены графики, отражающие тенденции изменения в период 1960÷2000 годов основных показателей надёжности вакуумной коммутационной аппаратуры (N циклов) и усреднённого значения удельной массы (m), рассматривающейся по следующей зависимости:

$$m = \sum_{k=1}^{n} \frac{M_k}{n \cdot D_y} \ , \qquad (8.3.1)$$

где: $M_к$ – масса единицы каждого вида арматуры, кг;

n – количество видов арматуры;

D_y – средний диаметр условного прохода, мм.

Снижение удельной массы в указанной триаде было достигнуто за счёт применения новых материалов и методов формообразования а также конструктивными средствами.

Повышение надёжности осуществлялось благодаря реализации ряда оригинальных конструктивных решений и уменьшения общего количества элементов, являющихся потенциальными источниками отказов, а также в результате использования новых уплотнителей.

Рис. 8.3.2, например, иллюстрирует, начиная с 1960 года, тенденцию непрерывного уменьшения потребляемой мощности вакуумных затворов, типа 23ВЭ, достигнутого благодаря совершенствованию конструкции, уменьшению массы подвижных элементов и реализации новых конструкторских решений [11].

Необходимо отметить, что используемая в настоящее время отечественная высоковакуумная коммутационная аппаратура, которая применяется для герметизации вакуумных объёмов на границе атмосфера - высокий вакуум, что накладывает чёткие требования на уровень усилий уплотнения и вызывает необходимость создания конструкции, способной воспринять реакцию возникающих в уплотнении усилий, в связи с этим довольна металлоёмка.

В данном обзоре рассматриваются клапаны и затворы, позволяющие осуществлять дистанционное программное управление.

Отечественная промышленность выпускает клапаны с электромагнитным, электромеханическим, и электропневматическим приводом. Не останавливаясь подробно на каждом из них следует остановиться на характеристиках двух типов клапанов – электропневматическом и электромеханическом.

Электропневматические клапаны получили широкое распространение в отечественной и зарубежной практике. Они, как правило, просты в конструктивном отношении, имеют малые габаритные размеры, надёжны в эксплуатации, работают под давлением 0,4 ÷ 0,6 МПа.

Недостатком клапанов данного типа является невозможность прогрева. Конструкция электропневматического клапана типа КПУ представлена на рис. 8.3.3,а и внешний вид на рис. 8.3.3,б.

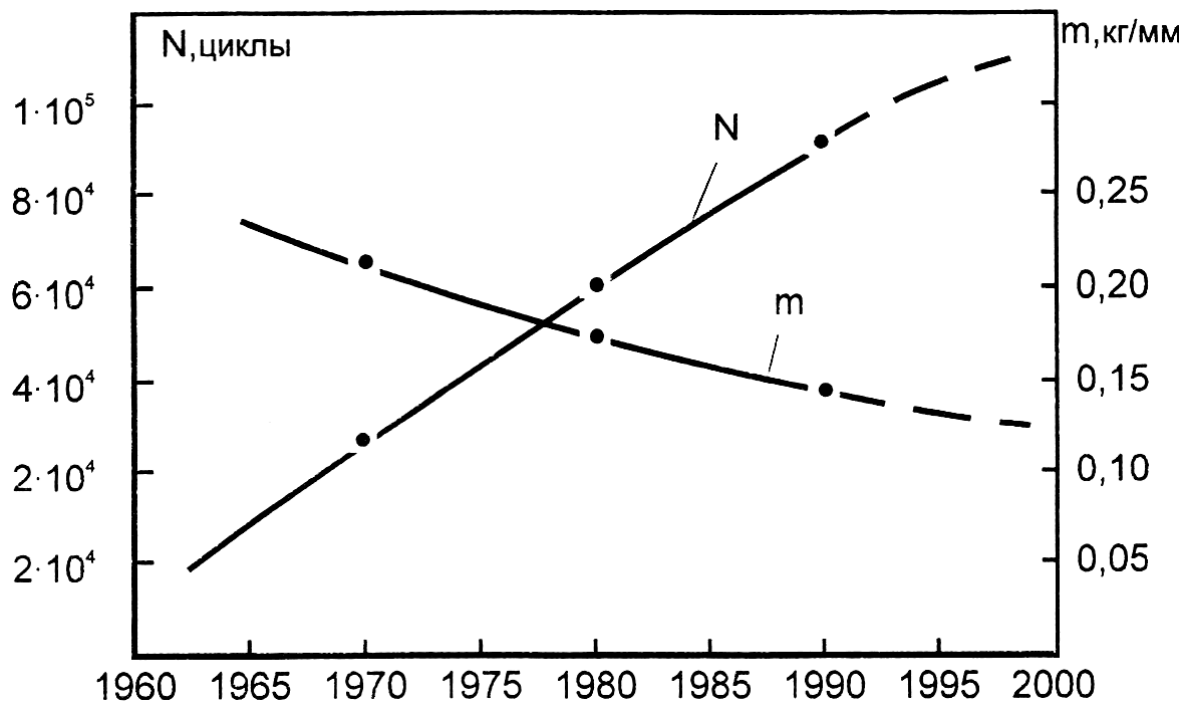


Рис. 8.3.1. Тенденции изменения показателей вакуумной арматуры

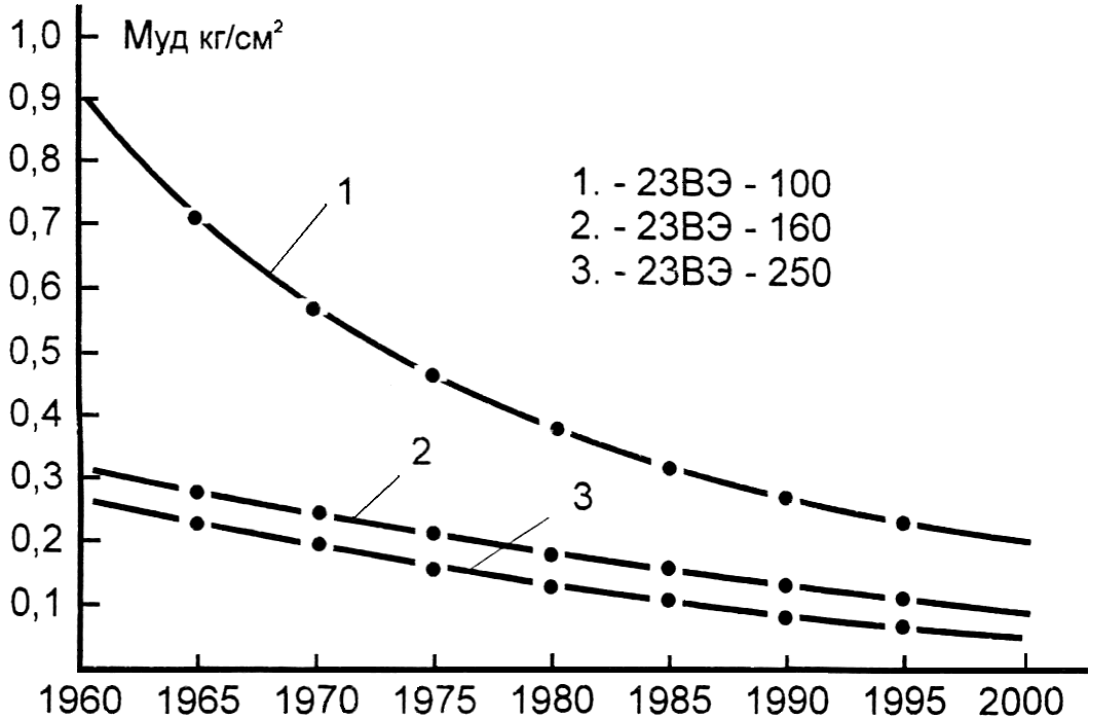


Рис. 8.3.2. Тенденция уменьшения потребляемой мощности вакуумных затворов типа 23ВЭ

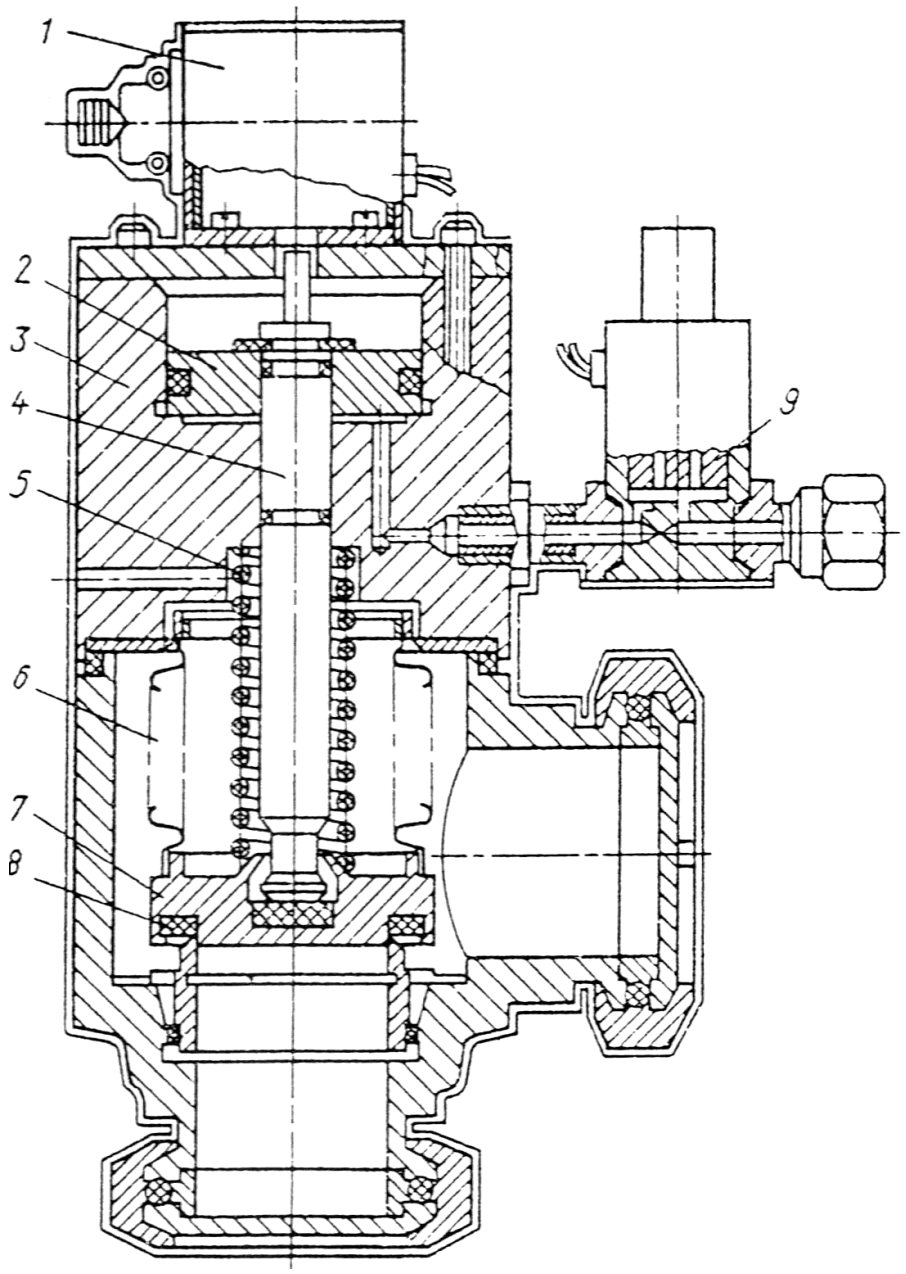
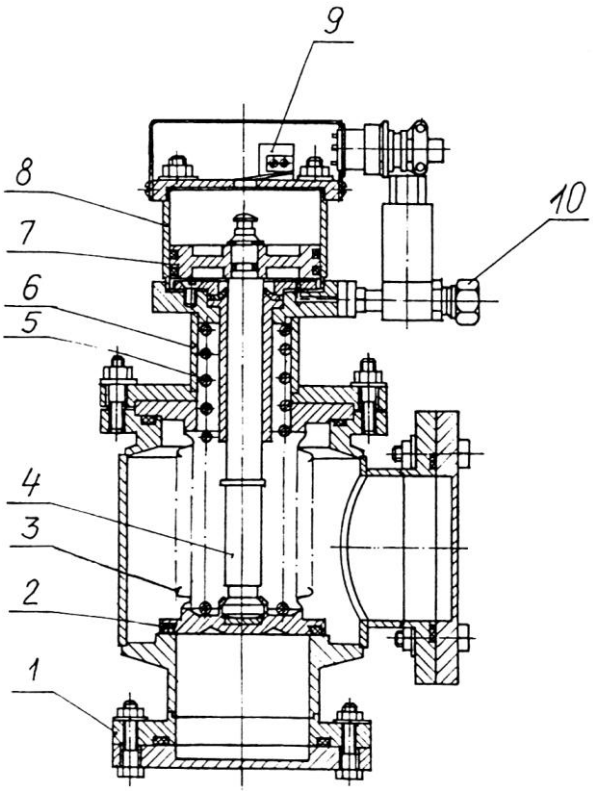


Рис. 8.3.3,а. Вакуумный электропневматический клапан типа КПУ: 1 – конечный выключатель; 2 – поршень; 3 – пневмоцилиндр; 4 – шток; 5 – пружина; 6 – сильфон; 7 – диск; 8 – уплотнитель; 9 – электромагнитное золотниковое устройство

Рис. 8.3.3,б. Внешний вид вакуумного электропневматического клапана типа КПУ



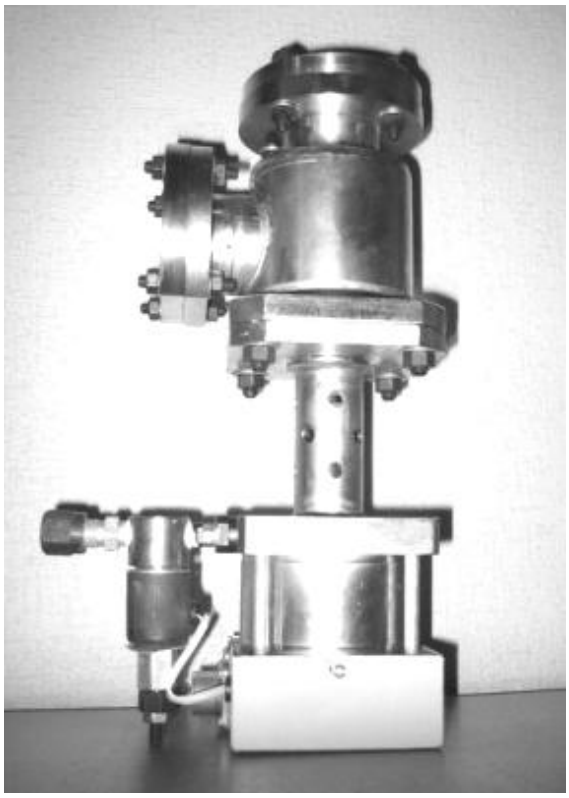


Рис. 8.3.4. Вакуумный электропневматический клапан типа КПУТ

Корпус клапана литой из алюминиевого сплава АЛ-9. В качестве уплотнителя используется вакуумная резина, марка которой может меняться в зависимости от заданных требований.

Другой разновидностью электропневматических клапанов являются клапаны типа КПУТ (клапаны пневматические условно термостойкие) (рис. 8.3.4). В клапанах этого типа в отличие от предыдущей конструкции в качестве уплотнения используется термостойкая резина ТКР, допускающая прогрев до 300^0 С. Основные элементы клапана: 1– корпус; 2 – уплотнитель; 3 – сильфон; 4 – шток; 5 – пружина; 6 – втулка; 7 – поршень; 8 – пневмоцилиндр; 9 – микропереключатель; 10 – электромагнитный клапан.

Клапаны КПУТ являются также химостойкими по отношению к фтор и хлорсодержащим газам.

Технические параметры электропневматических клапанов приведены в таблице 8.3.1.

В отечественной практике, в отличие от зарубежной, широко распространена вакуумная запорная коммутационная аппаратура с электромеханическим приводом. Например, серийные клапаны типа КЭУН, разработанные в МИЭМ (Московский институт электронного машиностроения) [12] (рис. 8.3.5,а,б).

Технические параметры клапанов приведены в таблице 8.3.2.

Особенностью клапанов этого типа является переменная структура, состоящая в том, что на больших перемещениях при закрытии или открытии проходных отверстий с целью ускорения быстроты срабатывания осуществляется быстрое перемещение уплотнительного узла при передаточном числе, равном 1.

На малых перемещениях при герметизации уплотнительной пары, для выигрыша в силе, используется механизм с возможно меньшим передаточным отношением.

В зависимости от назначения, в отечественной практике применяют высоковакуумные прогреваемые и сверхвысоковакуумные непрогреваемые

клапаны и затворы.

В настоящее время в Российской Федерации получили распространение два типа затворов: маятникового типа и шиберные с прямоугольным корпусом.

В затворах маятникового типа 23ВЭ* и шиберных затворах 3ЭПШ используется электромеханический привод, а в затворах 3ППШ и 3ППШТ

Таблица 8.3.1

Клапаны с электропневматическим приводом

Параметры		Тип клапана					
		КПУ-25Л	КПУ-40Л	КПУ-63Л	КПУТ-40	КПУТ-63	КПУТ-100
Диаметр условного прохода D_y, мм		25	40	63	40	63	100
Проводимость, 10^{-3} м^3/с		15	30	45	40,5	97	302
Быстродействие, с.		0,2	0,3	0,5	0,3	0,4	0,6
Потребляемая мощность, Вт		7,2					
Допустимый поток натекания Q, м^{3}Па/с		$5\cdot10^{-9}$			$6\cdot10^{-11}$		
Напряжение питания золотника, В		24					
Ресурс, N циклов		10^5			$2\cdot10^5$		
Диапазон рабочих давлений, Па		$10^{-5} \div 10^{-6}$					
Габаритные размеры, мм.	длина	170	195	240	140	175	200
	ширина	75	90	135	90	134	170
	высота	210	260	355	270	290	100
Масса, кг		2,2	3,6	7,6	5,2	8,2	9,5

* Выпускается ОАО «ВАКУУММАШ» г. Казань
http://vacma.ru/documents/catalogue/valves/zve/2zve.pdf (на 01.09.2012)

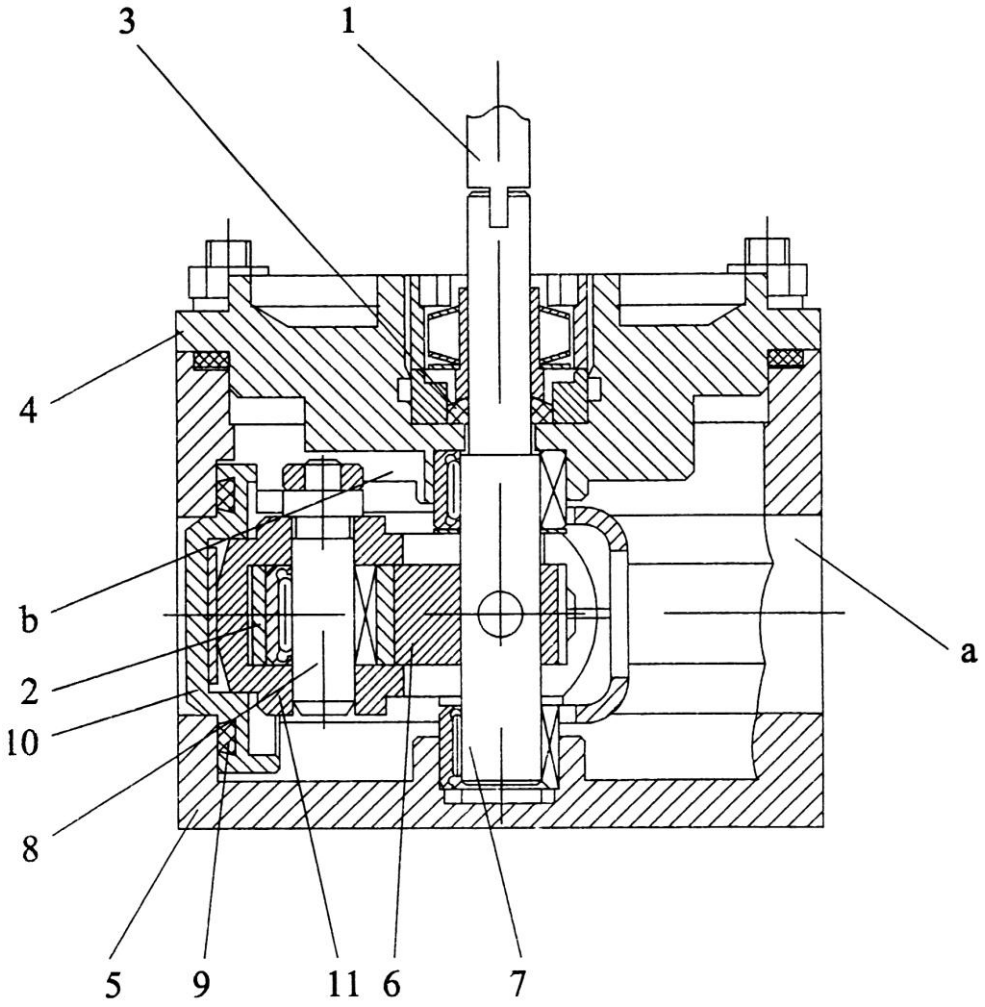


Рис. 8.3.5,а. Электромеханический клапан типа КЭУН: 1 – электродвигатель; 2 – серьга; 3 – ось; 4 – крышка; 5 – корпус; 6 – кулачок; 7 – ось; 8 – штырь; 9 – уплотняемая поверхность; 10 – диск; 11 – ролик; 12 – вал; а – проходное отверстие; б – паз

– электропневматический [12] (рис. 8.3.6).

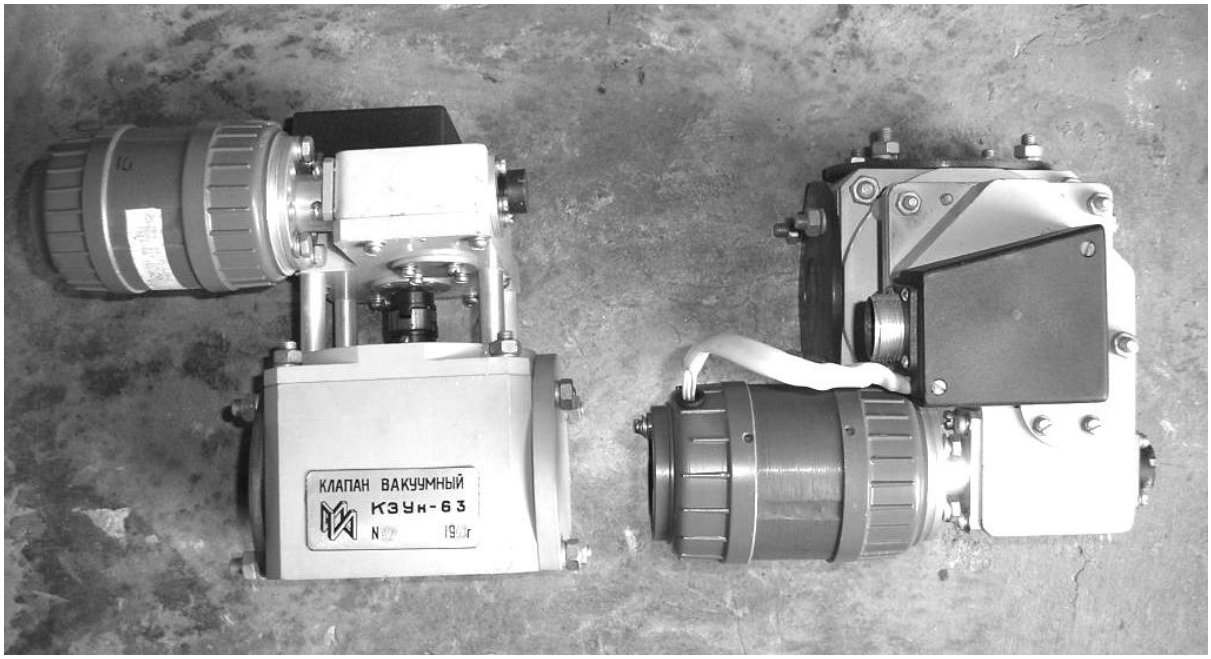
Технические характеристики затворов 3ППШ и 3ППШТ приведены в таблице 8.3.3.

Затворы 3ВЭ маятникового типа (рис. 8.3.7) общепромышленного применения получили широкое распространение в России и странах СНГ.

Технические характеристики затворов приведены в таблице 8.3.4.

По сравнению с угловыми затворами, выпускаемыми ранее, плоские прямопролётные затворы рассматриваемых типов обладают примерно в два

Клапан КЭУн-25



Клапан КЭУн-63

Рис. 8.3.5,б. Электромеханический клапан типа КЭУН: внешний вид

Таблица 8.3.2

Электромеханические клапаны типа КЭУН

Параметры		Тип клапана		
		КЭУН-25	КЗУН-40	КЭУН-63
Диаметр условного прохода $\underline{\mathbf{D_y}}$, мм.		25	40	63
Проводимость $\boldsymbol{U}$, 10^{-3} м^3/с.		20	70	190
Быстродействие, с.		5	5	10
Потребляемая мощность, Вт.		—	—	—
Допустимый поток натекания $\boldsymbol{Q}$, м^3 Па/с.		10^{-4}		
Средний ресурс, $\boldsymbol{N}$ циклов		$2 \cdot 10^4$		
Диапазон рабочих давлений, Па.		$10^5 \div 10^{-5}$		
Габаритные размеры, мм.	длина	124	127	190
	ширина	112	112	225
	высота	181	186	200
Масса, кг.		2,3	2,4	7,5

раза большей проводимостью и меньшей массой.

Они применяются в вакуумном оборудовании, в котором предусматривается последовательная обработка изделий без соприкосновения с атмосферой. Однако их недостатком является привносимая дефектность, благодаря наличию узлов трения.

В последнее время появилась необходимость создания затворов щелевого типа для перекрытия рабочих и перегрузочных камер в многомодульном оборудовании высоких технологий.

Щелеобразное отверстие обусловлено видом транспортируемого изделия – полупроводниковой пластины.

Таблица 8.3.3

Затворы шиберного типа

Параметры		Тип затвора						
		ЗЭПШТ-100	ЗЭПШТ-160	ЗЭПШТ-250	ЗЭПШТ-400	ЗППШТ-160	ЗППШТ-200	ЗППШТ-250
Диаметр условного прохода, $\boldsymbol{D}_{\text{у}}$, мм.		100	160	250	400	160	200	250
Проводимость, $\boldsymbol{U}$, 10^{-3} м^3/с		1,6	4,0	16	40	2,6	10	16
Мощность, электродвигателя, Вт.		25	40	40	90	—	—	—
Быстродействие, с.		< 4 С.						
Допустимый поток натекания $\boldsymbol{Q}$, м^{3}Па/с		$6 \cdot 10^{-11}$						
Средний ресурс, циклы		$5 \cdot 10^5$						
Средняя наработка на отказ, циклы		10^4						
Диапазон рабочего давления, Па.		$10^5 \div 10^{-6}$						
Температура нагрева, ^{0}С		300	300	300	70	300	300	300
Габариты, мм.	длина	345	440	582	967	445	500	575
	ширина	180	250	360	364	255	318	360
	Высота	230	245	270	518	205	205	265
Масса, кг.		15	25	43	100	11	32	41

Таблица 8.3.4

Затворы маятникового типа с электромеханическим приводом

Параметры		Тип затвора			
		22ВЭ-100	23ВЭ-180	23ВЭ-250	23ВЭ-400
Диаметр условного прохода, $\boldsymbol{D}_{\text{у}}$, мм.		100	160	250	400
Проводимость, $м^3/с$.		1,3	3,3	13,4	42,6
Быстродействие, с.		3	4	9	20
Допустимая величина натекания, $м^3Па/с$		10^{-7}			
Средний ресурс, ***N*** циклов		10^5		$2{,}5 \cdot 10^4$	
Диапазон рабочих давлений, Па.		$10^5 \div 10^{-5}$			
Потребляемая мощность при закрытии, открытии, Вт.		63	100	200	200
Габаритные размеры, мм.	длина	630	720	780	1070
	ширина	290	370	510	750
	высота	100	100	140	160
Масса, кг.		17	24	46	110

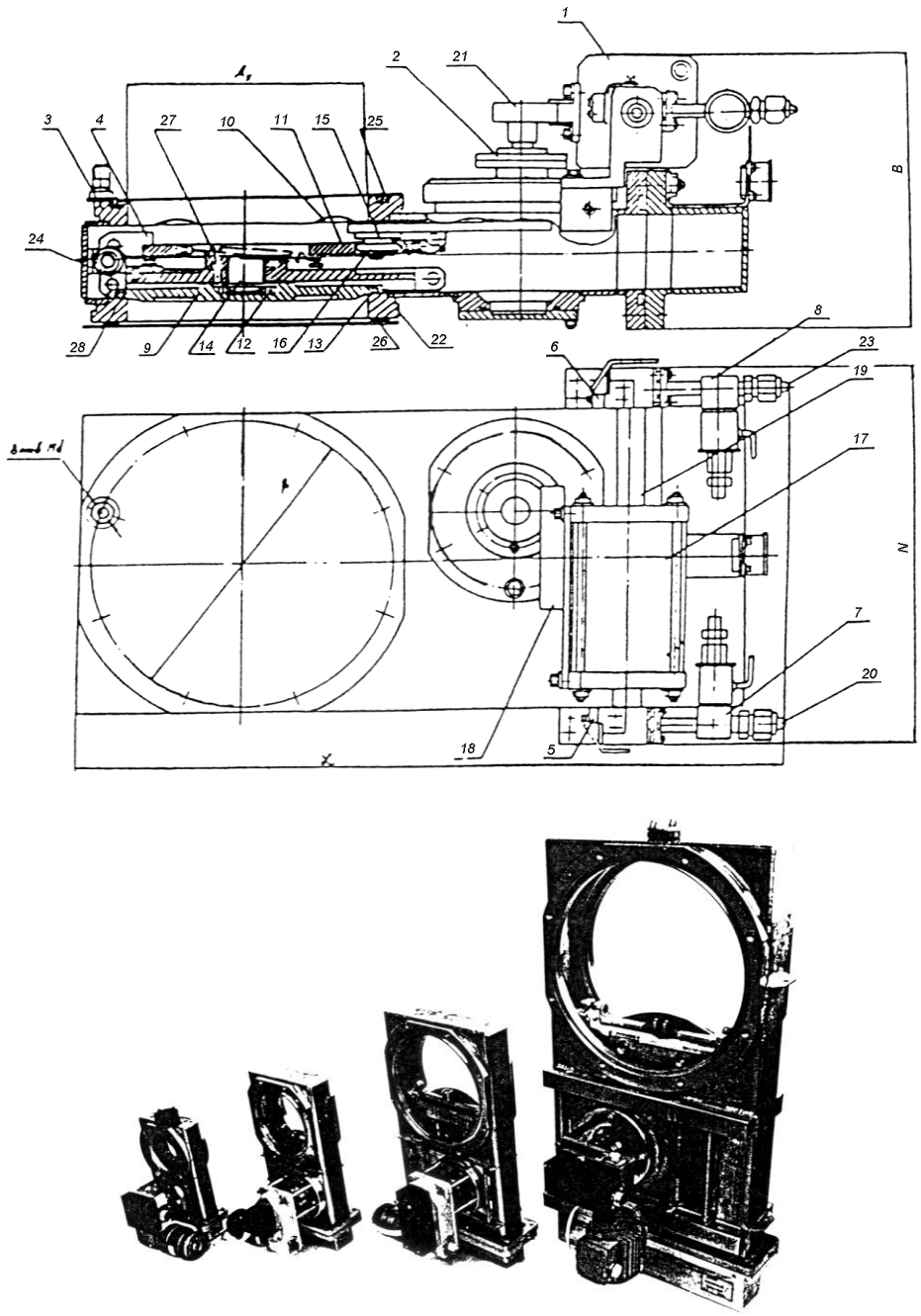


Рис. 8.3.6. Серия затворов типа ЗППШТ с электропневматическим приводом: 1 – пнвмопривод; 2 – ввод движения; 3, 22 – фланцы присоединительные; 4 – каретка; 5, 6 – микропереключатели; 7, 8 – клапаны электромагнитные; 9 – заслонка; 10 – ролик; 11 – основание верхнее; 12 – основание нижнее; 13 – уплотнитель; 14, 24 – упоры; 15 – рычаг; 16 – ролик; 17 – пневмоцилиндр; 18 – рейка зубчатая; 19 – шток с поршнем; 20, 23 – штуцеры; 21 – бобышка; 25, 26 – заглушки; 27 – пружина; 28 – вилка с роликом

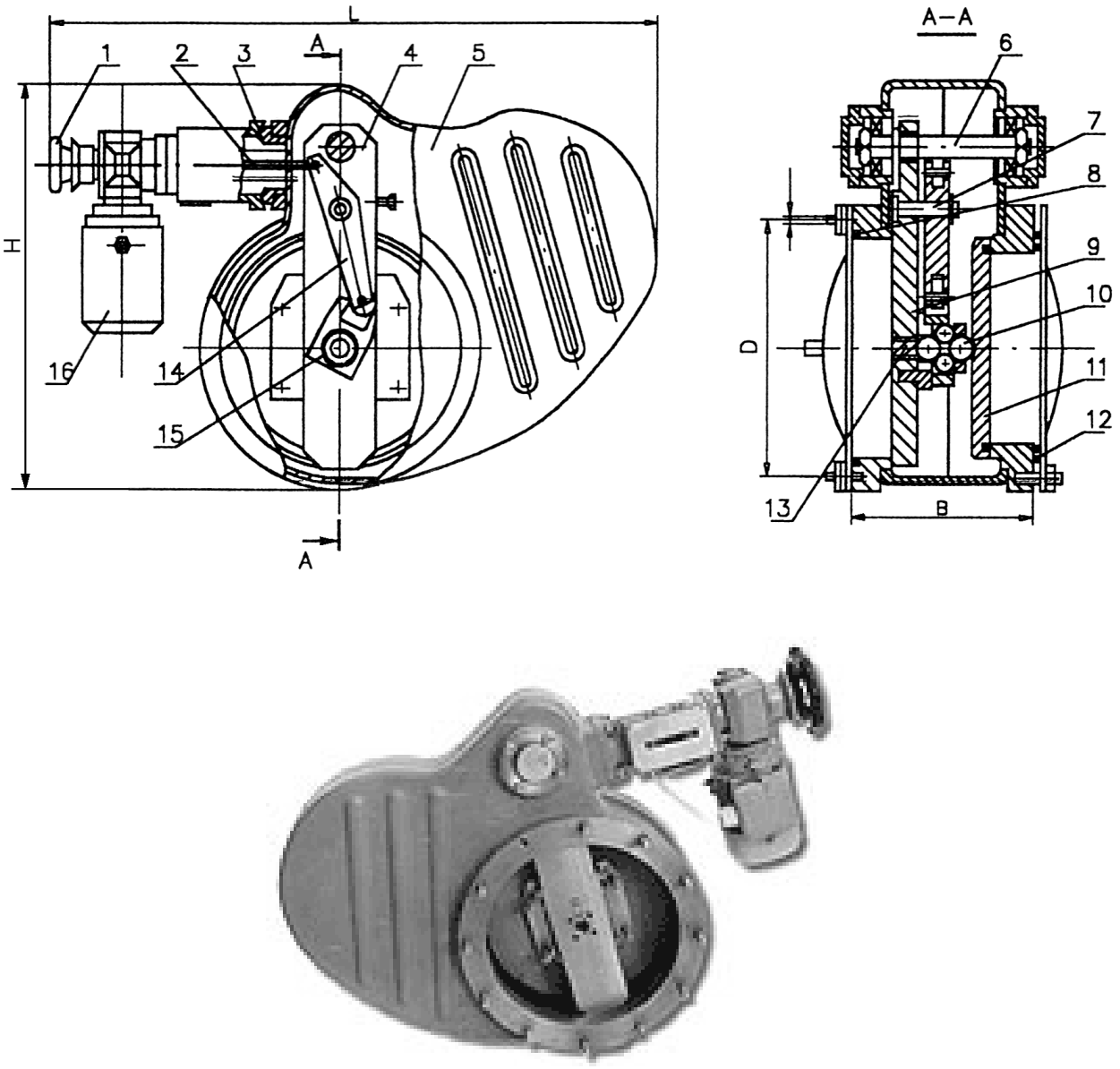


Рис. 8.3.7. Затворы маятникового типа серии 23ВЭ:
1 – привод настройки; 2 – приводной шток; 3 – сильфонный ввод; 4,14 – рычаг; 5 – корпус; 6,7 –- ось; 10 – шарики; 11 – уплотняющий диск; 8,12 – уплотнитель; 13 – регулировочный винт; 15 – шариковый замок; 16 – электродвигатель

Для установки молекулярно-лучевой эпитаксии типа "Обь" в работе [13] сообщается о создании щелевого затвора с отверстием 30×125 мм для герметичного перекрытия двух высоковакуумных камер. При сравнитель-

но небольшом отверстии клапан обладает массой 15 кг.

Щелевой вакуумный затвор с электропневматическим приводом, приведённый на рис. 8.3.8, предназначен для перекрытия шлюзовой и рабочей камеры кластерного высоковакуумного оборудования. Он выгодно отличается от рассмотренных затворов оригинальностью и простотой конструкции уплотнительного узла.

В то же время затвор этого типа не лишен недостатков, присущих всем известным отечественным и зарубежным конструкциям. Он характеризуется достаточно большой металлоёмкостью (масса 24 кг) и наличием узлов трения в опорах оси системы поворота уплотнительного узла.

Ведущими зарубежными фирмами в области создания и выпуска вакуумной арматуры являются фирмы: VAT (Швейцария), Alkatel (Франция), KATO (Япония), Edvards (Англия)*, Balzers (Лихтенштейн), Leybold (Германия), Varian (США), и другие [14÷18].

Наибольших успехов в направлении создания новых видов вакуумных клапанов и затворов достигла фирма VAT, в связи с чем следует наиболее подробно остановиться на результатах, достигнутых этой фирмой.

Фирма выпускает затворы двух типов: затворы для высокого вакуума, прогреваемые до температуры 150^0 С, в которых в качестве уплотнителя используется эластичный материал типа Viton и затворы сверхвысоковакуумные, прогреваемые до 300^0 С, в которых уплотнение диска по седлу создаётся металлическим элементом, работающем в области упругих деформаций (серия 43,48). В настоящее время фирма выпускает десять серий высоковакуумных затворов, среди них – серии 01; 02; 08; 10; 12; 14; 16; 17; 18; и 20. Каждая серия отличается назначением и конструкцией отдельных элементов. Общепромышленному применению отвечают затворы серий 01, 10, 12, 14 [19].

* http://www.edwardsvacuum.com/Products/List.aspx?t=58

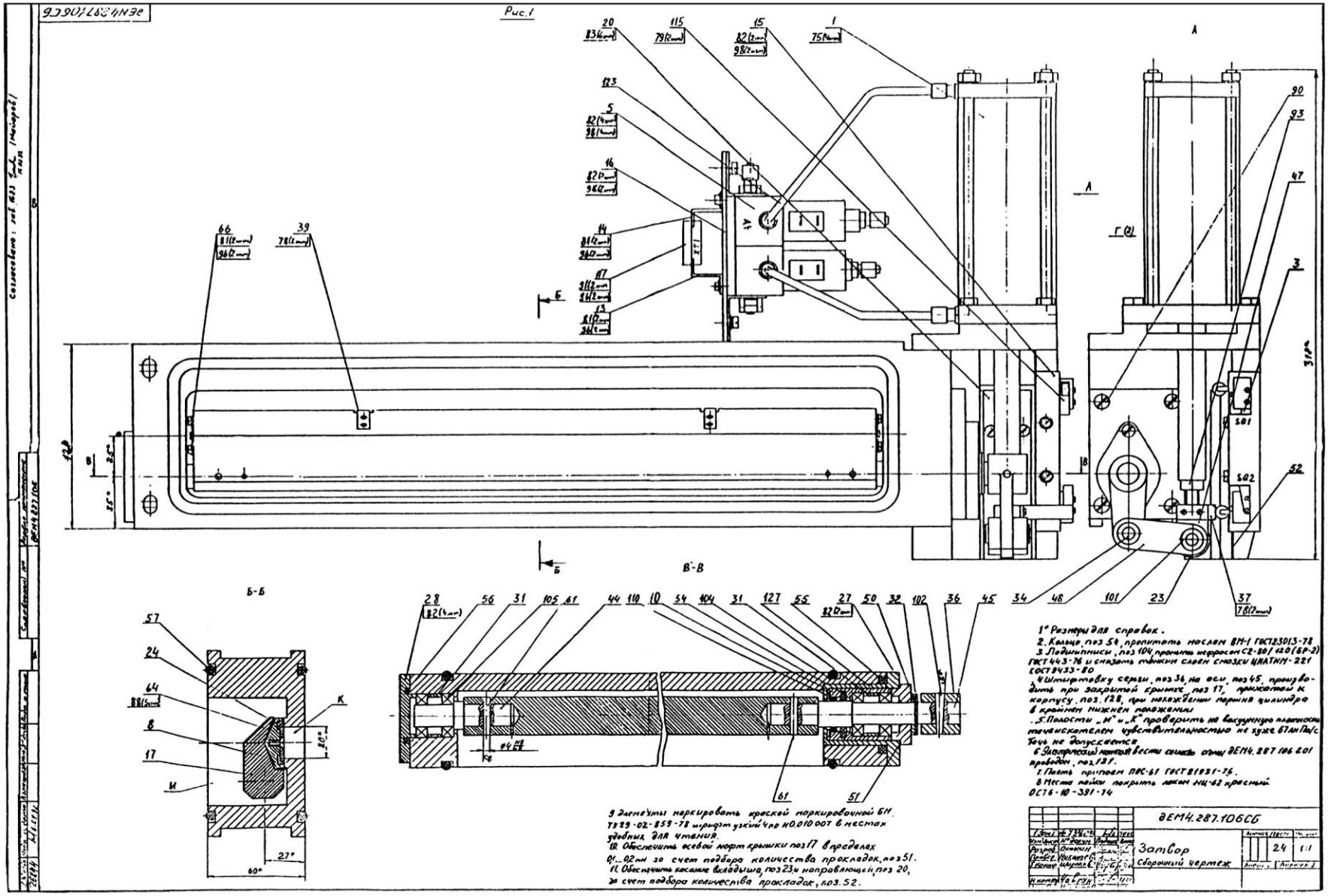


Рис. 8.3.8. Щелевой вакуумный затвор

Таблица 8.3.5

Параметры высоковакуумных затворов фирмы VAT

Параметры	**Серия**			
	01	10	12	14
Диапазон рабочих давлений, Па.	$10^{-7} \div 10^{5}$		$10^{-5} \div 10^{5}$	$2 \cdot 10^{-6} \div 10^{5}$ до D_y 200 $10^{-6} \div 10^{5}$
Натекание атмосферного воздуха, $м^3Па/с$	10^{-7}			
Условные проходы	25,40,50	63÷1250	63÷1250	63÷320
Уплотнитель	Viton			
Уплотнение ввода движения	Сильфонное		Магнитное	
Ресурс, ***N*** циклов	20.000	50.000	20.000	100.000 до D_y 320

Из анализа информационного материала следует, что мировой технический уровень высоковакуумных затворов определяется двумя сериями – 10 и 14, основные параметры которых приведены в таблице 8.3.5.

На каждый тип затворов единой серии фирма создаёт параметрические ряды. Затворы, как правило, имеют модульный привод, позволяющий без каких либо переделок установить либо ручной либо пневматический привод. Приводы, в свою очередь, также имеют унифицированные ряды. Увеличение проводимости достигается главным образом за счёт уменьшения длины проходного канала.

Представляет интерес принцип конструкции уплотнительных узлов для основных видов затворов этих серий, представленный на рис. 8.3.9 и 8.3.10.*

Затворы серии 10 выполняются по схеме модифицированной для различных D_y и требуемых усилий.

* HTTP://WWW.VATVALVE.RU

Рис. 8.3.9,а. Внешнийвид затвора серии 48 фирмы VAT

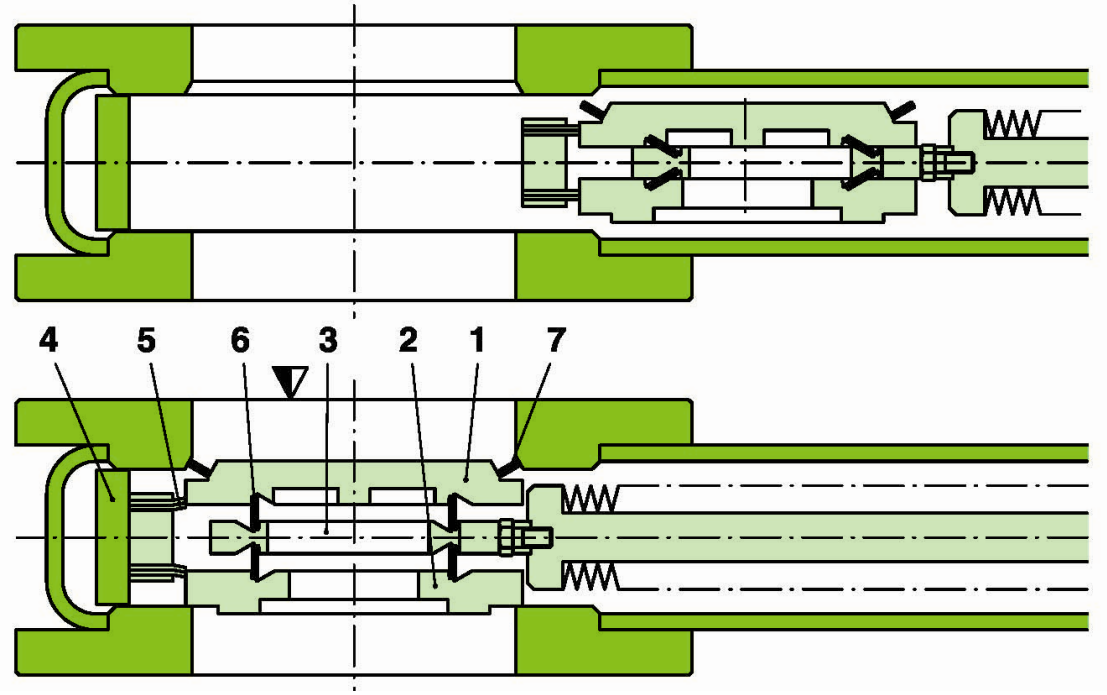


Рис. 8.3.9,б. Схема уплотнения затвора серии 48 фирмы VAT в открытом и закрытом положении: 1 – уплотнительный диск; 2 – опорный диск; 3 – промежуточный сопровождающий диск; 4 – упор; 5 – герметизирующие пружины; 6 – опоры; 7 – герметизирующее кольцо

Рис. 8.3.10,а. Внешний вид затвора серии 10 фирмы VAT

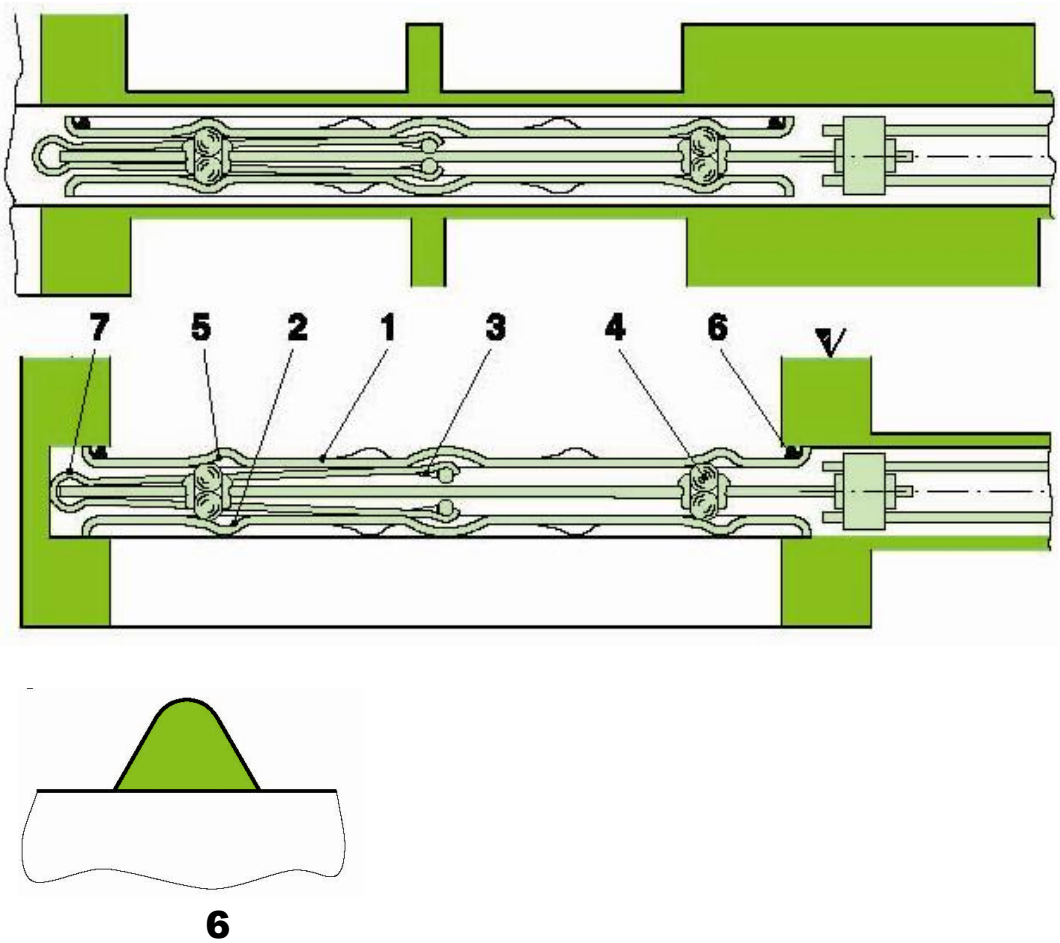


Рис. 8.3.10,б. Схема уплотнения затвора серии 10 фирмы VAT в открытом и закрытом положении:
1 - уплотнительный диск; 2 - опорный диск; 3 -сепаратор; 4 - шарики; 5 – кольцевые канавки; 6 – уплотнитель. 7 – пластинчатая пружина

Рис. 8.3.11,а. Внешний вид затвора серии 14 фирмы VAT

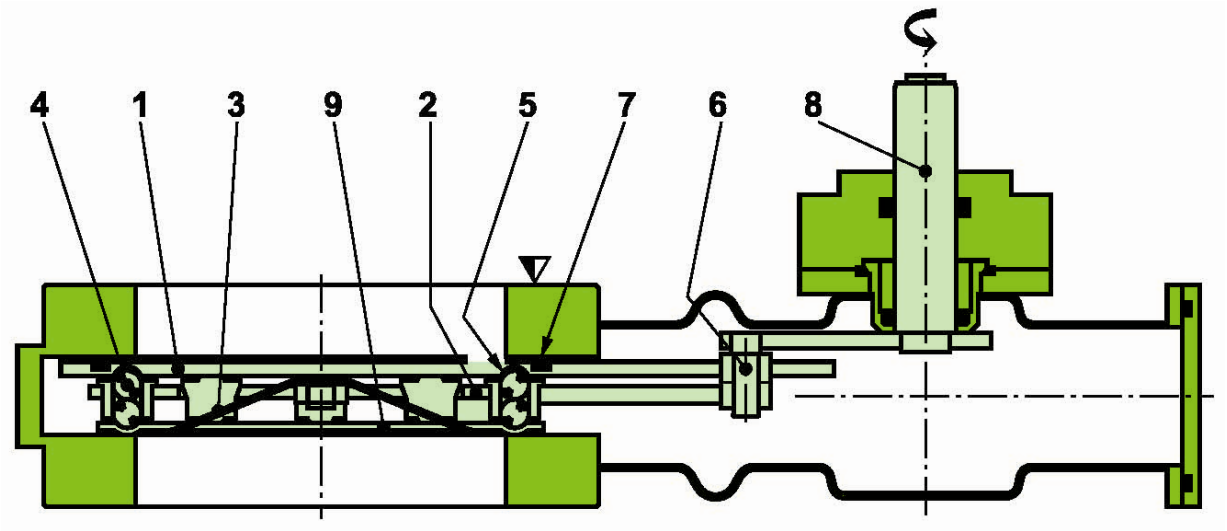


Рис. 8.3.11,б. Схема затвора серии 14:

1 – уплотнительный диск; 2 – направляющие шарики; 3 – пружина; 4 – силовые шарики; 5 – кольцевые канавки; 6 – рычаг; 7 – уплотнитель; 8 – вращательный ввод движения; 9 – опорный диск

В затворах серии 14 применён вращательный ввод движения в вакуум с манжетным уплотнителем (рис. 8.3.11).

В цельнометаллических сверхвысоковакуумных клапанах, прогреваемых до 450^0 С, серий 47, 48, 54, 57, 77 принцип уплотнения также осуществляется за счёт упругой деформации металлического диска, прижимающегося с требуемым усилием к поверхности седла (рис. 8.3.12).

В последнее десятилетие получили развитие указанные авторами более десяти лет назад тенденции создания облегчённых щелевых и бескорпусных затворов*, рис 8.3.13.

На рис 8.3.14 показаны наиболее удобные схемы интеграции бескорпусных щелевых затворов разных вариантов исполнения в вакуумное оборудование.

Характерной особенностью работ по созданию вакуумной арматуры на фирме VAT является непрерывное совершенствование и высокие вакуумно-технологические параметры, которые позволяют ей в течение 25÷30 лет удерживать мировой технологический уровень.

Широкая гамма вакуумной арматуры, в основе которой использованы традиционные принципы уплотнения, выпускается фирмой Varian.
Вакуумные клапаны с применением ручных, пневматических и электромеханических приводов выпускаются, в основном, с облегчёнными фланцами рассчитанными на присоединение к элементам вакуумных систем с помощью хомутов. Отдельные модели клапанов выпускаются в бесфланцевом исполнении. Для корпусов клапанов используют лёгкие алюминиевые сплавы или корозионно – стойкую сталь, аналогичную 12Х18Н10Т [147].

Приведённый обзор свидетельствует о том, что выпускаемая отечественной и зарубежной промышленностью высоковакуумная коммутационная аппаратура рассчитана на перекрытие больших газовых потоков в диапазоне давлений $10^5 \div 10^{-5}$ Па.

---

* Васин В.А. Ресурсосберегающие принципы проектирования исполнительных устройств оборудования для высоких технологий // Машиностроитель №9, 1997. – С. 39-42.

Рис. 8.3.12,а. Внешний вид затвора серии 57 фирмы VAT

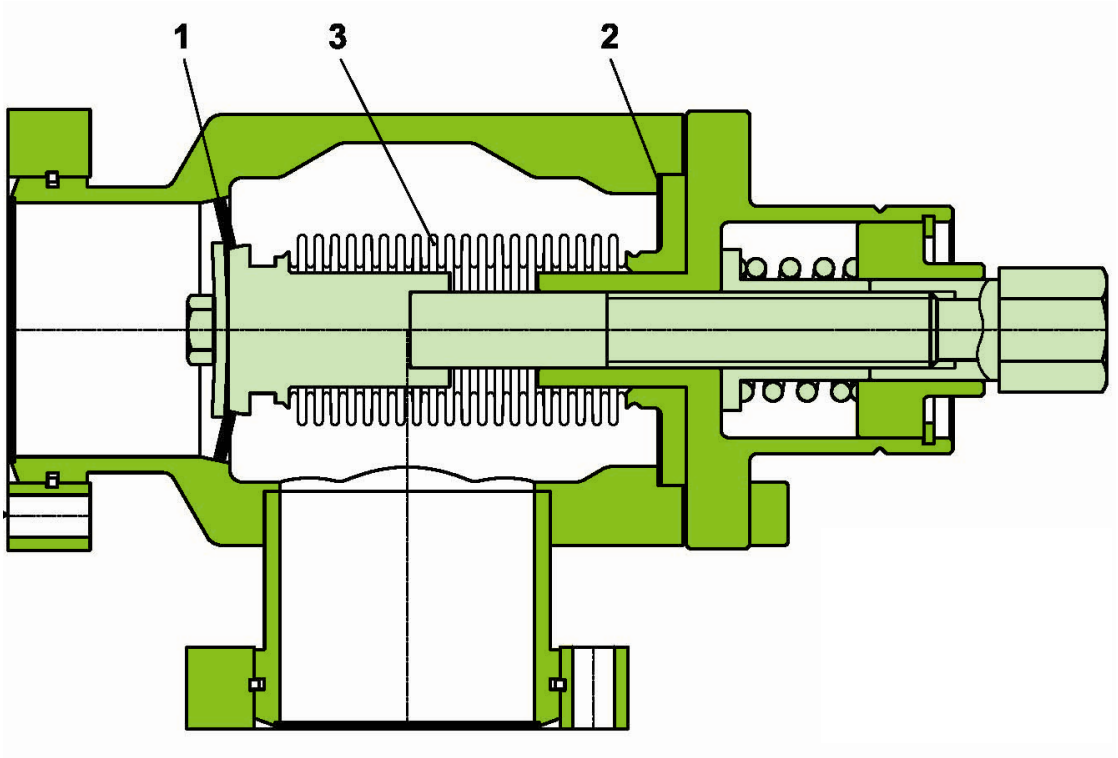


Рис. 8.3.12,б. Вакуумный клапан, прогреваемый до 450^0 (723 К) серии 57 фирмы VAT: 1 – кольцеобразный уплотнительный элемент; 2 – герметизирующий сильфон; 3 – корпус

а) б)

Рис. 8.3.13. Внешний вид шелевых бескорпусных вакуумных затворов а) серии 075 фирмы VAT;б) серии XGT 22 фирмы SMC

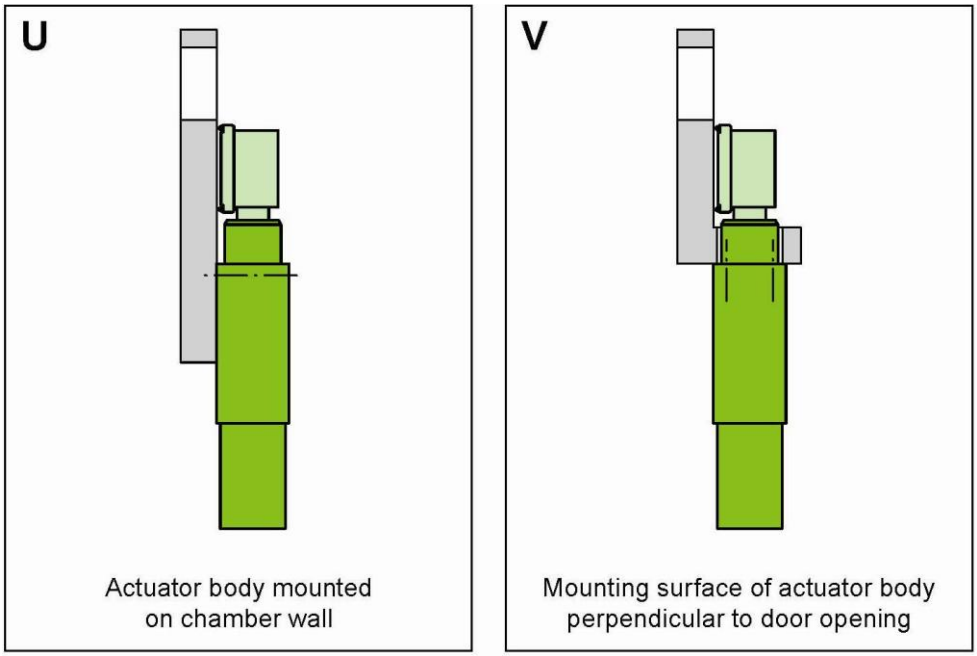


Рис. 8.3.14. Варианты подсоединения щелевых бескорпусных вакуумных затворов

В то же время в многомодульном оборудовании как уже отмечалось с последовательной или параллельной обработкой изделий возникает необходимость герметизировать одну высоковакуумную камеру от другой.

В этом случае будет иметь оправдано применение клапанов и затворов облегчённого типа на основе новых технических решений.

8.4. Перспективы создания бескорпусных вакуумных клапанов и затворов

Анализ современных требований к созданию коммутационной вакуумной аппаратуры оборудования высоких технологий в многомодульных линиях и кластерном оборудовании выявил необходимость герметичного перекрытия вакуумных объемов с малыми перепадами давления (на 2÷3 порядка) в диапазоне $10^{-5} \div 10^{-7}$ Па.

Отечественные и зарубежные клапаны и затворы выполненные на традиционной основе рассчитаны на универсальное применение как при больших (10 порядков и более), так и при малых перепадах давления.

Такие конструкции содержат массивный корпус, назначение которого состоит, во-первых, в необходимости размещения всех элементов перемещения и создания усилия уплотнения, в том числе опорных узлов, направляющих и вводов движения от расположенного вне корпуса источника движения и, во-вторых, в восприятии реактивного усилия. Габариты, металлоемкость и масса корпуса увеличиваются еще и тем, что в затворах особенно должно быть предусмотрено пространство для размещения клапана при открытом отверстии. Кроме того, традиционные затворы должны иметь уплотнения для герметичного соединения с вакуумной камерой оборудования. Такое решение, требующее создания сложной металлоемкой конструкции, оправдано для тех случаев, когда необходимо уплотнить вакуумный объем на границе с атмосферой.

Сложность конструкции, наличие пар трения как правило является

источником микрочастиц износа, распространяющихся при работе клапанов и затворов в вакуумные камеры, а также неизбежно формирует дополнительные "собственные" газовые потоки.

Из всех рассмотренных в 8.3 конструкциях клапанов и затворов наиболее удачные технические решения принадлежат фирме VAT (Швейцария) реализация которых, основанная на создании усилий уплотнения с использованием эффекта упругой деформации передаточных звеньев, позволила существенно упростить конструкцию, снизить металлоемкость, уменьшить габариты. Но при этом узлы трения полностью не устранены.

Учитывая тенденцию развития оборудования в направлении создания многомодульных и кластерных структур, целесообразно применение облегченных конструкций вплоть до создания бескорпусной коммутационной вакуумной аппаратуры.

Опыт работы авторов в составе творческого коллектива кафедры "Электроника и наноэлектроника" МИЭМ и предварительные исследования позволяют утверждать о возможности создания бескорпусных вакуумных клапанов и затворов.

Их целесообразно применять в тех случаях, когда требуемое усилие уплотнения при малых потоках сравнительно невелико и может быть воспринято элементами облегченной конструкции или непосредственно опорными поверхностями камеры.

Для решения проблемы создания бескорпусной вакуумной коммутационной аппаратуры могут быть успешно использованы в качестве приводов перемещения уплотнительного узла и создания усилия уплотнения приводы управляемой упругой деформации.

Из множества видов приводов этого типа, разработанных и исследованных под руководством проф. д.т.н. Александровой А.Т. к.т.н. Ермаковым Е.С., к.т.н. Горюновым А.А., к.т.н. Губаревой Л.И., к.т.н. Андреевой А.Ю., к.т.н. Маляровым С.М., к.т.н. Мининым А.В. [20÷27] для создания бескорпусных клапанов и затворов более всего подходят приводы незамк-

нутого и замкнутого контура.

Бескорпусные клапаны и затворы на основе приводов управляемой упругой деформации обладают преимуществами, свойственными любым устройствам вакуумной механики, в которых используются аналогичные приводы. Эти преимущества сводятся к следующему:

1. Малая металлоемкость на порядок и более меньше традиционных конструкций аналогичного назначения.
2. Полное исключение пар трения движения и соответственно генерации микрочастиц износа – наиболее опасного вида привносимой дефектности.
3. Высокая надежность, оцениваемая более 10^6 рабочих циклов.
4. Простота и технологичность конструкции.
5. Возможность использования в качестве энергоносителя сжатого воздуха заводских магистралей, автономных пневмоисточников в том числе на основе термосорбционных компрессоров [28, 29], а также рабочих жидкостей, жидких металлов, магнитных и реологических жидкостей.
6. Высокое быстродействие.
7. Возможность подвода энергоносителя к приводам через любые труднодоступные конструктивные элементы камер и шлюзов.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 8

1. Одиноков В.В. Шлюзовые системы в вакуумном оборудовании. – М.: Высшая школа, 1981. – 55 с.
2. Александрова А.Т., Ермаков Е.С. Гибкие производственные системы электронной техники. – М.: Высшая школа, 1989. – 319 с.
3. Капустин Н.Ф. Состояние и основные направления создания вакуумного оборудования в АО "Вакууммаш" // Химическое и нефтяное машиностроение, № 3, 1995. – с. 18-23.
4. Кратенко В.И., Ляпин В.М., Махов И.Е. и др. Комплекс для высоковакуумной лучевой технологии // Электронная промышленность, № 10, 1990. – с. 58-61.
5. Мальгин С.Н. Элементная база электронного машиностроения. Современное состояние, перспективы развития и применение: С. Пб. РНИГЛ "Электронстандарт", 1993. – 44 с.
6. Мальгин С.Н., Панфилов Ю.В. Кластерное оборудование в микроэлектронике: (обзоры по электронной технике). – Серия 7 ТОПО М.: ЦНИИ Электроника, 1994, вып. 1 (1701). – 120 с.
7. Степанчиков С.В. Снижение загрязнений, привносимых на изделия электронной техники в вакуумном оборудовании // Научно-технический сборник "Автоматическое оборудование и технология производства изделий электронной техники". – М.: МИЭМ, 1991. – с. 37-42.
8. Панфилов Ю.В. Перспективы создания вакуумных автоматических линий: Сб. трудов "Проблемы автоматизации производства изделий электронной техники". – М.: МВТУ, 1987. – с. 23-32.
9. Александрова А.Т. Оценка работоспособности механизмов перемещения в высоком вакууме // Электронная техника, Сер. 7, вып. 3 (82). – 57-60 с.
10. Александрова А.Т., Кужман А.Г. Масспектрометрические исследования изменения состава остаточной газовой среды при трении в вакуу-

ме конструкционных материалов // Труды МИЭМ. – Вып. 44, 1974.

11. Курбатов О.К., Леонтьев А.Ф., Шмаков А.П. и др. Новая запорная и регулирующая вакуумная арматура // Вакуумная техника и технология, Том 2, № 3,4. 1992. – с. 32-38.
12. Львов Б.Г., Шувалов А.С. Техническое обслуживание новой вакуумной коммутационно-регулирующей аппаратуры. – М.: Высшая школа, 1987. – 80 с.
13. Блинов В.В., Горяев В.П., Пчеляков О.П. Клапан щелевой прямопроходный // Тезисы доклада Научно-технической конференции "Вакуумная наука и техника". – Гурзуф: 1994.
14. Каталог фирмы VAT, 2012.
15. Каталог фирмы Alkatel, 1997.
16. Сайт Balzers (Pftiffer), 2012, www.pfeiffer-vacuum.com/products/valves
17. Каталог фирмы Varian, 2005. http://www.istcgroup.com/pdf/Varian_2005_Catalog_web_full.pdf ; http://www.ccsservices.ru/vacuum/valves.html
18. Онлайн каталог фирмы Leybold: клапаны, 2012, www.oerlikon.com/leyboldvacuum/products/produktkatalog_01.aspx?cid=100
19. Макаров В.А., Рогова Г.В. Тенденции развития вакуумных затворов за рубежом // Вакуумная техника и технология, Том 3, № 3,4. 1993.
20. Александрова А.Т. Исследование процессов дестабилизации параметров системы – "механизм - контролируемая вакуумная среда " и разработка теоретических основ проектирования оптимальных механизмов: Дисс. д.т.н. – М.: МИЭМ, 1978. – 385 с.
21. Горюнов А.А. Исследование газопроницаемости гибких герметичных разделительных элементов в условиях циклического деформирования с целью определения работоспособности и оптимальных режимов работы вакуумных вводов движения: Дисс. к.т.н. – М.: МИЭМ, 1979. – 165 с.
22. Минин А.В. Исследование вопросов рационального конструирования функциональных механизмов вакуумной автоматики на основе гибких

герметичных пневматических элементов: Дисс. к.т.н. – М.: МИЭМ, 1975. – 158 с.

23. Александрова А.Т., Ермаков Е.С. Устройства и системы формирования перемещений в высоком вакууме с использованием принципа управляемой упругой деформации // Тезисы доклада научно-технической конференции "Вакуумная наука и техника". – Гурзуф: 1994.
24. Ермаков Е.С. Исследование характеристик герметичных упругодеформируемых трубчатых элементов и разработка однозвенных функциональных механизмов на их основе: Дисс. к.т.н. – М.: МИЭМ, 1976. – 197 с.
25. Губарева Л.И. Исследование кинематики и разработка приводов направленного перемещения на основе трубчатых элементов для оборудования электронной техники: Дисс. к.т.н. – М.: МИЭМ, 1984. – 181 с.
26. Андреева А.Ю. Создание средств автоматизации для особочистых технологических сред и высокого вакуума: Дисс. к.т.н. – М.: МИЭМ, 1988. – 197 с.
27. Маляров С.М. Разработка и исследование вакуумных манипуляторов на основе высокочувствительных трубчатых элементов повышенной осевой жесткости: Дисс. к.т.н. М.: МИЭМ, 1987. – 144 с.
28. А.Т. Александрова, Д.А. Пономаренко. Проблемы создания автономных источников питания устройств вакуумной механики на основе обратимодействующих поглотителей водорода // Тезисы доклада на научно-технической конференции. – Гурзуф: 1997. – 113 с.
29. Б.А. Колачев, Р.Е. Шалин, А.А. Ильин. Сплавы - накопители водорода. – М.: Металлургия, 1995. – 377 с.
30. Васин В.А. Щелевой затвор с криволинейной траекторией перемещения / Патент на изобретение N%2206012, опубл. Б.И. N%16, 10.06.2003.
31. Васин В.А. Смещённый щелевой затвор с криволинейной траекторией перемещения / Патент на изобретение N%2206011, опубл. Б.И. N%16, 10.06.2003.

ГЛАВА 9. ПРЕЦИЗИОННЫЕ ПЕРЕМЕЩЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПЬЕЗОЭФФЕКТА

9.1. Пьезосканеры в приборостроении

Во многих технологических процессах и оборудовании необходимо контролировать рабочее расстояние зонд-образец и осуществлять перемещения зонда в плоскости образца с высокой точностью (на уровне долей нанометра). В настоящее время смещения малых величин достигаются с помощью электромеханических преобразователей движения на основе обратного пьезоэлектрического эффекта – пьезоэлектрических приводов или актюаторов. Обеспечивая перемещение от единиц до сотен микрометров с высокой точностью до 0,1 нм, они способны развивать усилия до 50 кН и находят применение в различных областях технологии приборостроения (электронной, химической, фармацевтической, автомобильной промышленности). Другие области применения пьезоэлектрических приводов следующие: прецизионная техника – современные пневматические и гидравлические клапаны с быстродействием до 10 мкс; интеллектуальное управление работой двигателя внутреннего сгорания (предварительный впрыск топлива в двигателях автомобилей и последующее управление аналоговой схемой основного впрыска); системы оптической оптоволоконной линии связи (стыковка и подстройка оптических волокон, волоконных лазеров); прецизионный контроль и точное позиционирование технологического оборудования в различных областях производства и технологии приборостроения; автоюстировка и подстройка лазерных зеркал, интерферометров, приводы для адаптивной оптики; управление и компенсация вибрации станков, транспортных средств (активное демпфирование вибрации рамы самолетов) и т.д.

Пьезоэлектрические элементы, используемые в актюаторах, могут работать также в колебательном режиме при подаче переменного напряжения в звуковом и ультразвуковом интервалах частот. Преобразование

этих колебаний в направленное движение позволяет создавать пьезоэлектрические движители.

Основным элементом сканирующего зондового микроскопа (СЗМ), который и обеспечивает возможность работы прибора в режимах атомных разрешений, является пьезосканер. Сканеры СЗМ изготавливают из поликристаллических пьэзоэлектрических материалов, которые с одной стороны обеспечивают высокую жесткость конструкции, а с другой – возможность перемещения на весьма малые расстояния, вплоть до единиц ангстрем. Современное состояние СЗМ таково, что возникла необходимость перехода от чисто качественных измерений поверхностных структур к количественным, метрологически выверенным измерениям, что требует углубленного изучения поведения пьезокерамических материалов, используемых для изготовления сканеров, разработки методов прецизионных измерений и, метрологической аттестации и коррекции пьезосканеров. Причем, для процедур литографии необходимы сканеры с ортогональностью в плоскости на уровне лучше десятых долей процента. Если неортогональность в плоскости еще допустимо исправлять методами программной коррекции, то неортогональность в плоскости оси *Z*, которая в некорректированной керамике может достигать десятков градусов, недопустима, так как приводит к тому, что низкая боковая частота сканера начинает быть существенной для работы петли обратной связи, что существенно снижает качество работы прибора. Именно эти обстоятельства привели к необходимости углубленного изучения свойств сканера и разработки технологии их коррекции на физическом уровне.

9.2. Схемы пьезоэлектрических приводов

Основное отличие пьезоэлектрических приводов от известных устройств, в которых колебательное движение ведущего звена превращается во вращательное или поступательное движение ведомого звена (например, в храповых и импульсных передачах, механизмах свободного хода, виб-

ротранспорте и т. п.) состоит в их частотном диапазоне. Если частотный диапазон храповых импульсных передач не превышает нескольких сотен герц, то у пьезоэлектрических приводов он на несколько порядков выше. Так, например, рабочая частота одного из механизмов составляет 20000 Гц, и это не является пределом. Такие высокие частоты приводят к качественному изменению ряда параметров устройств, а также к новым явлениям, не наблюдаемым в низкочастотных механизмах.

Для большинства пьезоэлектрических приводов амплитуды колебаний преобразователей весьма малы – лежат в диапазоне $0{,}1\cdot10^{-3}\div1{,}0\cdot10^{-3}$ мм. Предельные значения составляют, амплитуды в 0,1÷0,2 мм, применяемые в быстроходных устройствах.

Существует большое разнообразие возможных схем пьезоэлектрических приводов [1], которые, однако, могут быть представлены следующими типами динамических моделей:

1. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на фрикционной анизотропности контакта колеблющегося элемента и вращаемого ротора или транспортируемой поверхности (рис. 9.2.1) с частотным диапазоном от нескольких сотен герц до нескольких мегагерц.

Характерным признаком данной группы устройств является невозможность реверсирования движения без изменения угла.

2. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на создании различия в пределах одного цикла нормальных реакций, достигаемого положением дополнительных периодических воздействий колеблющихся элементов и ротора. Конструктивно пьезоэлектрические приводы данной группы выполняются в виде упругих систем, совершающих продольно поперечные колебания (рис. 9.2.2). Обязательным условием является сдвиг фаз движений по двум осям. Изменение знака сдвига фазы осуществляется реверсированием движения. Частотный диапазон приводов данной группы соответствует частотному диапазону приводов 1-й группы.

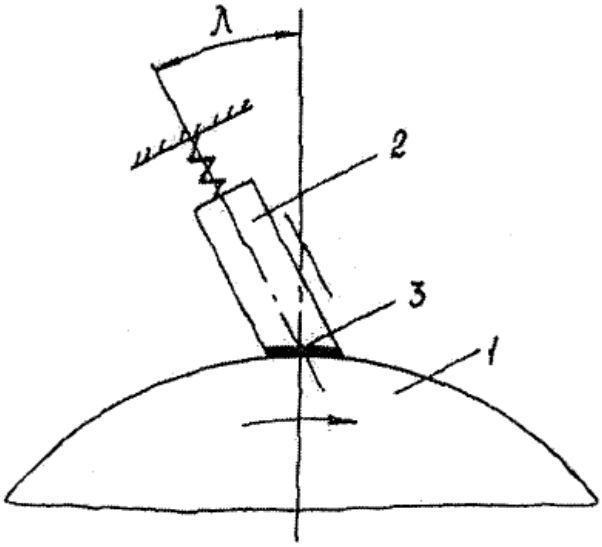


Рис. 9.2.1. Схема работы пьезоэлектрических приводов, основанных на фрикционной анизотропности контакта колеблющегося элемента и перемещаемой поверхности: 1 – вращаемое тело; 2 – колеблющийся элемент, совершающий продольные колебания; 3 – контактирующий элемент из специального материала

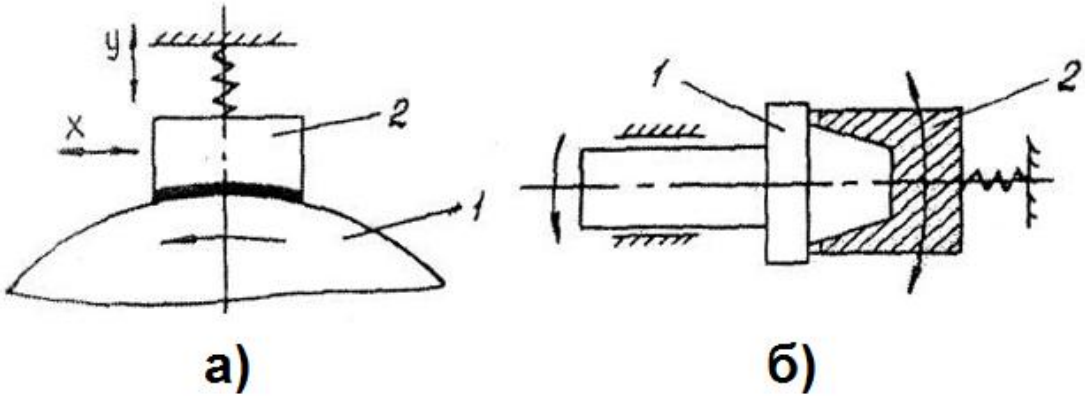


Рис. 9.2.2. Схемы пьезоэлектрических приводов 2-й группы: а) элемент, совершающий колебания по осям *x* и *y* с одинаковой частотой, но со сдвигом фаз; б) элемент 2, совершает крутильные и поступательные колебания.

3. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на применении асимметрических циклов колебаний с одновременным использованием нелинейных свойств жидкости, зависимости сил трения от скорости и т.п. Так, например, используя линейную зависимость демпфирования в реальной жидкости от скорости и сообщая колеблющемуся элементу ассиметрические крутильные колебания (рис. 9.2.3), можно обеспечить непрерывность вращения ведомого звена. В такой схеме используется зависимость коэффициента трения от скорости.

4. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на периодически изменяемой связи между колеблющимися элементом и ротором. В качестве такой связи могут быть использованы материалы с управляемым коэффициентом трения, магнито- и электровязкие жидкости (т.е. жидкости, изменяющие свою вязкость в зависимости от величины приложенного магнитного или электрического поля, материалы, меняющие свою вязкость в ультразвуковом поле и т.п.)

5. Пьезоэлектрическими приводами, основанными на фрикционном взаимодействии волновых движений преобразователя и перемещаемого тела. При этом используются несколько способов генерирования волн: применение фазосдвигающих цепочек, периодическое изменение фазы несущего высокочастотного напряжения, периодическое изменение граничных условий упругого звена применение нескольких преобразователей с различными частотами и т.п.

В зависимости от статических и динамических параметров пьезоэлектрические приводы 1-й и 2-й групп могут работать в трех динамически устойчивых режимах. В 1-м режиме контакт между колеблющимся элементом и перемещаемой поверхностью сохраняется во время всего цикла колебаний, т.е. колебания происходят в пределах упругости поверхностного слоя, а во 2-м – нарушается, т.е. система работает в виброударном режиме. При этом наблюдаются устойчивые области параметров системы, при которых устанавливаются п -кратные периодические ударные колебания, где n =1,2,3...

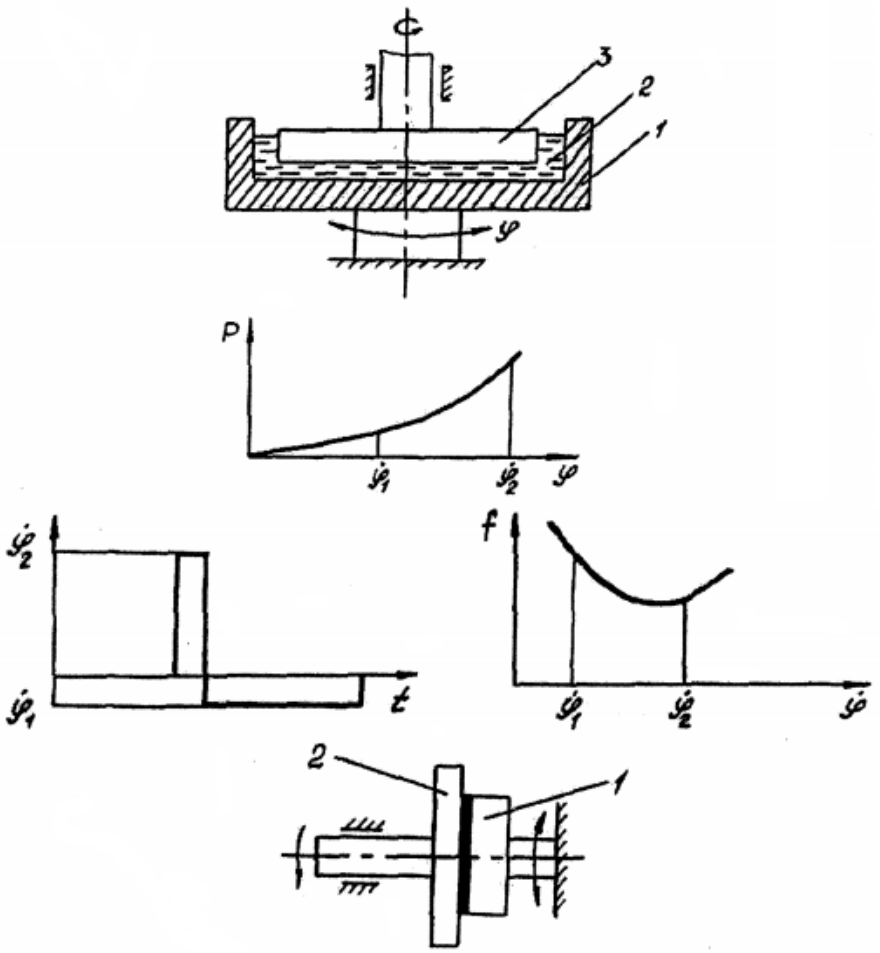


Рис. 9.2.3. Схемы пьезоэлектрических приводов с асимметрическими колебаниями колеблющегося элемента колебательных систем, совершающих предельно-крутильные колебания и т.п.

Режимы движения с $n > 1$ наблюдаются вплоть до $n = 8$. Они являются нежелательными, так как снижают КПД привода. 3-й режим характеризуется наличием между колеблющимся элементом и поверхностью тела сжимаемой воздушной подушки толщиной в несколько микрон. В данном случае силовое замыкание контакта также нарушается. В пьезоэлектрических приводах 2-й группы работоспособность сохраняется и в этом режиме. Это объясняется движением пленки с определенной скоростью в самом зазоре, увлекающей за собой перемещаемое тело. Такой режим исключает износ в виду отсутствия поверхности контакта звеньев. Угловую и линейную скорость пьезоэлектрических приводов можно менять путем измене-

ния амплитуды или частоты колебаний преобразователей. К другим способам изменения скорости можно отнести, например, изменение угла λ для приводов 1-й группы, изменение фазы колебания по осям x и y для приводов 2-й группы, изменение характеристики промежуточного элемента для приводов 4-й группы и т.п.

Классификация пьезоэлектрических приводов основана на общей структурной схеме (рис. 9.2.4). Генератор электрических колебаний с несколькими выходами, отличающимися как по частоте, так и по фазе, подключен к управляющему устройству 2, осуществляющему соответственно с сигналом управления $H'(t,x,x)$ коммутацию и модуляцию электрического напряжения, поступающего в электроды вибропреобразователей.

Сигнал управления H' может зависеть не только от времени, но и от координат и скоростей подвижного звена привода

$$[x_i] = [X, Y, Z, \varphi_x, \varphi_y, \varphi_z]^{\mathrm{T}},$$

где X,Y,Z – перемещения подвижного звена по направлениям координатных осей, $\varphi_x, \varphi_y, \varphi_z$ – повороты относительно тех же осей.

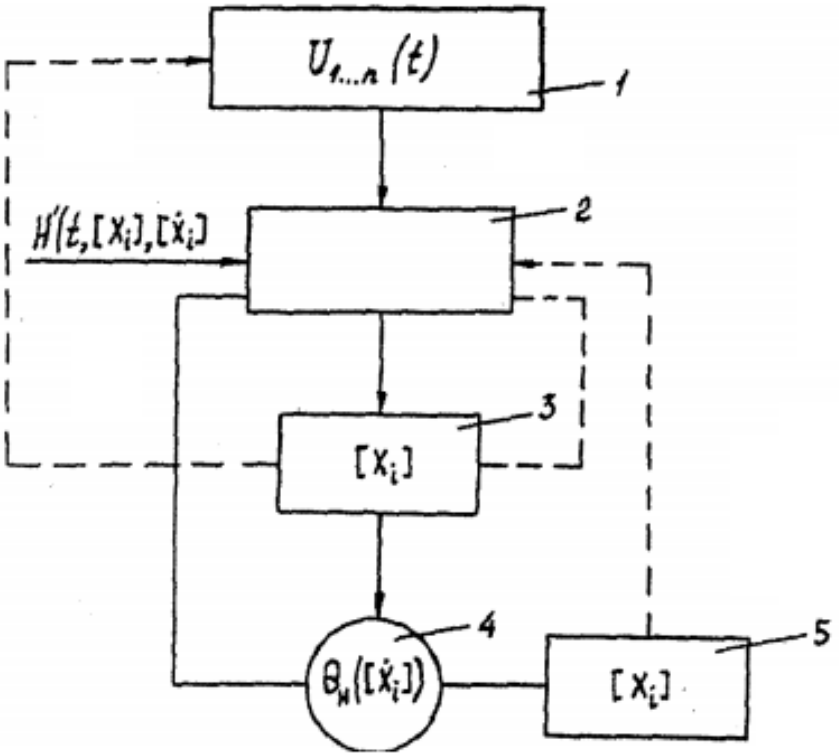


Рис. 9.2.4. Общая структурная схема пьезоэлектрического привода

Вибропреобразователь трансформирует электрическое напряжение в поступательные или крутильные колебания. Благодаря управляемой или неуправляемой нелинейности 4 в зоне контакта колебания вибропреобразователей преобразуются в перемещения подвижного звена 5.

Показанные на рис. 9.2.4 обратные связи реализуются между:

а) преобразователями 3 и генератором 1 – для стабилизации колебаний при действии различных дестабилизирующих факторов: старения, износа, температурных воздействий и т.п.;

б) преобразователями 3 и блоком управления 2 – при управлении по ускорению и силам в контакте;

в) подвижным звеном 5 и блоком управления 2 – для стабилизации скорости при позиционировании, для создания оптимальных законов движения и т.п.

Пьезоэлектрические приводы можно подразделять также на следующие группы:

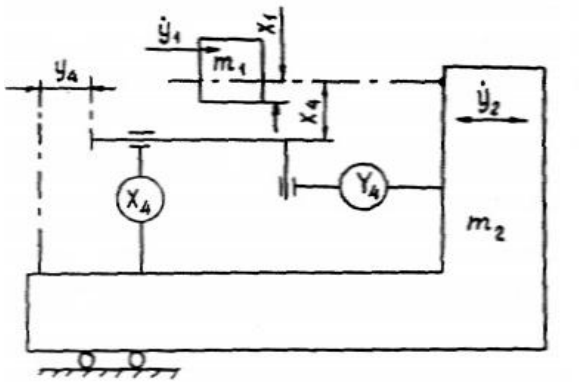


Рис. 9.2.5. Модель виброударного двигателя: m_1 и m_2 – массы соударяющихся тел; x_1 и x_2 – перемещения по нормали поверхностей соударяющихся тел из положения равновесия поверхности тела 2; y_1 и y_2 – скорости движения соударяющихся тел по касательной; y_4 – деформация поверхности тела 2 по касательной; X_4 и Y_4 – реакции поверхности тела 2 соответственно по нормали и касательной

1. По виду нелинейности (соответствующие, однотипные, динамические модели);

2. По виду движения: вращательного, поступательного и сложного;

3. По режиму движения: с погружением и без погружения контакта между преобразователем и подвижным звеном, режим сжимаемой подушки;

4. По характеру движения:

а) непрерывное движение подвижного звена;

б) шаговое;

в) старт-стопное;

5. По способу управления скоростью подвижного звена:

а) с амплитудной модуляцией колебаний;

б) с частотной модуляцией колебаний;

в) с фазовой модуляцией колебаний;

г) с изменением параметров управляемой нелинейности;

6. По возможности изменения знака скорости:

а) реверсивные;

б) нереверсивные;

7. По количеству степеней подвижности;

8. По наличию обратной связи.

Наряду с основными можно рассматривать и ряд других признаков.

Вибропреобразователь является основной частью пьезоэлектрического привода и определяет его параметры – рабочую частоту, механическую характеристику, мощность, динамическое качество переходных режимов движения.

Вибропреобразователи изготавливаются из материалов промышленной пьезокерамики. Характеристики и свойства промышленных составов пьезокерамических материалов регламентируются стандартами. Наиболее широко используется пьезокерамика типа ЦТС, ПОД, ПРК.

В случае силового режима, характерного для пьезоэлектрического привода, наряду с высокими значениями пьезомодуля и коэффициента

электромеханической связи, материалы должны иметь широкий диапазон механической добротности (высокая добротность – для приводов непрерывного движения, низкая – для шаговых и старт-стопных режимов) и низкие диэлектрические потери. Важна динамическая прочность материала, так как при работе пьезоэлектрического привода в преобразователе возникают сложные большие механические напряжения, которые могут привести к его разрушению.

Проектирование пьезоэлектрических приводов происходит в два этапа:

1) расчет параметров преобразователя, согласованного с генератором и обеспечивающего требуемые формы колебаний и режимы движения;

2) расчет параметров нелинейной системы преобразователь-ротор (или ползун), обеспечивающей заданные и скоростные характеристики привода.

Такое расчленение на этапы не является точным, так как режим движения преобразователя зависит от динамических процессов, происходящих в системе преобразователь-ротор. Однако такой подход к определению параметров привода позволяет существенно упростить процесс расчета. Кроме того, второй этап расчета иногда может быть сведен к изучению известных динамических моделей, что позволяет заранее предугадать характер динамических явлений и оценить устойчивость движения.

Высокие частоты колебаний и малые их амплитуды приводят к необходимости учитывать реологические свойства соударяющихся пар в пьезоэлектрических приводах, работающих в ударном режиме. Следует учитывать, что даже для одного и того же типа привода, в случае возбуждения вибропреобразователя на нескольких частотах, реологические модели контактной зоны могут быть различны для разных частот. Это относится и к работе одного и того же привода в различных режимах, например, непрерывном или шаговом.

Области применения пьезоэлектрических приводов определяются положительными сторонами: высокая разрешающая способность (до 10^{-7} рад), малая постоянная времени (время переходных процессов состав-

ляет единицы миллисекунд), широкий диапазон регулирования скорости (до $v_{max}/v_{min} = 10^6$), фиксация положения подвижного звена при отключении питания, малые габариты и масса.

С помощью пьезоэлектрических приводов можно достичь высокой равномерности перемещения или вращения ротора, так как отсутствуют такие характерные источники колебаний скорости, как крутильные колебания электродвигателей, погрешности редукторных элементов, переменная составляющая момента сопротивления вращению опор, биения и др. источники возмущения.

Пьезоэлектрические приводы можно успешно применять в системах, работающих на вибрирующем основании (при соблюдении условий балансировки подвески колеблющегося звена).

Эксплуатация приводов возможна в температурном диапазоне от абсолютного нуля до точки Кюри пьезоактивных материалов (т.е. 250÷450°С), а также в вакууме и открытом космосе.

Сильные магнитные и радиационные поля не влияют на работу вибродвигателей.

Рассмотренные преимущества пьезоэлектрических приводов позволяют наиболее целесообразно их использовать в прецизионном оборудовании электронной техники.

9.3. Морфологический анализ пьезоэлектрических приводов

С учётом анализа, проведенного выше, может быть предложена морфологическая таблица. В качестве примера рассмотрим часть этой таблицы (табл.9.3.1).

Выделим группы признаков пьезоэлектрических приводов (табл. 9.3.2):

Идея использования морфологической таблицы состоит в следующем:

Таблица 9.3.1

Основные группы признаков пьезоэлектрических приводов

Характер движения	Непрерывное движение подвижного звена, шаговое, старт-стопное
Вид движения	Вращательное, поступательное, сложное
Режим движения	С погружением и без погружения контакта между преобразователем и подвижным звеном режим сжимаемой подушки
Способ управления скоростью подвижного звена	С амплитудной модуляцией колебаний, с частотной модуляцией колебаний, с фазовой модуляцией колебаний, с изменением параметров управляемой нелинейности
Возможность изменения знака скорости	Реверсивные, нереверсивные
Количество степеней свободы	1,2,3 и т.д.
Наличие обратной связи	Нет, есть
Функциональное назначение устройства	Передача линейного движения, передача вращательного движения и т.д.
Взаимосвязь пьезоэлементов	Биморф, биметалл, пьезоэлемент и т.п.
Рабочая среда	Вакуум, атмосферные условия и т.п.
Вид деформации	Продольный, изгиб и т.п.

1. Из созданной морфологической таблицы выбираются приводы, удовлетворяющие техническому заданию.

2. Генерируются новые приводы (посредством обычной комбинации альтернатив признаков), после чего оцениваются по критериям и заносятся обратно в таблицу. Породить можно огромное число изделий. Повторяют эту процедуру до тех пор, пока не будет найдено оптимальное решение.

Таблица 9.3.2

Морфологическая таблица пьезоприводов

Название патента	**Устройство для прецизионного перемещения изделий**	**Механизм прямолинейного перемещения деталей**
Основные элементы	1 – стол, 2 – направляющая , привод выполненный в виде шести пьезопреобразователей – 3,4,5,6,7,8	1 – корпус, 2 – стержень на опорах 3, 4 – ИП
Блок питания	Есть	Есть
Вид деформации	Уменьшение или увеличение в длине пьезопреобра зователей	Изгиб опор за счёт уменьшения или увеличения в длине бипластин
Блок управления	Изменение амплитуды управляющего напряжения на преобразователях обеспечивает перемещение	Подача напряжения регулируемой величины. При подаче напряжения на бипластину она или увеличивается или уменьшается в длине, что приводит к изгибу пластины и, сответственно, к перемещеию стержня
Координатные оси	Перемещение по 6-ти координатам – трём линейным и трём угловым	Строго прямолинейное перемещение
Функциональное назначение устройства	Прецизионное перемещение изделий	Прямолинейное перемещение детали
Взаимосвязь пьезоэлементов	Биморфы	Используются либо биметаллические пластины либо бипластины
Рабочая среда	Устройства целесообразно использовать для работы в «чистых» средах прецизионного оборудования	Вакуум

Таблица 9.3.2 (продолжение)

Название патента	Приводное устройство	Гаситель колебаний
Основные элементы	1 – выходной вал, 2 – круглое неподвижное основание, 3 – радиально деформ. пьезоэл., установленные на основании, 4 – жесткое колесо, 5 – задающее устройство, 6 – ИП	1 – масса, 2 – упругая балка, 3 – демпфируемый объект, 4 – пьезокерамичес кие пластины, 5 – ИП
Блок питания	Есть	Есть
Вид деформации	Увеличение длины диаметрально противоположных пьезоэлементов в радиальном направлении	Деформации балки в поперечном направлении за счёт уменьшения и увеличения длины пьезокерам. пластин
Блок управления	Эл. напряжение подаётся на противоположные пьезоэлементы. Наружняя часть всего ряда пьезоэл. принимает овальную форму и вступает в контакт с колесом. В рез. обкатывания овала жёсткое колесо приобретает угл. скорость	Путём коррекции, напряжение на пьезокерам. пластинах устанавливают такой величины, которое позволяет изменять жесткость балки и настраивать гаситель на частоту вынужденных колебаний
Координатные оси	Вращательное движение	
Функциональное назначение устройства	Привод	Гаситель колебаний
Взаимосвязь пьезоэлементов	Пьезоэлементы распред. по окружности и жестко соединены между собой своими боковыми сторонами	На упругой балке жестко закреплены пьезокерам. пластины. Продольные оси упругой балки и пластин ортогональны
Рабочая среда	Устройства целесообразно использовать для работы в «чистых» средах прецизионного оборудования	

Таблица 9.3.2 (продолжение)

Название патента	Манипулятор	Подложкодержатель с гасителем колебаний
Основные элементы	1 – скрученная в спираль лента, 2 – основание, 3 – платформана которой установлены три ленты 4, 5 – схват, 6 – пьезоэл. пластины, 7 – ИП, 8 – БУ	1 – корпус, 2 – прижим-фиксатор, 3 – подложка, 4 – основание, 5 – стойка, 6 – дополнительная масса, 7 – криволинейные пружины
Блок питания	Есть	Нет
Вид деформации	Пьезоэлементы прикреплены к лентам и образуют биморф. В результате при подаче напряжения на пьезоэлемент лента 1 скручивается, 4 совершает поступательные движения, а схват 5 сжимается или разжимается	
Блок управления	Источник питания подаёт напряжение через БУ на пьезоэлектрические пластины	
Координатные оси		
Функциональное назначение устройства	Манипулятор	
Взаимосвязь пьезоэлементов		
Рабочая среда	Устройства целесообразно использовать для работы в «чистых» средах прецизионного оборудования	

9.4. Разнообразие пьезоэлементов

Во многих технологических процессах и оборудовании необходимо контролировать рабочее расстояние зонд-образец и осуществлять перемещения зонда в плоскости образца с высокой точностью (на уровне долей ангстрема). Эта задача решается с помощью специальных манипуляторов - сканирующих элементов (пьезосканеров). Сканирующие элементы зондовых микроскопов могут быть изготовлены из пьезоэлектриков – материалов, обладающих пьезоэлектрическими свойствами. Пьезоэлектрики изменяют свои размеры во внешнем электрическом поле. Уравнение обратного пьезоэффекта для кристаллов записывается в виде [2]

$$u_{ij} = d_{ijk} E_k ,$$

где u_{ij} – тензор деформаций; E_k – компоненты электрического поля; d_{ijk} – компоненты тензора пьезоэлектрических коэффициентов.

Вид тензора пьезоэлектрических коэффициентов определяется типом симметрии кристаллов.

Рассмотрим плоскую пластину из пьзокерамики (рис. 9.4.1) во внешнем поле [2]. Пусть вектор поляризации $\vec{P}$ и вектор электрического поля $\vec{E}$ направлены вдоль оси X. Тогда, обозначая $d_{||} = d_{33}$ и $d_{\perp} = d_{31}$, получаем,

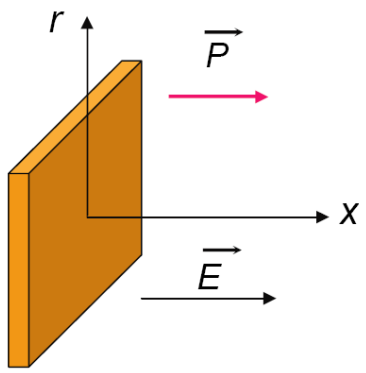


Рис. 9.4.1. Пластина из пьезокерамики во внешнем электрическом поле

что деформации пьезокерамики в направлении параллельном полю равна $u_{xx} = d_{||} \cdot E_x$, а в перпендикулярном полю направлении $u_{yy} = d_{\perp} \cdot E_x$.

Широкое распространение получили трубчатые пьзоэлементы (см. рис. 9.4.2). Они позволяют получать достаточно большие перемещения объектов при относительно небольших управляющих напряжениях. Трубчатые пьезоэлементы представляют собой полые тонкостенные цилиндры, изготовленные из пьезокерамических материалов.

Обычно электроды в виде тонких слоев металла наносятся на внешнюю и внутреннюю поверхности трубки, а торцы трубки остаются непокрытыми.

Трубка изменяет свои продольные размеры под действием разности потенциалов между внутренним и внешним электродами. В этом случае продольная деформация под действием радиального электрического поля может быть записана в виде

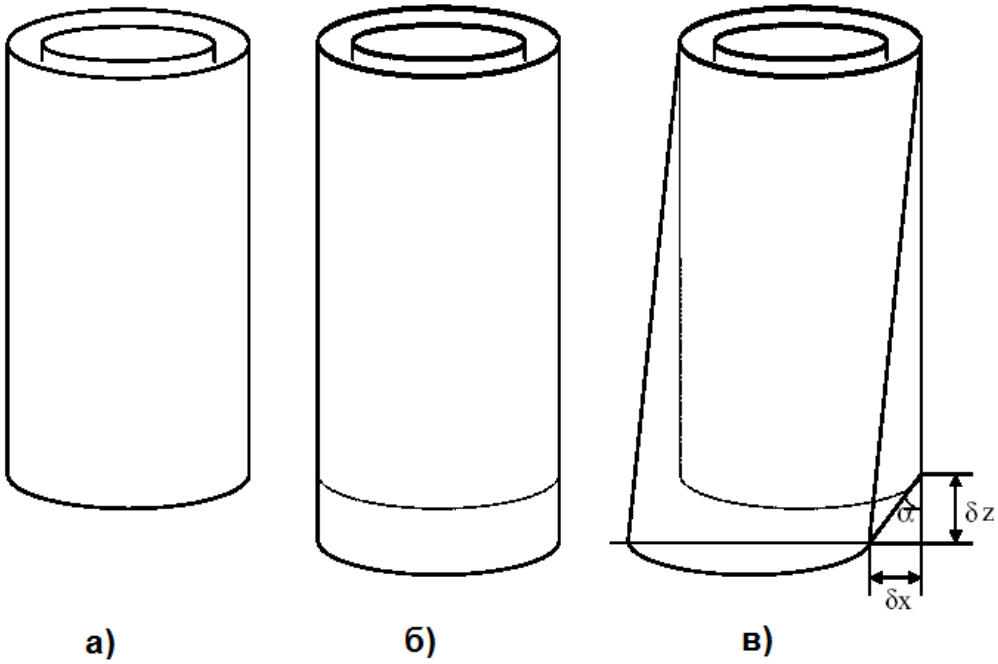


Рис. 9.4.2. Сканер и его работа:

а – общий вид сканера до приложения напряжения,

б – идеальная работа сканера,

в – реальная работа сканера

$$u_{xx} = \frac{\Delta x}{l_0} = d_{\perp} E_r ,$$

где l_0 – длина трубки в недеформированном состоянии.

Абсолютное удлинение пьезотрубки равно

$$\Delta x = d_{\perp} \frac{l_0}{h} V ,$$

где h – толщина стенки пьезотрубки, V – разность потенциалов между внутренним и внешним электродами.

Таким образом, при одном и том же напряжении V удлинение трубки будет тем больше, чем больше её длина и чем меньше толщина стенки.

Соединение трёх трубок в один узел (рис. 9.4.3) позволяет организовать прецизионные перемещения в трёх взаимно перпендикулярных направлениях. Такой сканирующий элемент называется триподом. Недостатками такого пьезосканера являются сложность изготовления и сильная асимметрия конструкции.

На сегодняшний день наиболее широко используются пьезосканеры, изготовленные на основе одного трубчатого элемента (см. рис. 9.4.4).

Материал трубки имеет радиальное направление вектора поляризации.

Внешний электрод обычно сплошной. Внутренний электрод сканера разделен по образующим цилиндра на четыре секции. При подаче противофазных напряжений на противоположные секции внешнего электрода (относительно внутреннего) происходит сокращение участка трубки в том месте, где направление поля совпадает с направлением поляризации, и удлинение там, где они направлены в противоположные стороны.

Это приводит к изгибу трубки в соответствующем направлении. Таким образом, осуществляется сканирование в плоскости XY. Изменение потенциала внутреннего электрода относительно всех внешних секций приводит к удлинению или сокращению трубки по оси Z. Таким образом, можно реализовать трехкоординатный пьезосканер на базе одной пьезот-

рубки. Реальные сканирующие элементы имеют часто более сложную конструкцию, однако принципы их работы остаются теми же самыми [2].

Широкое распространение получили также пьезосканеры на основе биморфных пьзоэлементов.

Биморф представляет собой две пластины пьезоэлектрика, склеенные между собой таким образом, что векторы поляризации в каждой из них направлены в стороны, противоположные подаваемому полю (рис. 9.4.5).

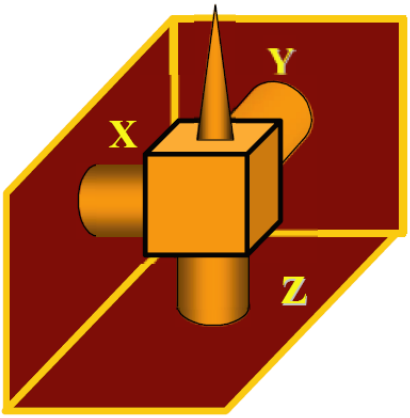


Рис. 9.4.3. Сканирующий элемент в виде трипода, собранный на трубчатых пьезоэлементах

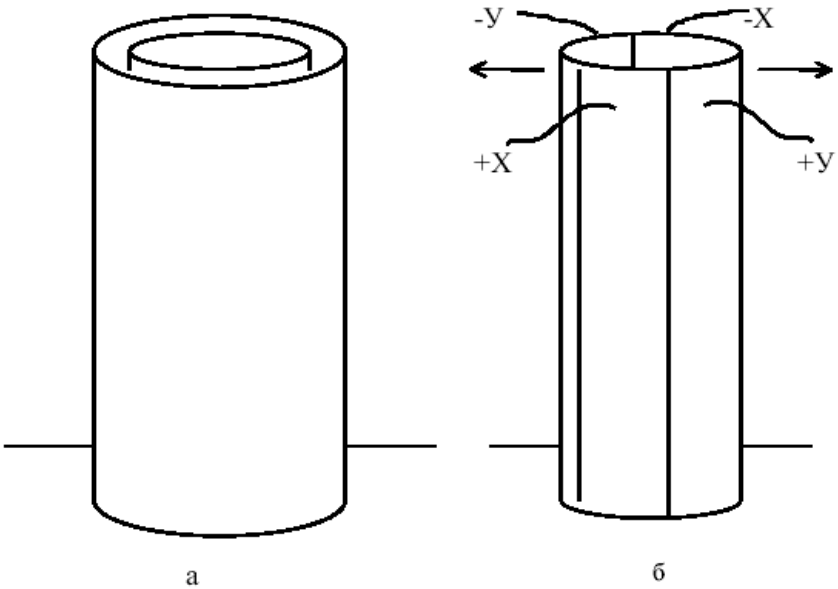


Рис. 9.4.4. Схематическое изображение сканера: а – внешний вид сканера; б – внутренняя трубка

Если подать напряжение на электроды биморфа, как показано на рисунке, одна из пластин будет расширяться, а другая сжиматься, что приведёт к изгибу всего элемента. В реальных конструкциях биморфных элементов создается разность потенциалов между внутренним общим и внешними электродами так, чтобы в одном элементе поле совпадало с направлением вектора поляризации, а в другом было направлено противоположно.

Изгиб биморфа под действием электрических полей положен в основу работы биморфных пьезосканеров. Объединяя три биморфных элемента, можно реализовать трипод на биморфных элементах (рис. 9.4.6).

Если внешние электроды биморфного элемента разделить на четыре сектора, то движение зонда по оси *Z* и в плоскости *XY* можно организовать на одном биморфном элементе (рис. 9.4.7).

Действительно, подавая противофазные напряжения на противоположные пары секций внешних электродов, можно изгибать биморф так, что зонд будет двигаться в плоскости *XY* (см. рис. 9.4.7,а,б). Изменяя потенциал внутреннего электрода относительно всех секций внешних электродов, можно прогибать биморф, перемещая зонд в направлении *Z* (см. рис. 9.4.7,в,г).

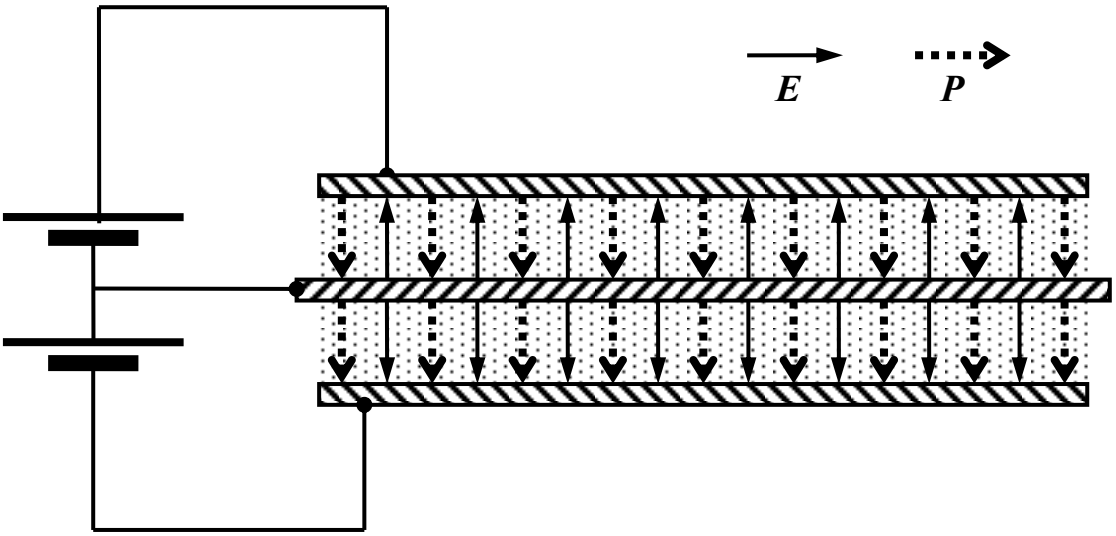


Рис. 9.4.5. Устройство биморфного пьезоэлемента

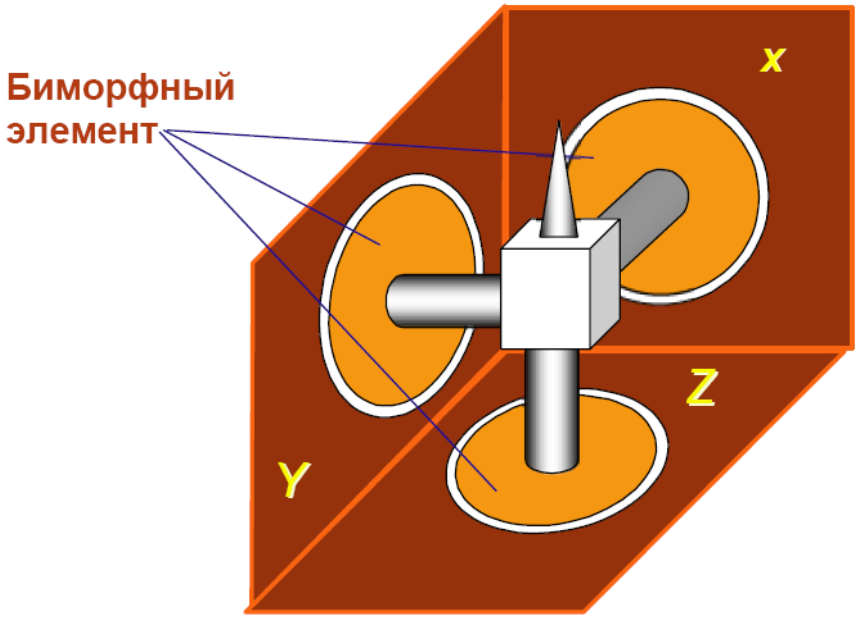


Рис. 9.4.6. Трёхкоординатный сканер на трёх биморфных элементах

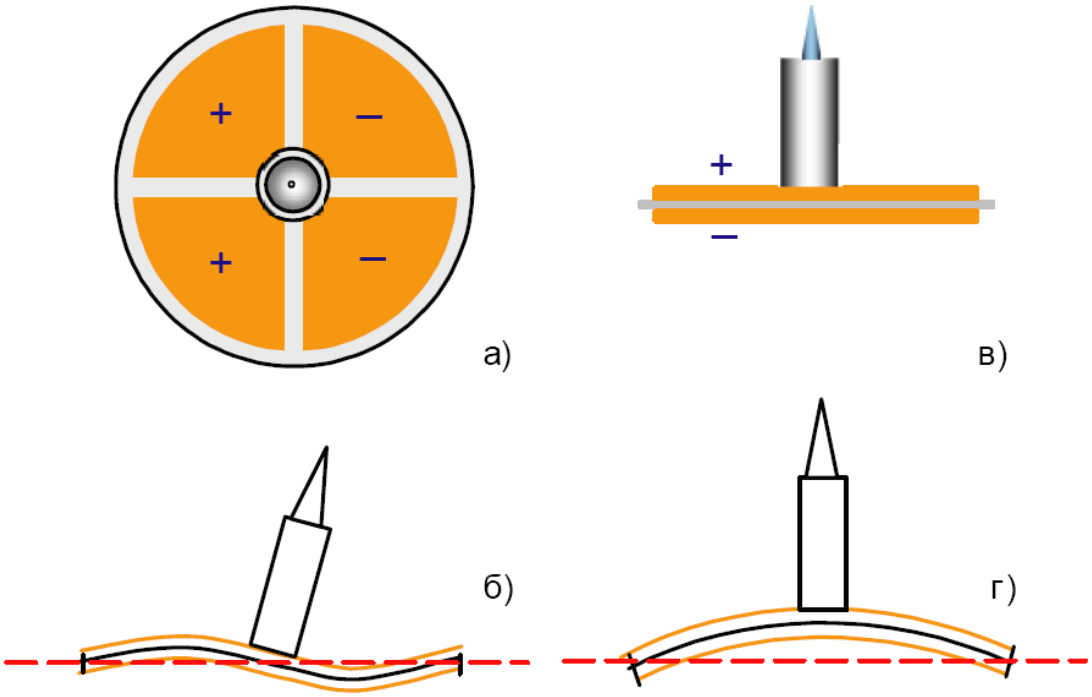


Рис. 9.4.7. Схематическое изображение работы биморфного пьезосканера

9.5. Пьезоэлектрический сканер зондового микроскопа

Практически во всех сканирующих зондовых микроскопах пьезоэлектрический сканер используется как очень тонкое позиционирующее устройство, для того чтобы перемещать зонд относительно образца или образец относительно зонда. Сканер обеспечивает два независимых движения: сканирование вдоль поверхности образца (в плоскости *XY*) и перемещение в направлении перпендикулярном к поверхности (по оси *Z*) [3].

Сканер зондового микроскопа перемещает зонд относительно образца по типу растровой картины как показано на рис. 9.5.1.

Сканер движется вдоль первой линии скана и обратно. Затем он смещается на шаг в перпендикулярном направлении на следующую линию сканирования, движется вдоль нее и обратно, затем смещается на третью линию и таким образом дальше. Путь отличается от традиционной растровой картины тем, что чередующиеся линии данных, измеряемых сигналов, не берутся в обратных направления. Измеряемые данные при сканировании собираются только в одном направлении, обычно называемым направлением быстрого сканирования, чтобы минимизировать ошибки регистрации, которые возникают из-за гистерезиса сканера. Перпендикулярное направление, в котором сканер перемещается от линии к линии, называется направлением медленного сканирования [4].

Пока сканер движется вдоль линии сканирования, данные изображения оцифровываются через одинаково расположенные интервалы. Данными является высота сканера по направлению *Z* для режима постоянной силы или режима постоянного тока. Для режима постоянной высоты данными являются отклонения кантилевера или туннельный ток.

Промежуток между точками данными называется шагом сканирования. Размер шага определяется полным размером сканирования и числом точек данных на одну линию. В типичном сканирующем зондовом микро-

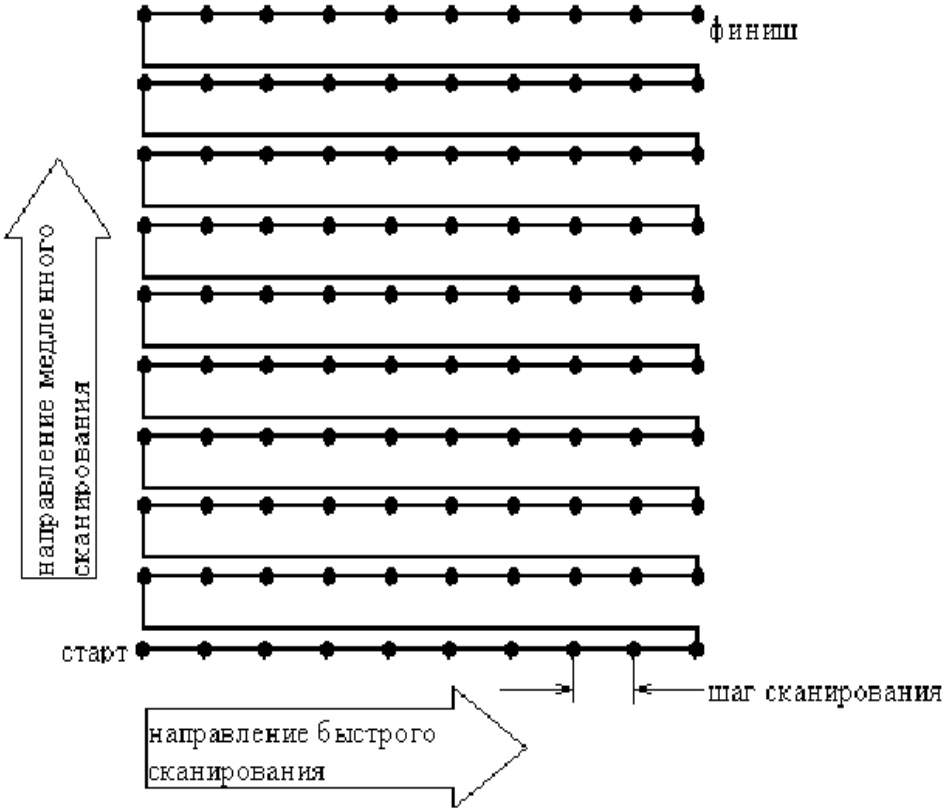


Рис. 9.5.1. Движение сканера СЗМ в плоскости (*X*, *Y*). Точками показаны места сбора информации

скопе размеры скана изменяются от 10 ангстрем до 100 микрон, и от 64 до 1000 точек данных на линию. Некоторые системы имеют 3000 точки данных на линию. Число линий устанавливается обычно равным числу точек на линии. Таким образом, идеальная установка данных соответствует квадратной сетке измерений [4].

ГЛАВА 10. МАТЕРИАЛЫ ПЬЕЗОСКАНЕРОВ

Пьезоэлектрический эффект был открыт в 1880 году Джексом и Пьером Кюри. Они заметили, что в некоторых кристаллах при механическом воздействии на них появляется электрическая поляризация, причем степень ее пропорциональна величине воздействия. Позже Кюри открыл инверсионный пьезоэлектрический эффект – деформирование материалов, помещенных в электрическое поле. Эти явления еще называют прямым и обратным пьезоэлектрическим эффектом [5].

Пьезоэлектрический эффект присущ некоторым природным кристаллам, таким как кварц и турмалин, которые в течение многих лет использовались в качестве электромеханических преобразователей. Кристаллическая решетка кристаллов, обладающих пьезоэлектрическим эффектом, не имеет центра симметрии. Воздействие (сжимающее или растягивающее), приложенное к такому кристаллу, приводит к поляризации после разделения положительных и отрицательных зарядов, имеющихся в каждой отдельной элементарной частице. Данный эффект практически линейный, поскольку степень поляризации прямо пропорциональна величине прилагаемого усилия. Соответственно, при помещении кристалла в электрическое поле упругая деформация вызовет увеличение или уменьшение его длины в соответствии с величиной и направлением полярности поля.

10.1. Основные понятия и определения

Выделяют следующие типы пьезоэффектов.

Прямой пьезоэффект – это появление электрических зарядов разного знака на противоположных гранях некоторых кристаллов – пьезоэлектриков – при их механических деформациях. При снятии механических напряжений кристалл приходит в ненаэлектризованное состояние. Если

изменить напрявление деформации, т. е. не сжимать, а растягивать пьезоэлектрик, то заряды на гранях изменят знак на обратный.

Обратный пьезоэффект – проявляется в способности некоторых диэлектриков механически деформироваться при наложении электрического поля.

Количественно пьезоэффект оценивают пьезомодулем, который зависит от пьезоэлектрических свойств материала и устанавливает пропорциональную зависимость между возникающим зарядом и приложенной силой.

Продольный пьезоэффект – возникает при действии на пластину сжимающих или растягивающих сил вдоль электрической оси, перпендикулярной к плоскости пластины.

Поперечный пьезоэффект – возникает при действии сжимающих или растягивающих сил вдоль механической оси на плоскости. При этом происходит электризация тех же граней, что и при продольном пьезоэффекте. Знак зарядов на гранях зависит от направления действия сжимающих или растягивающих усилий. При воздействии сил на пьезоэлемент вдоль оптической оси Z пьезоэффект не возникает.

Пьезоэлектрические материалы условно можно разбить на две группы:

а) Пьезоэлектрические монокристаллы.

Природные пьезоэлектрические материалы имеют достаточно высокую стоимость. В связи с этим потребности бурно развивающейся электроники в настоящее время удовлетворяются синтетическими пьезоэлектрическими монокристаллами, которые выращиваются в специальных установках. Пьезоэлектрические свойства таких кристаллов с достаточно высокой повторяемостью можно задавать путем композиции входящих в него компонентов.

Выращенные кристаллы определенным образом режутся на пластины, некоторые (сегнетоэлектрики) поляризуются, и из них путем шлифования и нанесения электродов изготавливаются пьезоэлектрические элементы.

б) Пьезоэлектрическая керамика (пьезокерамика).

По физическим свойствам это поликристаллический сегнетоэлектрик, представляющий собой химическое соединение или твердый раствор (порошок) зерен (кристаллитов) [6].

По химическому составу это сложный оксид, включающий ионы двухвалентного свинца или бария, а также ионы четырехвалентного титана или циркония. Путем изменения основного соотношения исходных материалов и введения добавок синтезируют разные составы пьезокерамики, обладающие определенными электрофизическими и пьезоэлектрическими характеристиками. Наибольшее распространение получила группа пьезокерамических материалов типа ЦТС (цирконата-титаната свинца). Вместе с тем используется керамика на основе титаната бария (ТБ) и титаната свинца (ТС). В последние годы разрабатываются новые пьезокерамические материалы со свойствами, позволяющими в некоторых случаях использовать их вместо более дорогостоящих пьезоэлектрических кристаллов. В частности, разработана и производится группа материалов на основе ниобата свинца, которая уже нашла практическое применение благодаря возможности ее использования в диапазоне частот до 30 и более МГц. Значительные исследования проводятся по созданию пьезокерамических композитных материалов, а также многослойной керамики. Зарубежные производители в зависимости от пьезоэлектрических свойств делят ее на сегнетожесткую и сегнетомягкую. В отечественной практике существует дополнительное деление на керамику средней сегнетожесткости, а также выделяются высокостабильные, высокотемпературные и т. п. материалы [6].

Качество пьезокерамики характеризуется следующими, принятыми за рубежом, основными параметрами:

K^T_{33} ($\varepsilon^T_{33}/\varepsilon_0$) – относительная диэлектрическая проницаемость;

tg δ – тангенс угла диэлектрических потерь при частоте 1 кГц в слабых полях;

T_c (T_k) – температура точки Кюри;

K_p, K_{33}, K_{31}, K_{15} – коэффициенты электромеханической связи;

d_{33} -d_{31}, d_{15} – пьезоэлектрические модули;

g_{33}, g_{31}, g_{15} – электрические коэффициенты по напряжению;

N_L, N_T, N_R – частотные постоянные;

$S^E{}_{11}$, $S^E{}_{33}$ – параметр эластичности;

ρ – плотность;

Q_m – механическая добротность.

Важнейшими природными материалами, обладающими пьезоэлектрическими свойствами, являются кварц и турмалин. Наряду с природными кристаллами в технике находят применение искусственные кристаллы: сегнетова соль, дигидрофосфат аммония и другие, называемые сегнетоэлектриками.

Сегнетова соль имеет очень высокий пьезомодуль (примерно в 150 раз больше пьезомодуля кварца). Однако, низкая механическая прочность и сильная зависимость свойств от температуры и влажности делают данный материал малопригодным для практических применений.

В последнее время широкое распространение получили сегнетоэлектрики в виде пьезокерамики титаната бария и его композиций (ниобата, цирконата-титанатов свинца и другие). Все они по сравнению с кварцем имеют большой пьезомодуль, механически прочны и, кроме того, могут быть изготовлены любой формы и размеров.

Из природных пьезоэлектрических материалов предпочтение отдают кварцу, который при удовлетворительных пьезоэлектрических свойствах нечувствителен к влажности, химическим и температурным воздействиям, имеет высокую механическую прочность, линейность, большой динамический диапазон.

В качестве пьезоматериалов в нанотехнике обычно используют пьезокерамику состава ЦТС (цирконат-титанат свинца). Эти составы отличаются наивысшей пьезоактивностью, повышенной устойчивостью к воздействию электрических нагрузок, стабильностью свойств во времени.

На основе указанных выше пьезокерамических материалов освоено производство пьезокерамических элементов традиционных геометриче-

ских форм в виде дисков, пластин, шайб, цилиндров.

Зависимость перемещения привода от управляющего сигнала $X = f(U)$ имеет характерный для пьезоэлектриков ярко выраженный гистерезис. В качестве примера пьезопреобразователя можно рассмотреть устройство на основе пьезостолбца с редуцирующим механизмом. Схема устройства и его характеристики приведены соответственно на рисунках 10.1.1 и 10.1.2. Пьезостолбец с активной длиной $l_A = 50$ мм выполнен из пьезокерамики ЦТС и состоит из дисков диаметром $D = 18$ мм и толщиной $h = 1$ мм. При этом диапазон перемещения пьезостолбца равен $\xi = 40$ мкм, диапазон перемещений равен $X = 200$ мкм при напряжении питания $U = 600$ В [7].

Для пьезопреобразователей характерен эффект последействия, которое заключается в возрастании деформаций пьезодвигателя при постоянной электриеской нагрузке. Например, для модуля (рис. 10.1.1) при воздействии постоянного напряжения U в течении 4 минут деформация пьезодвигателя в зависимости от величины и полярности напряжения достигает величины –1÷2,5 мкм. Этот эффект можно устранить подачей дополнительного напряжения на пьезодвигатель.

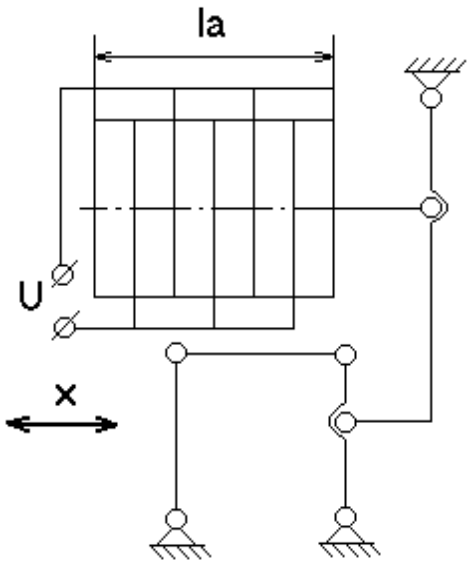


Рис. 10.1.1. Устройство на основе пьезостолбца с редуцирующим механизмом

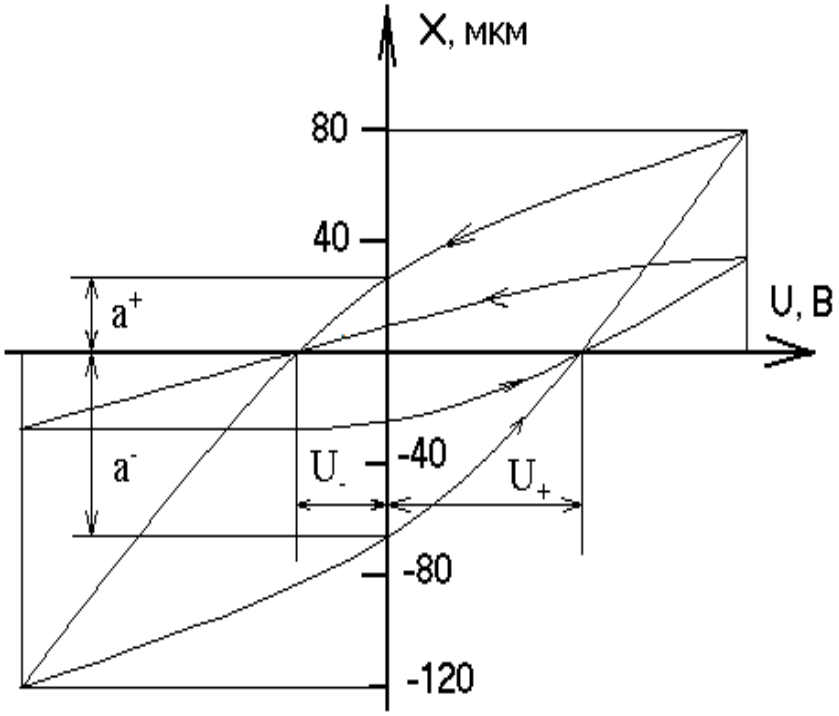


Рис. 10.1.2. Характеристики устройств на основе пьезостолбца с редуцирующим механизмом

10.2. Основные зависимости для пьезопреобразователя

Характеристики пьезопреобразователя выражаются простейшими соотношениями (рис. 10.2.1):

$$E_i = g_{in} \times \sigma_n = -\, h_{in} \times \varepsilon_n; \qquad (10.2.1)$$

$$\varepsilon_n = d_{kn} \times E_k; \qquad (10.2.2)$$

$$\sigma_n = C_{nn} \times \varepsilon_n; \qquad (10.2.3)$$

$$U_i = E_i \times l_i; \qquad (10.2.4)$$

$$C_n = \varepsilon_r \times \varepsilon_0 \times F_x / l_n, \qquad (10.2.5)$$

где E_i и E_k – напряженность поля в кристалле в направлении осей i и k в в/м;

σ_n – механическое напряжение в кристалле вдоль оси n в Н/м^2;

ε_n – относительная деформация кристалла вдоль оси n;

U_i – напряжение на гранях кристалла вдоль оси i в В;

C_n – емкость кристалла между обкладками, расположенными на гранях, перпендикулярных оси n;

l_n и l_i – размер пластины вдоль оси i и n (обычно это толщина пластины t) в м;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость (ε_0=8,85·10^{-12} Ф/м – электрическая постоянная);

F_x – площадь обкладки конденсатора в м^2;

g_{in}, d_{kn}, C_{nn} – пьезокоэффициенты.

Индексы i, k, n соответствуют направлениям осей или плоскостям, при этом цифрам 1, 2 и 3 соответствуют направления осей X, Y и Z, цифрам 4, 5 и 6 – плоскости ZY, ZX и XY. Первый индекс характеризует приложенное воздействие, второй – полученный результат. Так, у коэффициента g_{12} индекс 1 означает, что пластина деформируется вдоль оси X, а напряженность поля измеряется вдоль оси Y. У коэффициента d_{36} индекс 3 означает, что электрическое поле приложено вдоль оси Z. Индекс 6 означает, что кристалл претерпевает сдвиг в плоскости XY [8].

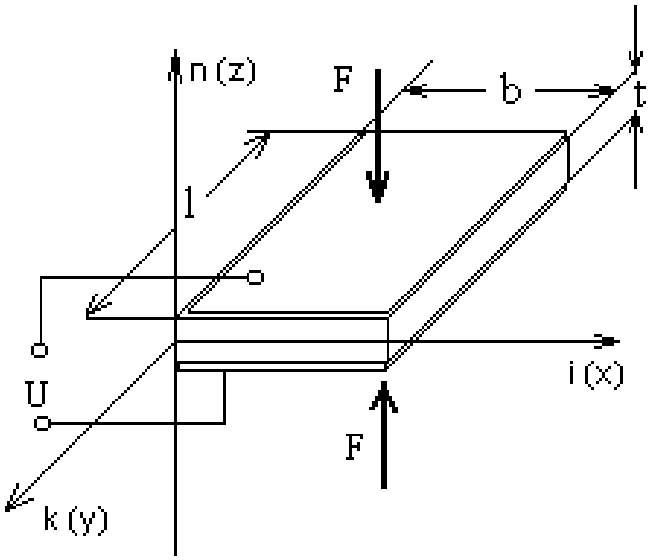


Рис. 10.2.1. Пьезоэлемент

Для пьезоэлектрического материала характерно появление поляризационного заряда при его механической деформации и наоборот, если пьезоэлектрический материал внести в электрическое поле, то можно наблюдать изменение его длины. Электрическая поляризация $P = D\text{-}\varepsilon_0 E$, которая связана с поверхностным зарядом, в первом приближении увеличивается линейно относительно механического напряжения σ. Материальный закон выражен так:

$$D = P + \varepsilon_0 E = d\sigma. \qquad (10.2.6)$$

Электрическое смещение D и напряжённость поля E - векторы, механическое напряжение σ и деформация ε – это тензоры второго ранга. Следовательно, пьезоэлектрический коэффициент d – тензор третьего ранга. Так как тензор напряжения симметричен, тензор пьезоэлектрического коэффициента в общем случае имеет 3×6=18 независимых компонент. В компонентном представлении мы получаем следующие отношения:

$$D = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} d_{12} d_{13} d_{14} d_{15} d_{16} \\ d_{21} d_{22} d_{23} d_{24} d_{25} d_{26} \\ d_{31} d_{32} d_{33} d_{34} d_{35} d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \qquad (10.2.7)$$

Индексы 1,2,3 относятся к кристаллическим параметрам и из можно совместить с координатными направлениями x, y, z при соответствующей ориентации. Например, положительное значение означает, что растягивающее напряжение в направлении z ведёт к положительному заряду на поверхности лежащей в направлении z.

Обратный или косвенный пьезоэлектрический эффект даёт соотношение между напряжённостью электрического поля E и механической деформацией ε:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} d_{21} d_{31} \\ d_{12} d_{22} d_{32} \\ d_{13} d_{23} d_{33} \\ d_{14} d_{24} d_{33} \\ d_{15} d_{25} d_{35} \\ d_{16} d_{26} d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \qquad (10.2.8)$$

Коэффициенты d_{ij} тождественны прямому пьезоэлектрическому эффекту. Электрострикция определяется как эффект второго порядка, она зависит от квадрата напряжённости электрического поля, и описывается тензором четвёртого ранга:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11} d_{21} d_{31} \\ d_{12} d_{22} d_{32} \\ d_{13} d_{23} d_{33} \\ d_{14} d_{24} d_{33} \\ d_{15} d_{25} d_{35} \\ d_{16} d_{26} d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_{11} \gamma_{12} \gamma_{13} \gamma_{14} \gamma_{15} \gamma_{16} \\ \gamma_{21} \gamma_{22} \gamma_{23} \gamma_{24} \gamma_{25} \gamma_{26} \\ \gamma_{31} \gamma_{32} \gamma_{33} \gamma_{34} \gamma_{35} \gamma_{36} \\ \gamma_{41} \gamma_{42} \gamma_{43} \gamma_{44} \gamma_{45} \gamma_{46} \\ \gamma_{51} \gamma_{52} \gamma_{53} \gamma_{54} \gamma_{55} \gamma_{56} \\ \gamma_{61} \gamma_{62} \gamma_{63} \gamma_{64} \gamma_{65} \gamma_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1^2 \\ E_2^2 \\ E_3^2 \\ E_2 E_3 \\ E_3 E_1 \\ E_1 E_2 \end{pmatrix} \qquad (10.2.9)$$

Для пьезоэлектрического эффекта характерно, что изменение направления электрического поля вызывает переход растягивающего напряжения в сжимающее напряжение. Эффект электрострикции связан с квадратом напряжённости электрического поля и значит не зависит от полярности. В зависимости от кристаллической структуры, некоторые пьезоэлектрические коэффициенты станут нулевыми или их можно приравнять друг к другу. Фактический вид тензора для пьезоэлектрического материала определяется тем кристаллографическим классом, к которому материал принадлежит. Кристаллический кварц относится к тригональному классу: $d_{11}=-d_{12}$; $d_{14}=-d_{25}$; $d_{26}=-2d_{11}$, а остальные коэффициенты исчезают. Оксид цинка и нитрид алюминия принадлежат к гексагональному классу, где только коэффициенты $d_{31}=d_{32}$; $d_{24}=-d_{15}$ и d_{33} отличны от нуля. Кристаллы

обладающие центральной симметрией (как кремний) или изотропные материалы не проявляют пьезоэлектрический эффект, однако, электрострикция имеет место во всех таких материалах, включая изотропные.

Особенно высокий пьезоэлектрический коэффициент проявляет сегнетоэлектрическая керамика с кристаллической структурой ABO_3 (рис. 2.4). A и B – это двухвалентные и трёхвалентные элементы, например, $BaTiO_2$, $PbTiO_3$, $PbZrO_3$. Для этих материалов эффектом электрострикции можно пренебрегать при напряжённости поля $E<10^3$ В/м.

Одной из особенностей любого сегнетоэлектрического материала является то, что он изменяет свои свойства в точке Кюри T_c. При температуре $T>T_c$ кристалл не проявляет себя как сегнетоэлектрик, однако, до тех пор, пока $T<T_c$ он сегнетоэлектрик. Большинство кристаллов могут находиться в различных кристаллических фазах, которые устойчивы при различных температурах и диапазонах давлений. Переход между фазами сопровождается изменением термодинамических характеристик (упругости, оптических и тепловых свойств, объема, энтропии, и т.д.). Во время перехода атомы перемещаются таким образом, что кристалл сменяет один кристаллический класс на другой. Вообще переход происходит при различных температурах, при нагревании и охлаждении (температурный гистерезис). Фазовый переход первого порядка отличается сильными и резкими изменениями в кристаллической структуре. В течение перехода второго порядка, изменения менее сильны и переход непрерывен. Фазовые переходы второго порядка не обладают температурным гистерезисом. Фазовые переходы часто сопровождаются наличием новых физических явлений (сегнетоэлектричество, ферромагнетизм, сверхпроводимость). Для $BaTiO_2$ точка Кюри равняется 120°С. Выше этой температуры $BaTiO_2$ принадлежит кубическому кристаллическому классу и теряет таким образом свои сегнетоэлектрические и пьезоэлектрические свойства, ниже точки Кюри кристалл тетрагональный, от 0 и до -70°С дальнейшие фазовые переходы происходят от орторомбического к тригональному кристаллическому классу.

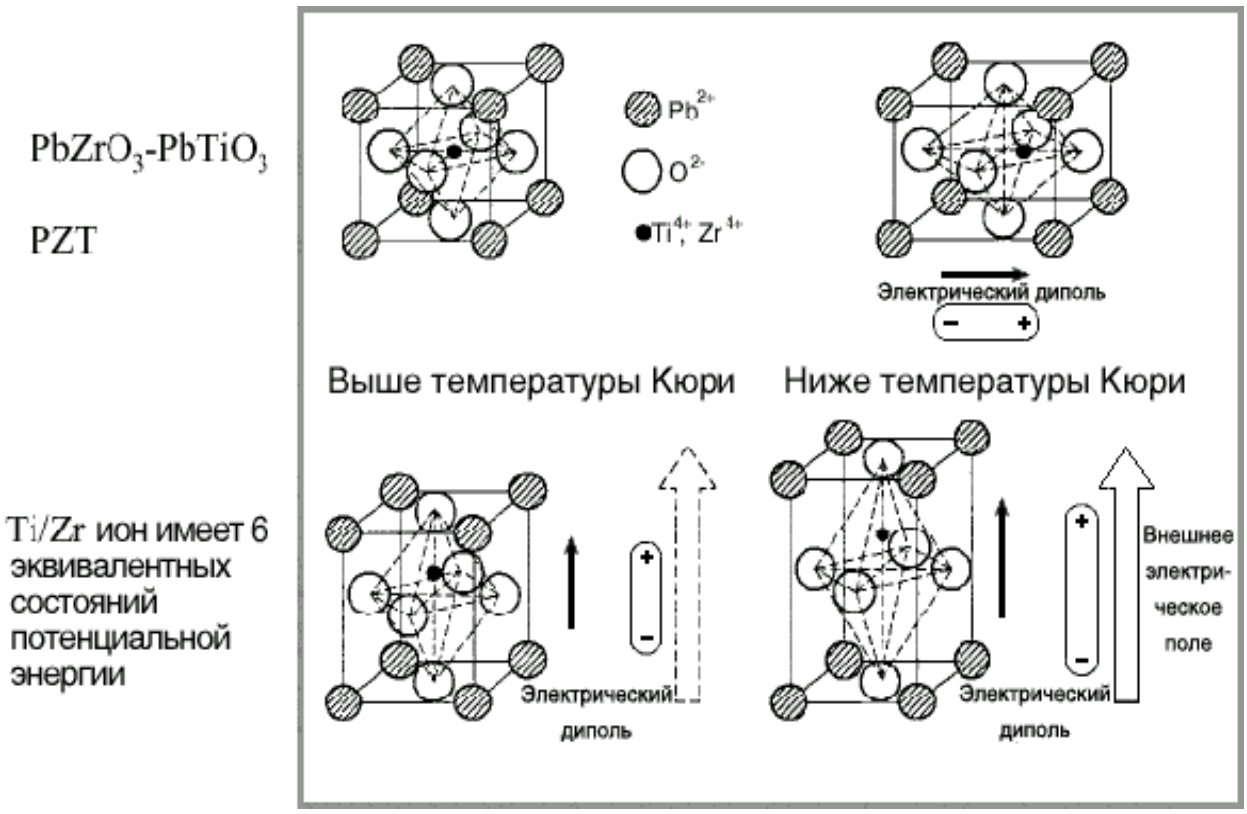


Рис. 10.2.2. Элементарные диэлектрические решётки

Смена кристаллической группы симметрии, связанной с фазовым переходом, становится причиной появления новых коэффициентов в тензоре материала. Материалы, с пригодным для использования коэффициентом продольной деформации, охватывают минералы, монокристаллические веще ства и полимеры. Обычно пьезоэлектрический эффект наиболее ярко выражен в монокристаллических веществах. Среди материалов годных к использованию в микросистемах, пьезоэлектрический коэффициент обычно лежит в диапазоне $1 \div 100 \times 10^{-12}$ м/В.

При максимальной напряжённости поля $E=10^7$ В/м относительная продольная деформация лежит в диапазоне $\varepsilon_r = 10^{-3} \div 10^{-5}$. В результате достижимый диапазон управления мал, но при помощи напряжения можно очень точно управлять перемещением. В отличие от большинства других принципов активации, нельзя достигнуть более низкого предела, получаемого на атомном уровне. Эта особенность используется в растровом туннельном микроскопе или в микроскопе атомной силы, для получения разрешения ниже, чем атомный диаметр $10^{-10} \div 10^{-12}$ m.

Электромеханический коэффициент связи k_p показывает ту долю механической энергии, которая преобразуется в электрическую энергию. Это относится как к прямому, так и к обратному пьезоэлектрическому эффекту.

$$k_p^2 = \frac{\text{Преобразования энергия}}{\text{Накопленная энергия}}$$

Для эффективного преобразования энергии, естественно, должен быть достигнут высокий коэффициент связи. Однако коэффициент связи нельзя приравнивать к эффективности. Так как в принципе возможно восстановление накопленной энергии, эффективность может быть намного больше коэффициента связи.

10.3. Основные характеристики пьезоэлектрических материалов

Характеристики пьезокерамических материалов представлены в табл. 10.3.1.

$\varepsilon_{33}^T/\varepsilon_0$ – Относительная диэлектрическая проницаемость.

$tg\ \delta$ – Тангенс угла диэлектрических потерь в слабых полях, не более.

k_p – радиальный коэффициент электромеханической связи.

d_{33} – Пьезоэлектрический модуль d_{33} в квазистатическом режиме пКл/Н.

d_{31} – Пьезоэлектрический модуль d_{31} в квазистатическом режиме пКл/Н.

Q_M – механическая добротность.

T_k – Температура Кюри, ^oC.

Таблица 10.3.1.

Характеристики пьезокерамических материалов

материал	Электрофизические свойства							
	$\varepsilon_{33}^{T}/\varepsilon_0$	tg δ	k_p	d_{33}, пКл/Н	$-d_{31}$, пКл/Н	Q_M	T_k, °С	Производитель
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Состав 3-1	400	0.01	0.03	90	5	10	460	Россия
PZ–35	220	0.006	—	100	—	15	500	«Ferroperm Piezoceramics», Дания
VP–M18	300	—	0.10	85	15	15	400	«Valpey–Fisher Corp.», США
VP–M58	800	—	0.30	180	65	15	400	«Valpey–Fisher Corp.», США
PMN–1	275	0.01	—	65	27	15	495	«Vernitron», США
PMN–2	240	0.01	—	70	32	10	450	«Vernitron», США
BM–900	300	0.01	0.07	75	10	15	490	«Sensor Technology Ltd», Канада
BM–940	700	0.01	0.02	180	40	15	280	«Sensor Technology Ltd», Канада
100	300	0.01	—	85	—	20	450	«SPK Electronics Co. Ltd», Тайвань
“сегнетомягкие” материалы	PZTS-1	2200±200	<0.02	0.65	>600	>200	>60	—	—
	PZTS-2	2300±200	<0.02	0.66	—	>210	>60	—	—
	PZTS-3	4100±400	<0.02	0.62	>700	>300	>40	—	—
	PZTS-4	4400±400	<0.05	0.65	>1000	>300	>20	—	—
	PZTS-5	5500±500	<0.05	0.63	>1000	>300	>20	—	—
	PZTS-6	6000±500	<0.05	0.65	>1000	>350	>20	—	—

Таблица 10.3.1. (продолжение)

1		2	3	4	5	6	7	8	9
материалы ср. “жесткости”	PZTI-1	2200±200	<0.0008	0.58	>350	>180	>450	—	—
	PZTI-2	1800±150	<0.005	0.60	—	>150	>500	—	—
“сегнетожесткие” материалы	PZTH-1	1400±140	<0.006	0.55	>300	>140	>800	—	—
	PZTH-2	1000±200	<0.009	0.50	>230	>90	>800	—	—
	PZTH-3	1000±100	<0.008	0.52	>300	>100	>900	—	—
	PZTH-4	1400±150	<0.006	0.57	>300	>120	>800	—	—
	PZTH-5	500±50	<0.007	0.52	>200	>70	>1100	—	—
	PZTH-6	470±40	<0.007	0.57	—	—	>1600	—	—
	PZTH-7	350±20	<0.006	0.22	—	—	>1900	—	—
	PZTH-8	260±25	<0.006	0.27	—	—	>2300	—	—
	PZTH-9	650±100	<0.008	0.52	—	—	>850	—	—
ЦТС-19М		1900±100	0.025	0.62	450±50	180±30	90	300	Россия
ЦТС-19		1700±200	0.03	0.55	350	160	80	290	Россия, Элпа
ЦТС-26		1700	<2.0	0.60	350	170	70	350	Россия, Элпа
ЦТС-26М		1700	<2.0	0.60	340	160	80	350	Россия, Элпа
ЦТС-36		670	<2.5	0.57	220	90	80	350	Россия, Элпа
НЦТС-1		4000	<2.5	0.60	550	260	50	175	Россия, Элпа
НЦТБС-1		5700	<2.8	0.62	650	310	40	140	Россия, Элпа
ЦТС-45		1750	<2.0	0.61	380	180	75	330	Россия, Элпа
ЦТС-46		2100	<2.0	0.61	430	190	70	260	Россия, Элпа
ЦТС-83Г		1200±100	0.025	—	300±20	160	—	360	Россия, Пьезоприбор

Таблица 10.3.1. (продолжение)

1	2	3	4	5	6	7	8	9
ЦТСБ	850±100	0.008	—	120±20	—	—	370	Россия, Пьезоприбор
ТВ-2	140±20	0.03	—	15±2	—	—	650	Россия, Пьезоприбор
ТВ-3	140±20	0.02	—	16±2	—	—	650	Россия, Пьезоприбор
НТВ-1	130	—	—	25±1	—	—	550	Россия
НТВ-2	140	0.0065	—	26±2	—	—	660	Россия, Пьезоприбор
ТНВ-1	105±15	0.02	—	10±2	—	—	930	Россия, Пьезоприбор
ТНВ-2	150	0.008	—	13±1	—	—	950	Россия, Пьезоприбор
ПКП-50	900±100	—	—	165±15	55±5	—	350	Россия
ТС-4	500	—	—	90±10	35±5	—	400	Россия
ЦТСтБС-1	4100	0.027	0.65	600	290	50	170	Россия, “Аврора-Элма”
ЦТС-24	900	0.0075	0.50	340	100	500	270	Россия, “Аврора-Элма”
ЦТС-24М	1050	0.0075	0.52	255	100	200	280	Россия, “Аврора-Элма”
ЦТССт-3	1400	0.008	0.53	290	130	800	280	Россия, “Аврора-Элма”
ЦТБС-3	2325	0.012	0.52	360	160	200	180	Россия, “Аврора-Элма”
ЦТСНВ-1	2325	0.022	0.59	425	200	60	240	Россия, “Аврора-Элма”
ПКВ-460	1450	0.003	0.59	215	145	1200	295	Россия, “Аврора-Элма”

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВАМ 9 И 10.

1. Смирнов А. Б. Мехатроника и робототехника. Системы микроперемещений с пьезоэлектрическими приводами – СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. - 164 с.
2. Миронов. В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. – Н. Новгород: Российская академия наук. Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.
3. Howland Rebecca, Benatar Lisa. A Practical Guide to Scanning Probe Microscopy / Project Editor and Booklet Designer: Christy Symanski // Copyright 1996 by Park Scientific Ihsnruments. – 76 p.
4. Быков В.А. Приборы и методы сканирующей зондовой микроскопии для исследования и модификации поверхностей. – Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н., – М.: ГНЦ НИИ физических проблем имени Ф.В. Лукина, 2000. – 393 с.
5. Рабек Я. Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике. В 2-х томах. Т. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 608 с.
6. Смажевская Е.Г., Фельдман Н.Б. Пьезоэлектрическая керамика. М.: Изд-во «Советское радио», 1971. – 200 с.
7. Михайлов В.П. Автоматизация управления процессами сверхточного позиционирования линейных модулей реологического типа. – Дисс. на соиск. уч. ст. д.т.н. – М.: МГТУ им Н.Э. Баумана, 2003 – 291 с.
8. Расчёт и конструкция деталей аппаратуры САУ. Учебник для техникумов / В.П. Савостьянов, Г.А. Филатова, В.В. Филатов – М.: Машиностроение, 1982. – 328 с.

ГЛАВА 11. ОСОБЕННОСТИ СОЗДАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ АВТОМАТИЗИРОВАННОЙ СИСТЕМЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПЬЕЗОСКАНЕРОВ

11.1. Структура информационной технологии проектирования пьезосканеров на этапах предварительной разработки

Главным вопросом исследования является разработка структуры информационной технологии создания пьезосканеров на ранних этапах проектирования согласно определению информационной технологии [1]. В её основу положены методы проектирования и программно-технологические средства, объединённые в технологическую цепочку, обеспечивающие сбор, обработку, хранение, распространение и отображение информации.

Необходимым программным средстваом, должна стать проблемно-ориентированная автоматизированная система комплексного анализа конструкций ПС, которая является инструментарием проектировщика в рамках предлагаемой информационной технологии.

На рис. 11.1.1 представлена структура информационной технологии ранних этапов проектирования ПС. В первую очередь осуществляется сбор необходимой для расчётов информации по справочникам. Затем следует обработка входной информации, включающая комплексный расчёт на ЭВМ механических характеристик конструкции ПС (статический, динамический, прочностной и оптимизированные параметры конструкции). Как исходные данные, так и результаты расчётов должны быть сохранены в базе данных [1].

База данных должна быть построена по иерархическому признаку. Между параметрами ввода, вывода необходимо обеспечить связь по средством взаимодействия с БД. Кроме этого следует также обеспечить обмен

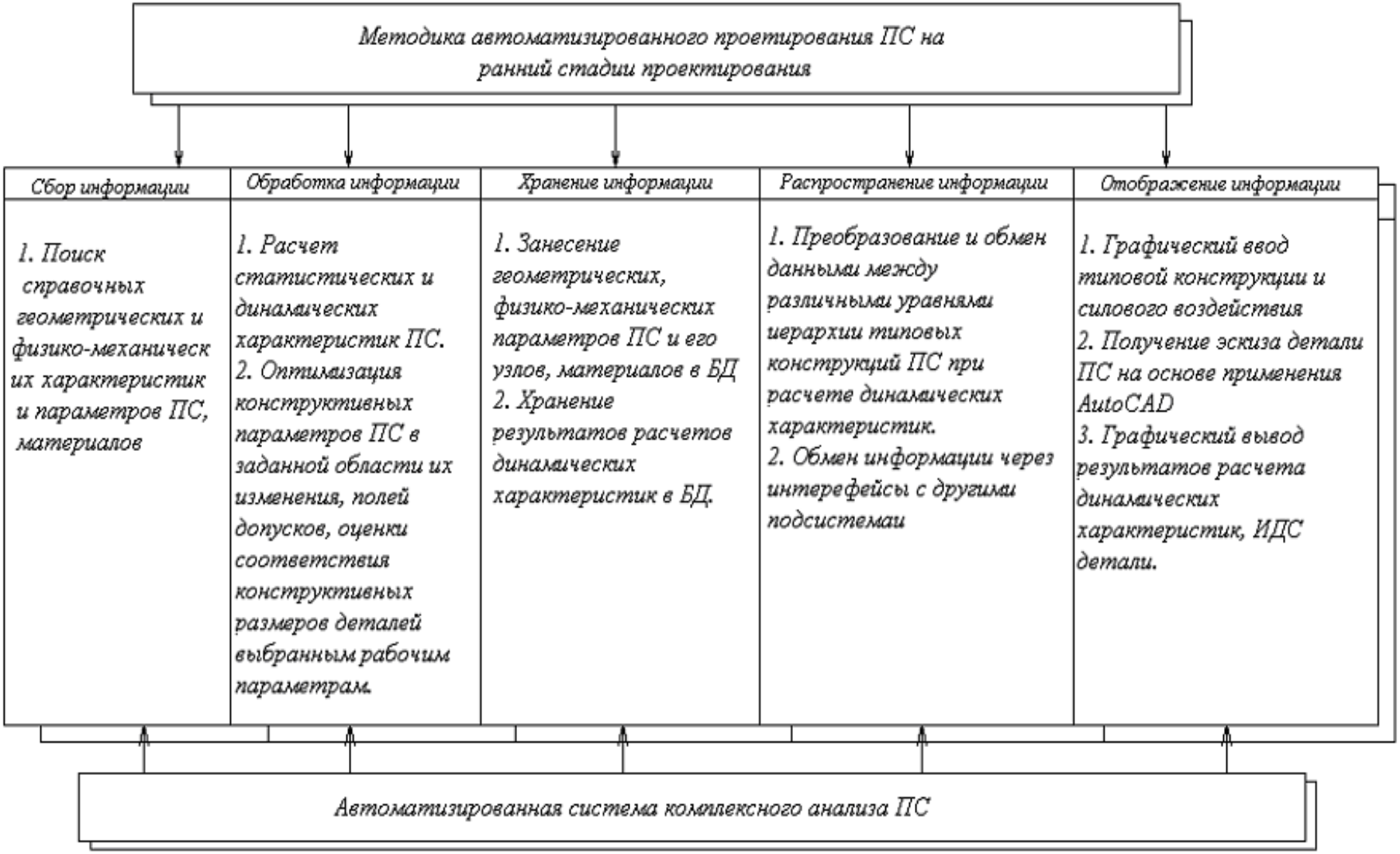


Рис. 11.1.1. Структура информационной технологии ранних этапов проектирования ПС

информации через интерфейсы с другими системами. Для осуществления ввода в ЭВМ модели конструкции и воздействующих на неё внешних и внутренних факторов, а также принятие решения по результатам расчётов необходимо отображать в графическом виде входную и выходную информацию на экране компьютера.

Структура процесса проектирования пьезосканеров

Прогресс производства, в современных условиях, связывают с достижениями в области автоматизированного проектирования. Поскольку проектирование и разработка технологии является ступенью производства (логическим уровнем), то прогресс на этой ступени также должен определяться автоматизацией.

При неавтоматизированном проектировании результат во многом определяется инженерной подготовкой конструкторов, их производственным опытом, профессиональной интуицией и другие факторами [3, 10].

В настоящее время проектирование конструкций ПС ведётся на основе неавтоматизированного подхода. Данный подход и проектирование включает в себя два уровня. Первый, проектирование ПС производится на основе новой разработки и второй – проектирование ПС выполняется согласно прототипу. В основном, наибольшее применение получил второй уровень, который и будет рассмотрен ниже.

Второй уровень задается ГОСТом или ОСТом данной отрасли промышленности, уточняется на конкретном предприятии и представляет собой довольно трудоёмкий процесс, традиционно состоящий из следующих этапов: согласование технического задания, техническое предложение, эскизный проект, рабочий проект, изготовление опытных образцов, испытания (рис. 11.1.2) [1, 3].

Разберём последовательность и содержание начальных стадий про-

цесса проектирования, к которым традиционно относится согласование технического задания, техническое предложение и эскизный проект.

Этап согласования технического задания обычно реализуется во взаимодействии предприятия-“заказчика” (заказчик) и предприятия-“проектировщика” (конструктор). Заказчик стремится получить от конструктора всё, что он хотел бы воплотить в проекте. Конструктор исходит из конкретных существующих и необходимых возможностей проектного предприятия, запасов ресурсов на непредвиденные случаи, а также предварительных заделов по аналогичным разработкам, которыми он располагает (блок 1). Конструктор должен вначале определиться с аналогом (блок 2), выбрав схемы решений и найти ПС близкий по характеристикам к разрабатываемой конструкции. Это достаточно трудоёмкий процесс работы с документацией. Данный этап реализован в виде блоков 2 и 3. Автоматизацию можно применить для блока 1.

Этап технического предложения предназначен для исследования и разработки принципов построения ПС, определения путей и способов проектирования (блок 4). На этом этапе формируются чертежи общих видов (“деталировочные”), осуществляются предварительные расчёты и оценки динамических, точностных и других характеристик ПС. Здесь конструктор решает вопросы изготовления деталей и сборки всего изделия. Затем проводятся расчёты новых размеров на основании технического задания и расчёты узлов на прочность узлов ПС (блок 5). Расчёты производятся на основе эмпирических формул, что ведёт к многообразию возможных решений, в зависимости от констант. Выбор необходимого решения зачастую происходит достаточно субъективно. Далее разработчик либо проводит исследования математической модели движения, либо пропускает этот этап. Реализация данного этапа выполняется в виде блоков 4, 5, 6. С точки зрения автоматизации данный этап является одним из наиважнейших, так как именно на этом этапе определяется целесообразность принятия реше ния по проектированию конструкции ПС. Кроме этого, практически все -

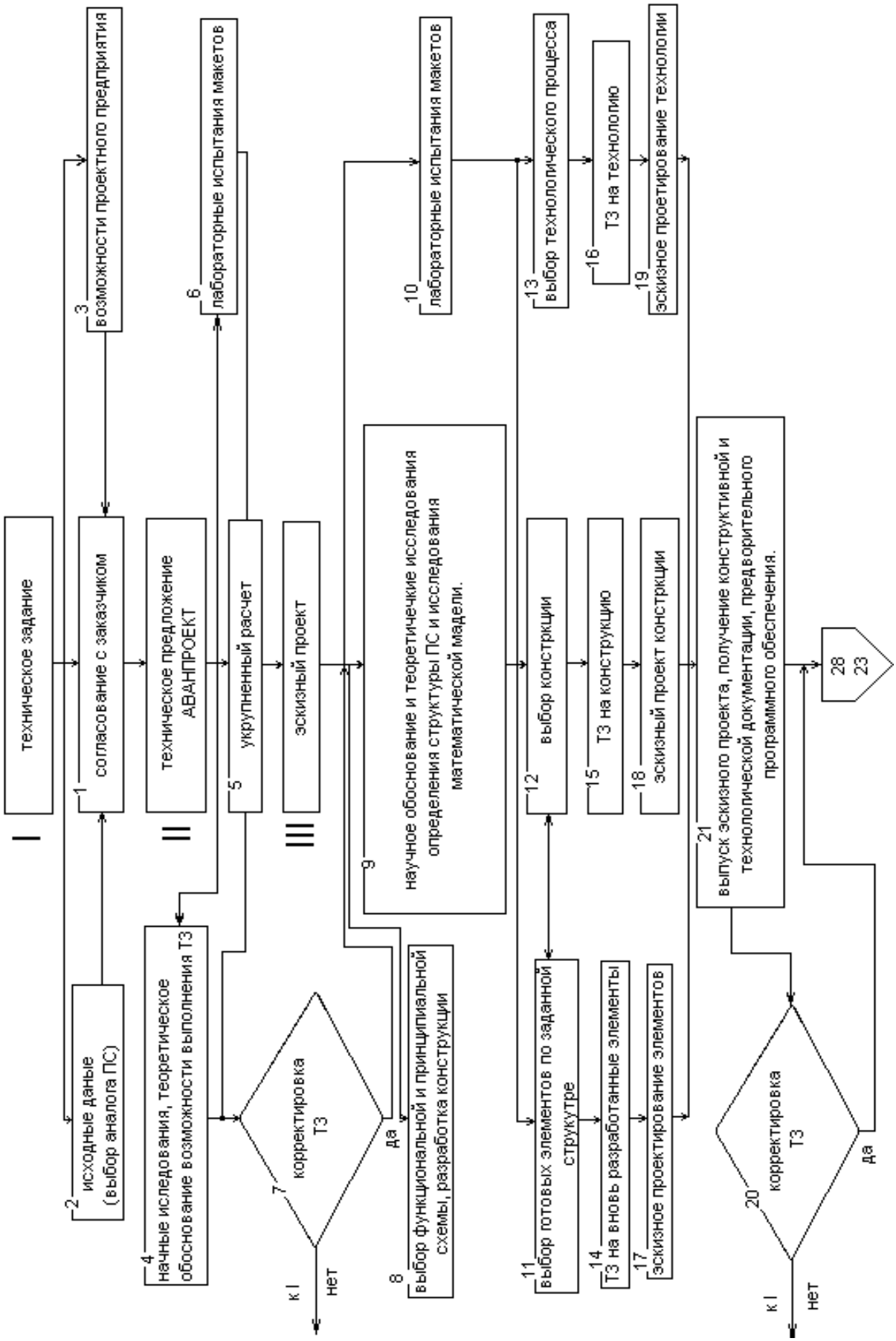


Рис. 11.1.2. Проектирование ПС согласно прототипу

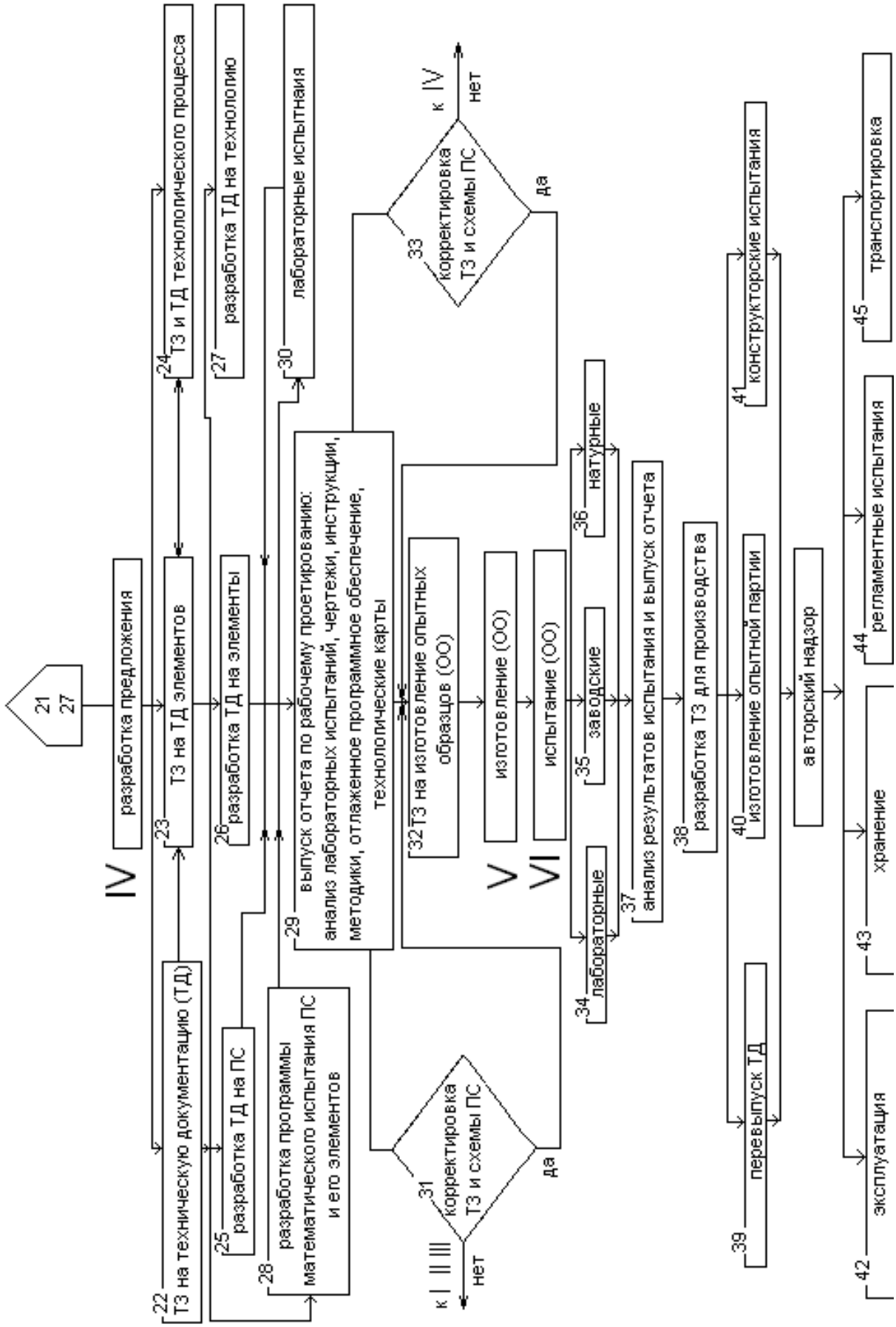


Рис. 11.1.2. Проектирование ПС согласно прототипу (продолжение)

блоки этапа, кроме блока 6, могут быть автоматизированы [1].

Этап эскизного проектирования (ЭП) начинается с результатов предыдущего этапа и заканчивается конструктивной схемой ПС и его узлов (блок 21). Именно конструктивные схемы, выбранные и детально обоснованные на этом этапе расчётами, моделированием, испытаниями на макетах, служат основой для разработки конструкторской и технической документации по изготовлению ПС и его деталей и узлов. Конструктивные схемы являются неотъемлемой частью проекта, что качественно отличает этот этап от предыдущего.

На этапе ЭП осуществляется декомпозиция (разбиение) ПС на устройства, а устройства – на элементы (блок 8). Ведётся сложная кропотливая разработка и взаимная увязка этих устройств и элементов. Здесь критерии, условия и ограничения носят более детальный и конкретный характер. При этом сроки проектирования и стоимость разработки уменьшаются. Документация, выпускаемая на этом этапе, носит временный характер и служит для изготовления отдельных экспериментальных макетов и образцов устройств ПС. Такая документация содержит эскизы конструкций, технологические карты, монтажные схемы, условия технической эксплуатации и др. По этой эскизной документации на опытном производстве изготавливают макеты деталей и узлов ПС. Макеты объединяются в комплексные стенды, на которых начинается реализация наиболее трудоёмких и сложных проектных процедур ПС – анализ отдельных его устройств и элементов – методами стендовых испытаний и физического моделирования.

Кроме этого, на этапе эскизного проектирования составляется математическая модель, алгоритмы и решаются задачи анализа и синтеза ПС, оптимизации его параметров, вырабатываются вычислительные алгоритмы (блоки 9, 11, 12).

В дальнейшем проводятся конструкторские расчёты устройств ПС на прочность, жёсткость, предварительное согласование габаритных, установочных и присоединительных размеров изделия. Предварительно производят

оценку показателей качества изделия, осуществляют и рассчитывают надёжность, проводят детальное технико-экономическое обоснование проекта.

Последний из предлагаемых этапов наиболее длинный и содержит 14 различных блоков. Если обратить внимание на структуру схемы, то можно заметить, что с левой стороны расположены блоки, которые отвечают за документооборот, в середине находятся блоки, выполняющие основную задачу процесса проектирования, а именно, выбор, расчёт и анализ, а справой стороны расположены блоки, отвечающие за испытания и технологию. Для автоматизации процесса эскизного проектирования целесообразно автоматизировать блоки 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18 и 21.

Проведённый анализ процесса проектирования ПС позволяет перейти к решению одной из важных задач при создании ИТ – выбору проектных процедур, подлежащих автоматизации. Для решения этой задачи необходимо формализовать процесс проектирования и составляющей его математической модели, с тем чтобы обоснованно и во взаимосвязи проводить автоматизацию проектных процедур.

Следует особо подчеркнуть проблемы, которые появляются при проектировании ПС, а именно [3, 4]:

1. Сложность и уникальность деталей ПС, конструирование которых осуществляется в трёхмерном пространстве.
2. Обеспечение прочности при разработке ПС и в процессе их эксплуатации.
3. Сравнительно низкий уровень межотраслевой и внутриотраслевой унификации и стандартизации деталей, узлов, проектных и конструкторских решений, что требует создания на каждом предприятии своей базы данных, содержащей уникальные математические, графические и информационные модели элементов.
4. Высокая стоимость этапа экспериментально-доводочных работ и стендовых испытаний, которые в несколько раз превышают стоимость этапа конструирования ПС.
5. Сложность и громоздкость математических моделей, описывающих рабо-

чие процессы в ПС, что затрудняет процесс формализации проектирования.

Высокие требования, предъявляются и к конкретному проектировщику и группе проектировщиков сложного технического объекта. В настоящее время продолжительность проектирования сложного технического объекта превышает сроки определенные моральным износом и утратой конкурентоспособности изделия. Поскольку сложность объектов будет возрастать, а время проектирования должно сокращаться, можно сделать вывод, что единственно разумной альтернативой неавтоматизированного производства проектных работ может быть широкое использование САПР.

Практика разработки и эксплуатации САПР показала, что ряд особенностей построения автоматизированной системы может и должен быть оговорен и сформулирован до начала её проектирования.

Специфика проектирования ПС накладывает требования на структуру и организацию САПР, которая включает в себя следующее:

– ПС – это “старый” объект, расчётами и проектированием которого специалисты занимаются уже более 30 лет, следовательно, все принципиальные улучшения конструкции уже, как правило, внесены, а стремление к повышению технико-экономических показателей ПС заставляет проектировщиков всё глубже вникать в существо физических процессов, что достигается на пути последовательного усложнения математической модели и адекватного отражения процессов, протекающих в нём, в том числе и при различных режимах работы.
– Если трудоёмкость проектирования ПС принять за 100%, то трудоёмкость отдельных проектных процедур можно принять ориентировочно следующим образом: обзор существующих конструкций и определение патентной чистоты изделия 2÷3%; выполнение расчётов 6÷14%; проработка конструкции 12÷20%; выполнение чертежей 37÷55%; согласование технической документации 6÷18%; оформление технической документации 9÷16%.

Процесс автоматизации проектирования для ПС должен в себя

включать следующие этапы [18]:

1. Поиск принципиальных проектных решений.
2. Разработка эскизного варианта конструкций и их оптимизация.
3. Уточнение и доработка выбранного варианта конструкции, выполнение полного детального расчёта.
4. Разработка полного комплекта чертежей.

Таким образом, для решения проблем проектирования ПС необходимо создание ИТ, которые позволяют обеспечить:

– высокий уровень проектирования, за счёт использования специального математического аппарата;
– повышение качества выполнения чертежа и возможность многократного использования чертежа;
– уменьшение времени на доработку конструкции за счёт ускорения аналитических расчётов при проектировании;
– сокращение сроков разработки конструкции за счёт сокращения затрат на усовершенствование (средства имитации и анализа позволяют резко сократить затраты времени и средств на тестирование и усовершенствование прототипов);
– интеграцию проектирования с другими видами деятельности (более точная связь с другими инженерными подразделениями).

Учитывая сложность расчётов, жесткие ограничения по срокам и стоимости проектных работ, необходимо произвести анализ современных средств, математических моделей, а также методов проектирования автоматизированных систем.

11.2. Модель многокритериальной задачи принятия решений

Моделью многокритериальной задачи принятия решения в дальнейшем будем называть упорядоченную шестерку параметров:

$$G = (S, X, f, L, P, V), \qquad (11.2.1)$$

где S – множество решений (альтернатив, вариантов системы);

X – множество показателей;

f – отображение множества вариантов в множество векторных оценок;

L – множество постановок (типов) задач сравнения вариантов;

P – система предпочтений лица, принимающего решение;

V – множество возможных правил выбора решения (решающих правил).

Раскроем содержание элементов модели.

Множество S представляет собой совокупность вариантов системы, каждый из которых способен решить поставленную задачу управления, то есть ведёт к достижению поставленной задачи. Обычно в задаче проектирования систем управления множество вариантов конечно и формируется в результате усилий проектировщиков системы. Упорядочению процедуры генерирования вариантов способствует построение дерева решений. При построении дерева решений множество решений возникает вследствие существования нескольких способов реализации задач нижнего уровня. Некоторой формализацией формирования множества вариантов является метод морфологического анализа. Этот метод основан на возможности разбиения проектируемой системы на ряд независимых подсистем, для каждой из которых имеется несколько способов реализации. Вариант построения системы возникает, если объединить в один набор по одной реализации каждой подсистемы. Получившиеся при этом недопустимые сочетания различных подсистем исключаются из анализа [14].

В многокритериальной задаче принятия решения качество варианта оценивается совокупностью показателей X_1, X_2, …, X_m, $m \geq 2$, которые полностью характеризуют систему при сравнении вариантов. К таким показателям относятся динамические, надёжностные, ресурсные, технологические и др. Существенным при формировании набора показателей X является требование различимости уровней (интенсивности) присущих вари-

антам свойств, определяемых показателями. Интенсивности свойств вариантов могут изменяться дискретно или непрерывно. Для измерений степени выраженности свойства разрабатывается оценочная шкала показателя, представляющая собой множество оценок $\left\{x_j^1, x_j^2, ..., x_j^r\right\}$. В дальнейшем используем для обозначения шкалы тот же символ что и для обозначения показателя – X_j. Шкалы, образующие множество X, могут быть числовые и нечисловые (вербальные) и относиться к различным типам шкал [15]. Наименее совершенной шкалой показателей, применяемых в многокритериальных задачах, является порядковая шкала. Показатели, имеющие порядковую шкалу, называются *качественными.* Значения качественного показателя имеет смысл сравнивать только по отношениям «больше», «меньше», «равно» – они сохраняются при монотонных преобразованиях.

Более совершенны количественные шкалы – шкала интервалов и шкала отношений. Шкала интервалов сохраняет отношение интервалов при умножении на положительное число k и добавлении произвольного числа l:

$$\frac{x^a - x^b}{x^c - x^d} = \frac{\left(kx^a + l\right) - \left(kx^b + l\right)}{\left(kx^c + l\right) - \left(kx^d + l\right)} = const.$$

На шкале отношений сохраняются отношения величин при умножении на положительное число $\frac{x^a}{x^b} = \frac{k\ x^a}{k\ x^b} = \text{const}$. Прямое произведение $Y = X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_m$ образует множество векторных оценок. Множество X определяет пространство свойств вариантов [14].

Перечень показателей пьезокермических материалов, может стать основой при формировании системы показателей для решения конкретной задачи сравнения вариантов. Перечень должен охватывать, характерные для оценки пьезосканеров, основные группы показателей.

Отображение f: $S \to Y$ устанавливает соответствие множества векторных оценок Y множеству вариантов S. Отображение f строится на основе измерения интенсивности свойств каждого варианта из S по шкалам по-

казателей X_1, X_2, …, X_m. Совокупность упорядоченных оценок по шкалам $(x_j^i, x_j^i, ..., x_j^i, ..., x_m^i)$, где x_j^i – оценка j-го показателя и является векторной y_i из Y вариантов s_i, i=1,…,n из S. Обозначим векторные оценки вариантов Z. Обычно число векторных оценок в Y больше, чем число вариантов S, поскольку, с одной стороны, не все сочетания свойств, описываемые векторными оценками, могут быть реализованы в вариантах. С другой стороны, если бы каждой векторной оценке соответствовал вариант, то проблемы выбора не было бы, так как множество Y содержит вектор с максимальными оценками по всем показателям. Число векторных оценок вариантов в Z может быть меньше числа вариантов в S, так как некоторые варианты могут иметь одинаковые векторные оценки. Будем считать, что векторные оценки Y/Z соответствуют гипотетическим вариантам. Отображение f при конечном числе вариантов удобно задавать таблицей $(m+1)\times n$, каждая строка которой содержит код (номер) варианта и m оценок по каждому показателю. В таблице 11.2.1 приведены выделенные варианты пьезосканеров и соответствующие им векторные оценки по десяти показателям [14].

Постановка задачи L зависит от целей лица, принимающего решение, в частности от этапа создания системы, на котором решается задача сравнения и выбора вариантов. Так, на этапе предэскизного и эскизного проектирования может потребоваться исключить из дальнейшей проработки худшие варианты. Такими могут быть признаны доминируемые варианты, у которых векторная оценка имеет равные и по крайней мере одну худшую оценку по показателям, чем векторная оценка какого-либо другого варианта. На этапе рабочего проектирования при создании опытных образцов возникает задача выделения заданного числа лучших вариантов, в серийное производство передается один, наиболее предпочтительный. В некоторых случаях может потребоваться упорядочение представленных вариантов, чтобы затем провести границу между перспективной и неперспективной группами вариантов. Таким образом, некоторые постановки задачи принятия решений можно связать с конкретными этапами создания ПС.

Таблица 11.2.1

Варианты пьезосканеров и соответствующие им векторные оценки

S	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_7	X_8	X_9	X_{10}
S_1	x_1^2	x_2^2	x_3^1	x_4^2	x_5^2	x_6^3	x_7^2	x_8^2	x_9^1	x_{10}^1
S_2	x_1^1	x_2^2	x_3^3	x_4^2	x_5^2	x_6^1	x_7^2	x_8^1	x_9^2	x_{10}^1
S_3	x_1^2	x_2^1	x_3^1	x_4^2	x_5^3	x_6^2	x_7^4	x_8^1	x_9^1	x_{10}^1
S_4	x_1^1	x_2^1	x_3^3	x_4^3	x_5^3	x_6^1	x_7^4	x_8^1	x_9^2	x_{10}^1
S_5	x_1^2	x_2^1	x_3^1	x_4^1	x_5^1	x_6^3	x_7^1	x_8^2	x_9^1	x_{10}^2
S_6	x_1^1	x_2^1	x_3^3	x_4^2	x_5^1	x_6^2	x_7^1	x_8^1	x_9^2	x_{10}^1
S_7	x_1^2	x_2^1	x_3^1	x_4^2	x_5^3	x_6^3	x_7^3	x_8^2	x_9^1	x_{10}^1
S_8	x_1^1	x_2^1	x_3^3	x_4^3	x_5^2	x_6^2	x_7^3	x_8^1	x_9^2	x_{10}^1

При сравнении и оценке вариантов по совокупности свойств предполагается, что лицо, принимающее решение, может сопоставлять и делать вывод о предпочтительности интенсивностей различных свойств, изменений интенсивностей свойств, сочетаний интенсивностей различных свойств на основе своих представлений о ценности свойств. Эти представления и образуют систему предпочтений *P*. Обычно предполагается, что ЛПР, высказывая суждения, действует рационально, то есть остается последовательным, не допускает противоречий и т.д. Формально, при таком способе получения информации о предпочтениях, система описывается отношениями предпочтения на множествах векторных оценок.

Решающее правило (метод принятия решений) определяет принцип сравнения векторных оценок с целью установления предпочтительности одних из них по отношению к другим. Оно может быть представлено аналитическим выражением или алгоритмом. Решающее правило должно учитывать: особенность используемой в задаче информации о предпочтениях ЛПР,

имеющиеся ограничения и принятые допущения, тип решаемой многокритериальной задачи [14]. Этим обусловлено большое число предлагаемых решающих правил, и одна из трудностей решения многокритериальных задач связана с выбором решающего правила, адекватного поставленной задаче. Например, выделение недоминируемых вариантов осуществляется на основе правила, задающего частичный на множестве вариантов. Если решающее правило допускает упорядочение элементов множества вариантов, то процесс упорядочения автоматически определяет любое требуемое число вариантов, которые являются более предпочтительными по сравнению с другими. Если ЛПР действует рационально, то оно должно согласиться с предлагаемым решением. Иначе следует пересмотреть решающее правило или информацию о цели, показателях и оценках по показателям.

Решающее правило в задачах выбора наиболее предпочтительного варианта и полного упорядочения на множестве вариантов часто имеет вид функций, зависящих от оценок вариантов по всем показателям. С это целью вводится новое понятие (ценность, полезность, важность), с помощью которого удается сформулировать решающее правило. Если ЛПР строит свои действия на основе определенных допущений, то на множестве векторных оценок Y может быть определена функция полезности, связывающая это множество со множеством чисел. Используя методы теории полезности, информацию о предпочтениях ЛПР преобразуют в численную информацию о полезности свойств вариантов. Затем эту численную информацию применяют для вычисления полезностей реальных вариантов. Полученные результаты сравнения численных значений полезностей вариантов вновь преобразуются в суждения о предпочтении [14].

В соответствии с моделью многокритериальной задачи (11.2.1) в процедуре принятия решения можно выделить следующие этапы:

- постановка задачи принятия решения;
- составление перечней вариантов и показателей, которые должны учитываться при оценке каждого варианта;

- разработка оценочных шкал для всех показателей;
- формирование оценок всех вариантов по каждому показателю – получение векторных оценок вариантов;
- выявление структуры предпочтений лица, принимающего решение;
- формирование решающего правила;
- оценка предпочтительности вариантов на основе решающего правила;
- принятие решения.

Каждому этапу соответствуют свои источники информации и методы получения результата. Основным источником информации служат эксперты. Разработку методов, применяемых в процедуре сравнения вариантов, осуществляют специалисты по принятию решений. Таким образом, в процессе принятия решения наряду с ЛПР, участвуют ещё две категории лиц: консультанты-исследователи – специалисты по принятию решений; эксперты – специалисты в области проектирования и исследования систем управления.

Это деление условно. Всю работу может выполнять один человек или в каждом направлении будет работать коллектив, но содержание работ должно сохраниться. Если в задаче индивидуального принятия решений в качестве ЛПР выступает коллектив, то рассматривается согласованное мнение группы лиц.

11.3. Сравнение вариантов на основе порядковой шкалы оценок и на основе интегральной шкалы полезности оценки по показателям

Сравнение вариантов пьезосканеров на основе порядковой шкалы оценок по показателям

Рассмотрим задачу сравнения вариантов пьезосканеров по совокупности показателей на основе порядковой шкалы оценок. Для сравнения

применим данные об объективных, физических свойствах вариантов, не затрагивающие вопросы индивидуальной, субъективной оценки полезности свойств вариантов ЛПР. Пусть для сравнения представлены варианты $s_1, s_2 \ldots s_n$, $n \geq 2$, которые характеризуются показателями $X_1, X_2, \ldots, X_m$, $m>2$.

Тогда оценки по показателям образуют векторные оценки

$$y \in Y = X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_m$$

следующего вида [14]:

$$y = (x_1, x2, \ldots, x_m).$$

Каждому варианту $s_i \in S = \{s_1, s_2, \ldots, s_n\}$ соответствует векторная оценка

$$Y_i = f(s_i) = (x_1^i, x_2^i, \ldots, x_m^i),$$

где x_j^i – оценка i-го варианта по показателю X_j; $x_j^i \in X_j$; $i = 1 \ldots n$; $j = 1 \ldots m$.

Оценки вариантов по каждому показателю x_j^i могут быть получены непосредственным измерением и с помощью специалистов-экспертов или ЛПР. На степень объективности оценок влияют характер показателя, тип шкалы и участие эксперта в процессе получения оценок. Наиболее достоверны оценки, полученные по числовым шкалам в результате аналитических расчётов или непосредственного измерения (при условии, что расчёты или измерения выполнены правильно). При оценке по вербальным шкалам разные эксперты могут дать различные оценки вариантам. Тогда применяют процедуры согласования мнений специалистов или построения усреднённой оценки. В дальнейшем все показатели будем считать однонаправленными, т. е. с возрастающей интенсивностью свойства от начала шкалы показателя. Векторные оценки вариантов $f(s_i)$, $i = 1, 2, \ldots, n$, могут быть при некоторых условиях непосредственно использованы для сравнения. Рассмотрим эти условия. Используем для обозначения пространства векторных оценок, не содержащего оценок по показателю X_j, символ

$$Y_j^- = X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_{j-1} \times X_{j+1} \times X_m, \qquad (11.3.1)$$

а элементов этого пространства – y_j^-. Считаем, что показатель x_j независим по предпочтению от остальных показателей, если порядок предпочтения векторных оценок (x_j^i, y_j^-), i=1..r_j с фиксированным y_j^- – остается неизменным независимо от значения y_j^-. Здесь r_j – число оценок по показателю X_j.

В этом случае оценки каждого показателя могут быть упорядочены по отношению «не менее предпочтительно, чем»

$$x_j^{r_j-1} \geq x_j^{r_j} \geq \ldots \geq x_j^1, \quad j = 1, 2, \ldots, m. \qquad (11.3.2)$$

Однако порядок оценок в (11.3.2) может не совпадать с порядком оценок по шкале показателя, если не будет выполняться второе условие, а именно что большие значения оценок по каждому показателю предпочтительнее меньших. Другими словами, векторная оценка y=(x_j, y_j^-) предпочтительнее векторной оценки y'=(x_j', y_j^-), которая получена из y заменой x_j на $x_j' \in X_j$ при любом $j \in$ {1, 2,..., m}. Это условие реализует «принцип монотонности» изменения свойств варианта.

При соблюдении условий независимости каждого показателя от остальных и монотонности оценки, полученные варьированием ПС, делают возможным выделение подмножества неподчиненных векторных оценок Z_0 и соответствующего ему подмножества неподчиненных вариантов S_0. Векторная оценка принадлежит множеству неподчиненных оценок Z_0, если среди векторных оценок представленных вариантов не содержится более предпочтительной, то есть такой, которая имеет хотя бы по одному показателю более предпочтительную оценку, а по остальным – не менее предпочтительную. Вариант $s^* \in S$ принадлежит множеству неподчиненных вариантов S_0, если его векторная оценка $f(s^*)$ принадлежит множеству неподчиненных оценок Z_0 [14].

Множество неподчиненных оценок (вариантов) называют также эффективными оценками, неулучшаемыми оценками, множеством Парето, областью компромиссов.

Легко видеть, что наиболее предпочтительный вариант, выбираемый на основе многокритериального подхода, независимо от решающего правила, всегда должен принадлежать множеству неподчинённых вариантов, иначе в множестве S найдется вариант более предпочтительный. Множество Парето – область потенциально наилучших решении. Среди неподчинённых вариантов находятся решения, имеющие высшие оценки по одному из локальных показателей. Следовательно, при выборе варианта по совокупности показателей поиск наиболее предпочтительного решения можно ограничить множеством Парето, которое содержится в множестве представленных для анализа вариантов. В этом состоит практический результат выделения множества неподчинённых вариантов.

Анализ вариантов $s_1, s_2, \ldots, s_n$ осуществляется на основе анализа матрицы векторных оценок всех вариантов по всем показателям $\| x_j^i \|$ путём покоординатного сравнения пар векторных оценок вариантов из $\{s\}$.

Возможны три результата сравнения:

1) вариант s_i более предпочтителен, чем вариант s_g (s, > s_g), если все оценки вектора $f(s_i)$ не хуже, а по крайней мере одна оценка лучше оценок вектора $f(s_g)$;

2) варианты s_i и s_g эквивалентны в смысле предпочтения ($s_i \sim s_g$), если оценки по показателям одинаковы;

3) варианты s_i и s_g несравнимы (s, Δs_g), если оценки по крайней мере по двум показателям l и k таковы, что одновременно $x_l^i > x_j^g$ и $x_k^i > x_k^g$, j, $k \in \{1, 2,..., m\}$, $l \neq k$.

Совокупность несравнимых вариантов и вариантов, эквивалентных им образуют множество неподчинённых вариантов S_0. Алгоритм выделения множества неподчинённых вариантов представлен на рис. 11.3.1.

Для выполнения необходимых операций варианты перенумеровывают и им приписывают соответствующие векторные оценки. Векторная оценка $f(s_i)$ варианта s_i из множества S поочерёдно сравнивается с вектор-

ными оценками $f(s_g)$ вариантов s_g того же множества. Производится покоординатное сравнение двух векторных оценок. Если вариант s_i более предпочтителен, чем вариант s_g, то вариант s_g исключают из S. Если вариант s_g не менее предпочтителен, то его оставляют в множестве S. Затем для сравнения выбирают следующий вариант s_{g+1} из множества S. После сравнения с последним вариантом s_g выбирают следующий вариант s_{i+1} и сравнивают с оставшимися вариантами s_g. Таким образом, исключаются все доминируемые варианты, а оставшиеся образуют множество неподчинённых вариантов $\{s^*\}$ [14].

Выделение множества неподчинённых вариантов может способствовать выбору наиболее предпочтительного варианта, но только в исключительных случаях приводит сразу к выделению одного варианта. Число вариантов в множестве Парето зависит от расположения векторных оценок $f(s_i)$, i=1, 2,..., n в пространстве значений показателей. Как правило, их значительно больше, чем требуется для решения задачи выбора вариантов. На то, что делать дальше с множеством неподчинённых решений, существует несколько точек зрения. Предлагается, например, выбрать вариант с помощью механизма случайного выбора, предполагая, что выбор между неподчинёнными вариантами безразличен для ЛПР. Этот путь связан с отказом от дальнейшего анализа задачи.

Разработаны принципы, на основе которых возможно сужение множества неподчинённых вариантов. Однако доминирующей стала точка зрения, предлагающая использовать для выделения предпочтительных вариантов дополнительную информацию о предпочтительности свойств варианта, которая должна быть получена у ЛПР, экспертов или в результате исследования моделей, построенных для анализа задачи.

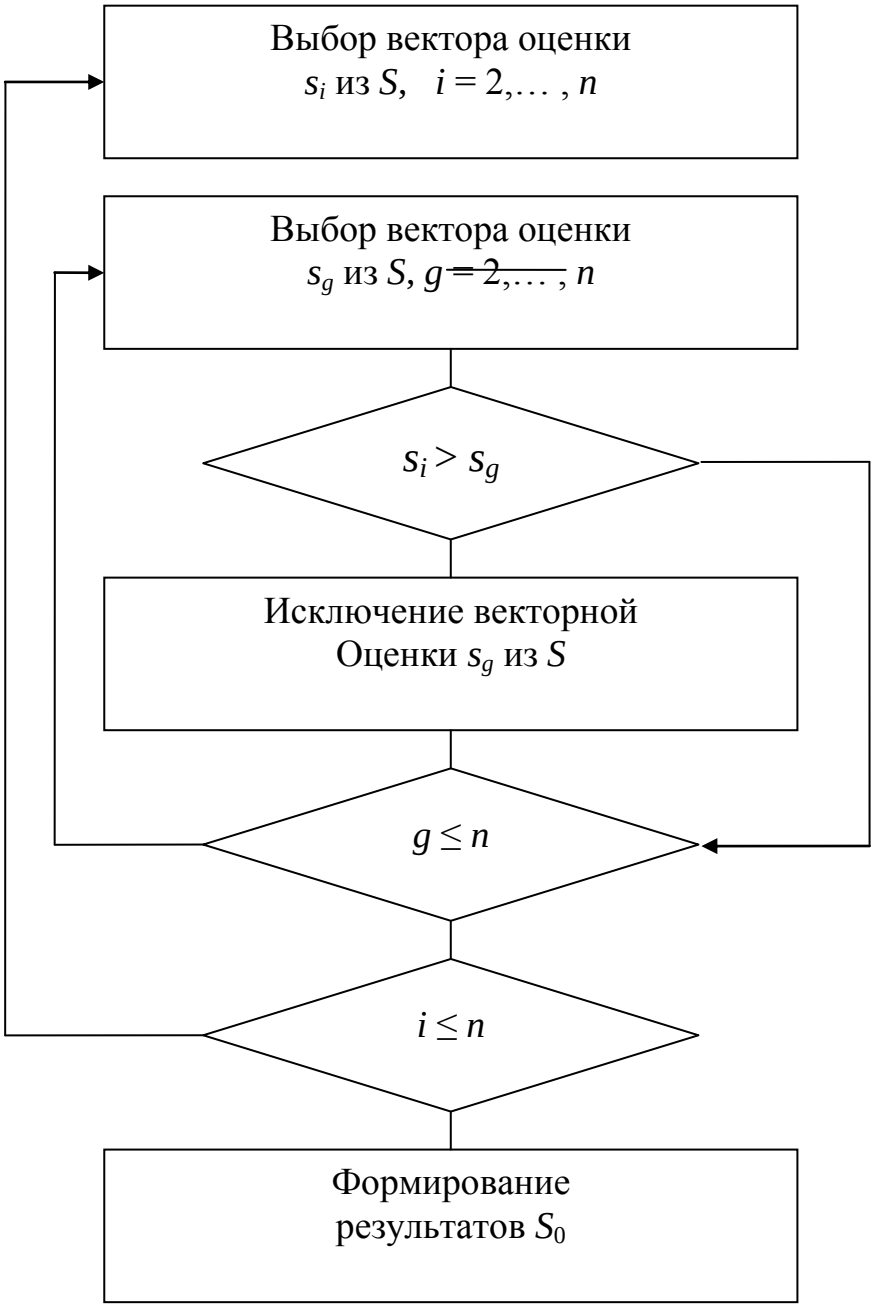


Рис. 11.3.1. Алгоритм выделения множества неподчинённых вариантов

Сравнения вариантов пьезосканеров на основе интервальной шкалы оценок по показателям

Для сравнения вариантов на основе интервальной шкалы оценок по показателям, необходима информация о предпочтительности изменения свойств при изменении оценок по показателям, которая отражает систему

предпочтений ЛПР. Информацию такого рода можно получить от ЛПР, предлагая ему сравнить варианты пьезосканеров, векторные оценки которых имеют различные оценки по двум показателям, причём по одному показателю –лучшую, а по другому – худшую при равенстве оценок по остальным показателям. Задачи сравнения векторных оценок такого вида считаются простейшими. С увеличением числа показателей, по которым варианты имеют различные оценки, трудность задачи сравнения возрастает. Дополнительная информация рассмотренного вида может быть использована для сравнения вариантов, представленных в задаче различными моделями [14]. Рассмотрим сравнение вариантов при независимости показателей по предпочтению.

Интервалы между оценками на шкалах показателей могут быть упорядочены по предпочтению на основе дополнительной информации, полученной от ЛПР, при независимости показателей по предпочтению.

Используем для обозначения пространства векторных оценок, не содержащего показателей X_i и X_k, $X_1 \times X_2 \times \ldots \times X_{j-1} \times X_{j+1} \times \ldots X_{k-1} \times X_{k+1} \times \ldots \times X_m$ символ $Y_{\overline{ik}}$, а элементы этого пространства обозначим $y_{\overline{ik}}$. Рассмотрим две векторные оценки $x_j^1, x_k^2, y_{\overline{ik}}$ и $x_j^2, x_k^1, y_{\overline{ik}}$, такие, что $x_j^2 > x_j^1$ и $x_k^2 > x_k^1$. Пусть первая векторная оценка предпочтительнее второй. Очевидно, предпочтительность первой оценки обусловлена предпочтительностью изменения оценки x_j^1 на оценку x_j^2 по сравнению с изменением оценки x_k^1 на оценку x_k^2. Будем считать показатели X_i, X_k независимыми по предпочтению от остальных показателей, если предпочтение между изменениями оценок показателей X_i, X_k остается неизменным при любых значениях остальных показателей. Независимость по предпочтению позволяет использовать результаты сравнения интервалов для сравнения произвольных векторных оценок из Y [14].

Рассмотрим произвольные векторные оценки $y_i, y_g \in Y$:

$$y_i = (x_1^i,\ x_2^i, ...,\ x_m^i);$$
$$y_g = (x_1^g,\ x_2^g, ...,\ x_m^g), \qquad (11.3.3)$$
$$i,\ g \in \{1, 2, ..., n\},\ i \neq g.$$

Интервалом между векторными оценками $y_i,\ y_g \in Y$ называется вектор, элементами которого являются интервалы между оценками вариантов на шкалах соответствующих показателей:

$$\left(y_i, y_g\right) = \left(x_1^i, x_1^g; x_2^i, x_2^g; ...; x_m^i, x_m^g\right). \qquad (11.3.4)$$

Поскольку оценка по показателю X_i векторной оценки y_i, может быть более предпочтительной, равной или менее предпочтительной, чем оценка по тому же показателю X_i векторной оценки y_i, то интервалы между оценками вариантов s_i и s_g на шкалах показателей X_j, j=1,...,m, входящие в интервал между векторными оценками (y_i y_g), могут быть разбиты на три подмножества:

1. Интервалы, у которых более предпочтительная оценка по шкале показателя принадлежит первой векторной оценке интервала между векторными оценками, обозначим $\overset{ig}{j}$.
2. Интервалы, ограниченные равными оценками соответствующих показателей вариантов s_i, и s_g («пустые» интервалы), обозначим 0.
3. Интервалы, у которых менее предпочтительная оценка по шкале показателя принадлежит первой векторной оценке интервала между векторными оценками, обозначим $\overset{gi}{k}$.

Таким образом, интервал между векторными оценками можно представить в следующей форме

$$(y_i, y_g) = (\{\overset{ig}{j}\},\ \{0\},\ \{\overset{gi}{k}\}), \quad j,\ k \in \{1,\ 2, ...,\ m\}, \quad j \neq k.$$

Сравнение по предпочтению векторных оценок двух вариантов, различающихся оценками по двум показателям X_i и X_k проводимое ЛПР, устанавливает отношение нестрогого предпочтения между интервалами на шкалах этих показателей:

$$\overset{ig}{j} > \overset{gi}{k},$$

где $j, k \in \{1,2,...,m\}$, $j \neq k$, $i, g \in \{1,2,...,n\}$, $i \neq g$, поскольку интервалы между равными оценками «пустые».

При выполнении предположения о независимости показателей по предпочтению, отношение предпочтения между интервалами не меняется при изменении значений других оценок, и может быть использовано при сравнении различных пар вариантов. С помощью отношения нестрогого предпочтения на множестве интервалов между оценками показателей можно задать отношения строгого предпочтения P, безразличия I и несравнимости N, на множестве векторных оценок Y и соответственно отношения строгого предпочтения >, безразличия ~ и несравнимости Δ, на множестве вариантов S. Запишем условия предпочтительности, безразличия и несравнимости двух произвольных векторных оценок (11.3.3).

1. Векторная оценка y_i предпочтительнее векторной оценки y_g($y_i P\, y_g$), если каждому интервалу из $\{\overset{gi}{k}\}$ можно поставить в соответствие такой интервал из $\{\overset{ig}{j}\}$, что для всех пар будет $\overset{ig}{j} \quad \overset{gi}{k}$ и по крайней мере одно неравенство будет строгим.

2. Векторные оценки y_i и y_g равноценны ($y_i\, I y_g$), если можно составить такие пары $(\overset{ig}{j} \geq \overset{gi}{k}) \wedge (\overset{gi}{k} \geq \overset{ig}{j})$ интервалов $\overset{gi}{k}$ и $\overset{ig}{j}$ что для всех k, $i \in \{1, 2,..., m\}$.

3. Векторная оценка y_i несравнима с векторной оценкой y_g($y_i\, I y_g$), если невозможно каждому интервалу из $\{\overset{gi}{k}\}$ поставить в соответствие не менее предпочтительный интервал из $\{\overset{ig}{j}\}$.

Введённые отношения позволяют сформулировать достаточные условия предпочтительности вариантов, основанные на упорядочении оценок по показателям, и выделить множество предпочтительных вариантов S_i.

Пусть требуется сравнить произвольные варианты s_i и s_g, которым соответствуют векторные оценки $f(s_i) = (x_1^i, x_2^i, ..., x_m^i)$ и $f(s_g) = (x_1^g, x_2^g, ..., x_m^g)$.

Обозначим $\max(x_i, x_g) = \hat{x}_j$, а $\min(x_i, x_g) = \check{x}_j$. Рассмотрим векторные оценки специального вида $f(j) = (\check{x}_1, \check{x}_2, \ldots, \check{x}_j, \ldots, \check{x}_m)$, особенностью которых является то, что оценка по шкале показателя: $X_j - \check{x}_j$, а по шкалам других показателей – $\check{x}_k$, k=l, 2,..., m, $k \neq j$. Варианты $_j$, j= 1,2,..., m, соответствующие таким векторным оценкам, иногда называют опорными ситуациями [46]. Из вариантов $_j$ образуются пары, предъявляемые ЛПР, для сравнения.

Если по результатам сравнения варианты будут упорядочены:

$$j_1 \geq j_2 \geq \ldots \geq j_k \geq \ldots \geq j_m,$$

то это индуцирует упорядочение векторных оценок

$$f(j_1) \geq f(j_2) \geq \ldots \geq f(j_k) \geq \ldots \geq f(j_m). \qquad (11.3.5)$$

В выражениях j_k и $f(j_k)$, j, $k \in \{1, 2, ..., m\}$, индекс j означает номер показателя, по которому векторная оценка имеет оценку $\check{x}_j$, а индекс k – место варианта или векторной оценки в упорядоченном ряду, начиная с наиболее предпочтительного.

Установлена связь между результатами сравнения «опорных ситуаций» и упорядочением по предпочтению интервалов между оценками на шкалах показателей. Если ЛПР может проводить непосредственное сравнение интервалов, то этап обработки информации о предпочтениях исключается [17].

В соответствии с (11.3.4) интервал между векторными оценками $f(s_i)$ и $f(s_g)$ имеет вид

$$(f(s_i), f(s_g)) = (x_1^i, x_1^g; x_2^i, x_2^g; \ldots; x_m^i, x_m^g).$$

Обозначим элементы интервалов между векторными оценками

$$(x_j^i, x_j^g) = a_j(\hat{x}_j, \check{x}_j); \; j=1, 2, \ldots, m,$$

где

$$a_j = \begin{cases} 1, если\ \hat{x}_j \in f(s_i); \\ 0, если\ x_j^i = x_j^g; \\ -1, если\ \hat{x}_j \in f(s_n). \end{cases}$$

Тогда

$$(f(s_i), f(s_g)) = (a_1(\hat{x}_1, \check{x}_1), a_2(\hat{x}_2, \check{x}_2), ..., a_m(\hat{x}_m, \check{x}_m)). \qquad (11.3.6)$$

Расположим элементы в (11.3.6) в соответствии с упорядочением интервалов в (11.3.3)

$$(f(s_i), f(s_g)) = (aj_1(\hat{x}\, j_1, \check{x}j_1), aj_2(\hat{x}\, j_2, \check{x}\, j_2), ..., aj_m(\hat{x}\, j_m, \check{x}\, j_m)). \quad (11.3.7)$$

Здесь, как и ранее, первый нижний индекс указывает номер показателя в задаче сравнения вариантов, второй - определяет упорядочение интервалов между оценками на шкалах показателей, полученное в результате опроса ЛПР.

Выражение (11.3.7) позволяет сформулировать достаточные условия справедливости утверждений $s_i \geq s_g$ и $s_g \geq s_i$.

Для определения предпочтительности той или иной векторной оценки и соответствующего ей варианта следует подсчитать

$$\sum_{k=1}^{r} a_j,\ r = 1, 2, ..., m.$$

Тогда

$$f(s_i) \geq f(s_g), \text{ если } \sum_{k=1}^{r} a_j \geq 0,\ r = 1, 2, ..., m; \qquad (11.3.8)$$

$$f(s_g) \geq f(s_i), \text{ если } \sum_{k=1}^{r} a_j \geq 0,\ r = 1, 2, ..., m. \qquad (11.3.9)$$

Таким образом, выполнение (11.3.8) является достаточным условием справедливости утверждения $s_i \geq s_g$, а выполнение (11.3.9) – $s_g \geq s$. В слу-

чае выполнения и (11.3.8) и (11.3.9) варианты эквивалентны, а при невыполнении и (11.3.8) и (11.3.9) варианты оказываются несравнимыми по сформулированному выше решающему правилу выбора наиболее предпочтительного варианта при независимости показателей по предпочтению.

Отметим, что рассмотренная процедура сравнения двух вариантов при независимости показателей по предпочтению делится на два этапа: выявление системы предпочтений эксперта; проверка условий предпочтительности одного из вариантов.

Выделение подмножества предпочтительных вариантов и эквивалентных им по предпочтению S_1 из множества вариантов $\{s_1, s_2, \ldots, s_n\}$ возможно в результате многократного применения процедуры попарного сравнения. В результате будут исключены из дальнейшего рассмотрения варианты, доминируемые по отношению P, при имеющейся информации о предпочтениях ЛПР, Однако при такой организации процедуры сравнения вариантов возникает ряд трудностей, главные из которых связаны с выявлением предпочтений ЛПР. В этом случае процесс сбора информации о предпочтениях распадается на ряд мелких операций, разнесённых во времени. Главная трудность связана с возможным появлением противоречивости в суждениях ЛПР. При сравнении различных пар вариантов могут возникать одинаковые интервалы между оценками на шкалах показателей, которые в разное время будут предъявляться для сравнения эксперту или ЛПР. За время, прошедшее между предъявленьями, ЛПР может изменить свое суждение о предпочтительности интервалов, что может остаться незамеченным [17]. Поэтому целесообразно этапы процедуры выявления системы предпочтений реализовать на множестве вариантов $\{s_1, s_2, ..., s_n\}$, а затем проводить их попарное сравнение. Заметим, что при сравнении векторных оценок, отличающихся оценками по двум показателям и имеющих одинаковые оценки по остальным (m-2) показателям, происходит упорядочение двух интервалов, то есть с каждой парой векторных оценок связана пара интервалов на шкалах показателей. Верно и обратное. Для каж-

дой пары интервалов на шкалах разных показателей можно построить векторные оценки и предъявить эксперту для сравнения. Поэтому в дальнейшем будем говорить о сравнении интервалов между оценками как о результате сравнения векторных оценок. В начале опроса следует проводить сравнение интервалов между соседними оценками на шкале показателей. При этом окажутся упорядоченными и некоторые интервалы между произвольными оценками на шкалах показателей, например при выполнении соотношения [14]:

$$[(x_j^i, x_j^g) \geq (x_k^i, x_k^g)] \bigcup [(x_j^i, x_j^r) \geq (x_k^g, x_k^r)] \Rightarrow [(x_j^i, x_j^g) \bigcup x_j^i, x_j^r] \geq$$
$$\geq [(x_j^i, x_j^g) \bigcup x_k^g, x_k^r] = (x_j^i, x_j^r) \geq (x_k^i, x_k^r).$$

В тех случаях, когда такие условия не выполняются, проводится сравнение интервалов между произвольными оценками. В силу предположения о независимости показателей по предпочтению отношение нестрогого предпочтения между интервалами сохраняется при различных значениях оценок по другим показателям. В результате опроса ЛПР будет построено отношение нестрогого предпочтения на множестве интервалов между оценками по показателям X_j, j = 1, 2,..., m. Для удобства представления и обработки полученной информации поставим в соответствие каждому интервалу Δ_j^{ig} на шкале показателя число δ_j^{ig}, такое, что

$$\Delta_j^{ig} \geq \Delta_k^{gi} \Leftrightarrow \delta_j^{ig} \geq \delta_k^{gi},\ i, g \in \{1, 2, ..., n\};$$
$$j, k \in \{1, 2, ..., m\}.$$

С тем же успехом числа можно присваивать и оценкам на шкалах показателей, но при этом

$$\Delta_j^{ig} \geq \Delta_k^{gi} \Leftrightarrow (\delta_j^i - \delta_j^g) \geq (\delta_k^g - \delta_k^i).$$

В дальнейшем будем пользоваться последним соотношением. Таким образом, осуществляется переход к системе однородных линейных неравенств.

В дальнейшем будем пользоваться последним соотношением. Таким образом осуществляется переход к системе однородных линейных неравенств

$$\sum_{g=1}^{N} a_{jg}\delta_g \geq 0, \;\; j=1,2,...,M; \;\; g=1,2,...,N; \;\; \delta_g \geq 0, \qquad (2.3.10)$$

где

M – число сравнений интервалов в эксперименте;

$N=\sum_{j=1}^{m} r_j$ – число оценок на шкалах показателей;

r_j – число оценок на шкале показателя X_j.

Общее решение системы однородных линейных неравенств представляется в виде неотрицательной комбинации её фундаментальных точек $A_1, A_2,\ldots, A_p$:

$$A=k_1A_1+k_2A_2+\ldots+k_pA_p,$$

где $k_1, k_2,\ldots, k_p$ – произвольные неотрицательные числа.

Координаты точек

$$A_1=(\delta_{11},\delta_{12},...,\delta_{1N});$$
$$A_2=(\delta_{21},\delta_{22},...,\delta_{2N});$$
$$\ldots$$
$$A_p=(\delta_{p1},\delta_{p2},...,\delta_{pN}),$$

соответствуют допустимым значениям оценок по показателям, согласованным с предпочтениями ЛПР, но только общее решение A отображает отношение предпочтения, выявленное при опросе ЛПР. При использовании полученных численных значений оценок по шкалам показателей для оценки вариантов могут встретиться два случая [14]:

1. В любой точке A для двух произвольных вариантов $s_i, s_g \in \{s_1, s_2, \ldots, s_n\}$ справедливо $s_i \geq s_g$ либо $s_g \geq s_i$.

2. Для двух произвольных вариантов s_i, s_g множество точек A разбивается на две части, в одной из которых справедливо $s_i \geq s_g$, а в другой $s_g \geq s_i$.

Второй случай показывает, что информации, полученной от ЛПР, недостаточно для упорядочения вариантов проекта. Вариант s_i, не менее предпочтителен, чем вариант s_g (или наоборот), в любой точке A, если он не менее предпочтителен во всех точках $A_1, A_2,\ldots, A_p$.

Предпочтительные варианты множества $\{s_1, s_2,\ldots, s_n\}$ выделяются путем отсеивания менее предпочтительных вариантов при попарном сравнении. Алгоритм сравнения вариантов при независимости показателей по предпочтению приведен на рис. 11.3.2. Векторная оценка $f(s_i)$ варианта s_i, поочерёдно сравнивается с векторными оценками $f(s_g)$, $g = i+1, i+2,..., n$ других вариантов. Для каждой пары вариантов определяют интервал между векторными оценками путем покоординатного вычитания векторной оценки $f(s_g)$ из векторной оценки $f(s_i)$. Численные значения координат векторных оценок получают при совместном решении неравенств (11.3.10), описывающих систему предпочтений ЛПР. Элементы интервала между оценками содержат информацию как о предпочтительности данного интервала между оценками (численное значение), так и о принадлежности большей оценки интервала к одной или другой векторной оценке (знак интервала). Операция по разбиению элементов интервала между векторными оценками на два подмножества $\{+\Delta_j\}$ и $\{-\Delta_k\}$ может быть совмещена с упорядочением элементов в каждом подмножестве. С этой целью достаточно провести упорядочение элементов интервала между векторными оценками, начиная с наибольшего положительного. Попарное сравнение элементов левой и правой половин интервала по абсолютному значению, начиная с крайних элементов, позволяет установить тип отношений между векторными оценками $f(s_i)$ и $f(s_g)$. Сравнение векторных оценок проводят во всех точках $A_1, A_2,\ldots, A_p$. Если какая-либо векторная оценка оказывается менее предпочтительной, её исключают из дальнейшего анализа. Несравнимые векторные оценки остаются в множестве предпочтительных векторных оценок. Таким образом, рассматривают все пары векторных оценок и менее предпочтительные векторные оценки исключают. Заметим, что выделенное множество пред-

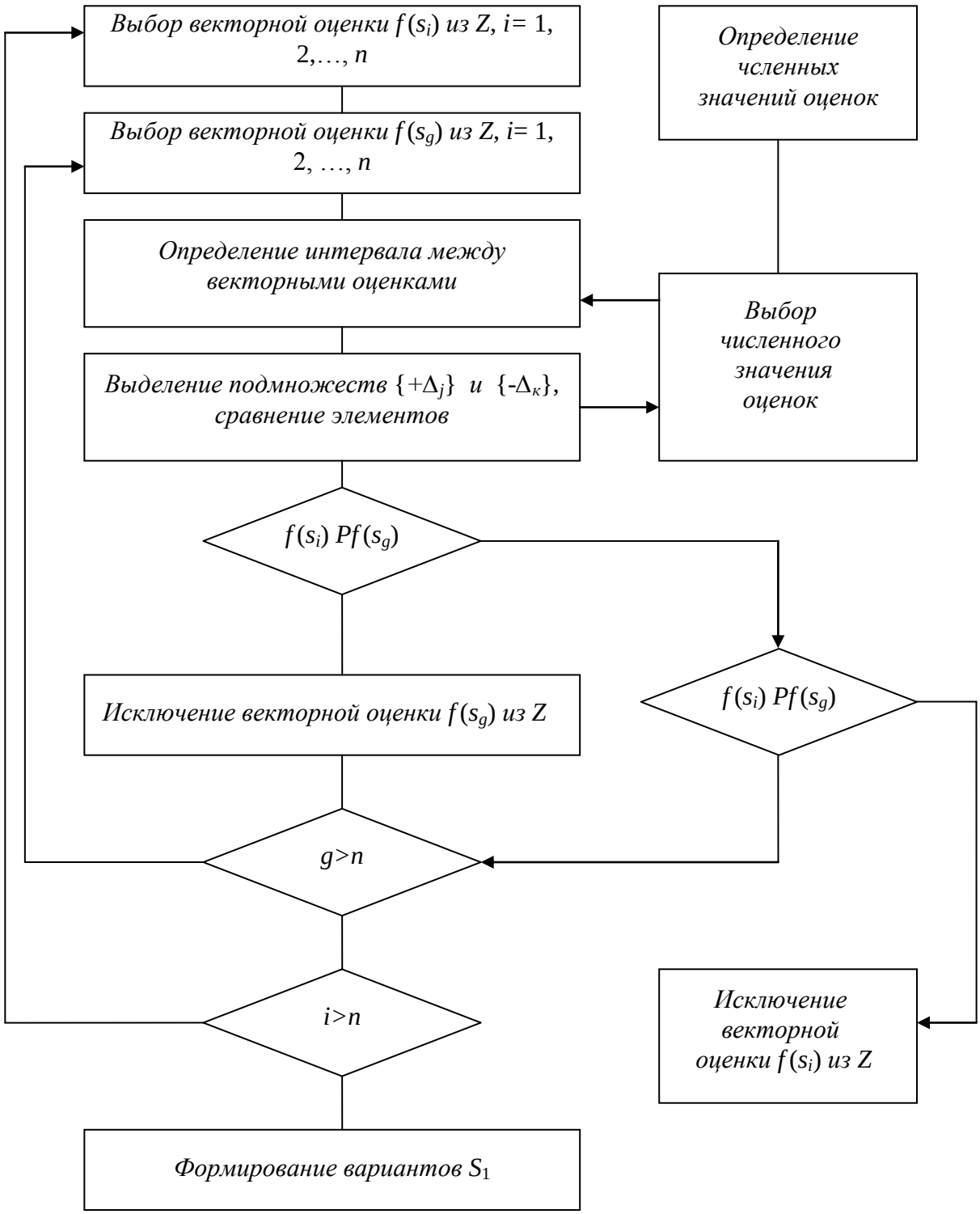


Рис. 11.3.2. Алгоритм выделения предпочтительных вариантов при независимости по предпочтению

почтительных вариантов S_1, множество неподчиненных вариантов S_0 и исходное множество вариантов S находятся в соотношении $S_1 \subseteq S_0 \subseteq S$.

11.4. Основы методики выбора предпочтительного варианта пьезосканера по совокупности показателей

Методика предназначена для оценки и сравнения вариантов проектов на различных этапах проектирования и опытных образцов пьезосканеров. Оценку вариантов проводят по качественным и количественным показателям, имеющим дискретные шкалы. Методика не охватывает этапы формулировки цели и составления вариантов, поскольку первый из них целиком относится к компетенции руководителя работы, а второй этап реализуют процессы проектирования системы, исследования опытного образца, в ходе которых возникают различные варианты s_i построения системы, проведения испытаний и т.д [14].

Рекомендуется следующий порядок выполнения работы.

1. Составление перечня показателей:

а) составить предварительный список показателей. Перечень показателей определяет специфику исследуемой проблемы и характеризует динамические, надёжностные, ресурсные и другие свойства сравниваемых объектов. Полнота оценки вариантов зависит от числа показателей, принятых во внимание;

б) каждому интуитивно понятному названию показателя поставить в соответствие точно сформулированное описание, соответствующее рассматриваемой задаче. Это позволит избежать неоднозначности и неточности в трактовке показателей;

в) уточнить перечень показателей.

2. Построение порядковых шкал:

а) определить диапазон изменения значений показателя на множестве вариантов;

б) зафиксировать наименьшее и наибольшее значения показателя и выделить промежуточные значения. Для качественных показателей, оценки даются описательно;

б) проверить упорядоченность оценок на каждой шкале отношением «не менее предпочтительна, чем»

$$x_j^{r_j} \geq x_j^{r_j-1} \geq ... \geq x_j^2 \geq x_j^1,$$

где r – число оценок по показателю X_j, $j = 1,2,...,m$.

3. Составление векторных оценок вариантов по форме

$$f(s_i) = (x_1^i, x_2^i, ..., x_j^i, ..., x_m^i),\ i = 1, 2, ..., n,$$

где x_j^i – координата вектора оценок – оценка i-го варианта по показателю, X_j; $s_i \in \{s\}$ – вариант из множества сравниваемых.

4. Выбор наиболее предпочтительного варианта из множества $\{s\}$ выполняется в два этапа:

а) выделение множества неподчиненных вариантов $\{s^*\}$. Алгоритм выделения множества неподчиненных вариантов представлен на рис. 11.3.1. Выделение множества неподчиненных вариантов может выполняться формально, без участия ЛПР.

б) выбор наиболее предпочтительного варианта из $\{s^*\}$ выполняется по критерию

$$s_i^* \geq s_g^* \Leftrightarrow U[f(s_i^*)] \geq U[f(s_g^*)],$$

$$\text{где} \quad U[f(s_i^*)] = \sum_{j=1}^{m} u_j(x_j^i).$$

Значения полезности оценок $u_j(x_j^i)$ на шкалах показателей должны отвечать предпочтениям ЛПР.

5. Выявление предпочтений ЛПР:

а) составляется векторная оценка $f(x_{jk})$ с произвольными оценками по показателям j и k и наименьшими оценками по остальным показателям:

$$f(x_{jk}) = (x_1^1, x_2^1, ..., x_j^i, ..., x_k^g, ..., x_m^l),\ \ j,\ \ k = \{1, 2, ..., m\},\ \ j \neq k;$$

$i = \{1, 2, \ldots, r_j\}$;

$g = \{1, 2, \ldots, r_k\}$;

б) лицо, принимающее решение, должно упорядочить (частично или полностью) векторные оценки $f(x_{jk})$:

$$f(x_{jk})_1 \geq f(x_{jk})_2 \geq ... \geq f(x_{jk})_l.$$

Вместо оценки или наряду с ними ЛПР для сравнения можно представлять интервалы между оценками на шкалах показателей;

в) составить систему однородных линейных неравенств, переменными которых являются полезности оценок. При построении неравенств используют выражение

$$U[f(x_{jk})] = \sum_{j=1}^{m} u_j(x_j^i),$$

и условие

$$\sum_{j=1}^{m} u_j(x_j^1) = 0:$$

$$u(x_{j_2}^{i_2}) + u(x_{k_2}^{g_2}) - u(x_{j_1}^{i_1}) - u(x_{k_1}^{g_1}) \leq 0;$$

$$u(x_{j_3}^{i_3}) + u(x_{k_3}^{g_3}) - u(x_{j_2}^{i_2}) - u(x_{k_2}^{g_2}) \leq 0;$$

$$\ldots$$

$$u(x_{j_l}^{i_l}) + u(x_{k_l}^{g_l}) - u(x_{j_{l-1}}^{i_{l-1}}) - u(x_{k_{l-1}}^{g_{l-1}}) \leq 0.$$

Система неравенств записывается в канонической форме:

$$a_{1r_1} u(x_1^{r_1}) + a_{1r_1-1} u(x_1^{r_1-1}) + ... + a_{12_1} u(x_1^{2_1}) + ... + a_{12_m} u(x_m^{2_m}) \leq 0;$$

$$a_{2r_1} u(x_1^{r_1}) + a_{2r_1-1} u(x_1^{r_1-1}) + ... + a_{22_1} u(x_1^{2_1}) + ... + a_{22_m} u(x_m^{2_m}) \leq 0;$$

$$\ldots$$

$$a_{Mr_1} u(x_1^{r_1}) + a_{Mr_1-1} u(x_1^{r_1-1}) + ... + a_{M2_1} u(x_1^{2_1}) + ... + a_{M2_m} u(x_m^{2_m}) \leq 0,$$

где M – число неравенств;

г) в результате решения системы неравенств получается множество точек

$$A_1 = (u_1(x_1^{r_1}), u_1(x_1^{r_1-1}), ..., u_1(x_m^{2_m}));$$
$$A_2 = (u_2(x_1^{r_1}), u_2(x_1^{r_1-1}), ..., u_2(x_m^{2_m}));$$
$$A_p = (u_p(x_1^{r_1}), u_p(x_1^{r_1-1}), ..., u_p(x_m^{2_m})),$$

определяющих область решений системы.

6. Оценка вариантов технических решений:

а) оценку каждого варианта проводить путём поочередной подстановки соответствующих координат точек A_1, A_2,…, A_p в векторную оценку $f(s_i)$ и вычислений по выражению

$$U_k[f(s_i)] = \sum_{j=1}^{m} u_k(x_j^i),\ k = 1, 2, ..., p.$$

В результате получается для каждого варианта совокупность из p оценок вида

$$U[f(s_i)] = \{U_1[f(s_i)], U_2[f(s_i)], ..., U_p[f(s_i)]\};$$

б) выделить предпочтительные варианты. К предпочтительным относятся варианты, имеющие в совокупности из p оценок хотя бы одну более предпочтительную оценку при не менее предпочтительных других оценках среди соответствующих оценок всех остальных вариантов. Алгоритм выделения предпочтительных решений совпадает с применённым в п. 4,а.

7. Анализ результатов работы.

Возможны два исхода выполненной работы:

а) выделено требуемое число предпочтительных вариантов (один или более). Задача решена;

б) выделенное число предпочтительных вариантов превосходит требуемое количество. Это значит, что от ЛПР необходимо получить дополнительную информацию о предпочтениях. Например – упорядочить по полезности интервалы между любыми двумя вариантами по шкалам показателей, упорядочить интервалы между векторными оценками в упорядоченном ряду (п. 5,б) и т.д., а затем повторить процедуру, начиная с п. 5,б.

11.5. Математическая модель пьезосканера на основе пьезоэлектрического элемента

Рассмотрим пьезоэлектрический элемент (рис. 11.5.1) поперечного сечения S_0, закреплённый одним концом на неподвижном основании, первоначальный размер l_0 которого изменяется под действием электрического поля E в направлении действия поля на значение Δ, и перемещающий исполнительный орган массой m_0, сочленённый с его свободным концом.

Кроме исполнительного органа перемещаются также элементы объёма активной части пьезопривода (ПП), масса которого m_k чаще всего меньше, чем масса исполнительного органа. При этом инерционностями перемещающихся элементарных объёмов ПП можно пренебречь либо, имея в виду, что ПП закреплен одним концом и эта его часть не принимает участия в движении, уточнить значение суммарной приведенной подвижной массы m_Σ включив в неё кроме массы ИО m_0 часть массы ПП m_k.

Основное динамическое усилие в рассматриваемом случае действует на ПП также в направлении приложенного поля, поэтому для описания пьезоэффектов можно воспользоваться уравнением [21]:

$$P = -d_n \sigma + \varepsilon_0 \chi E \ , \qquad (11.5.1)$$

где P – поляризованность пьезоэлемента;

σ – механическое напряжение в пьезоэлементе;

ε_0 – электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

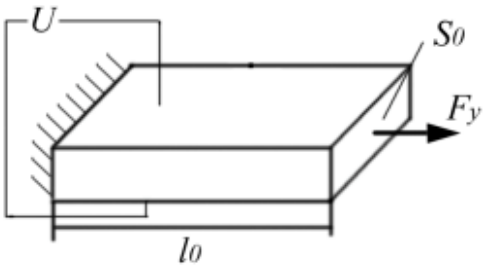


Рис. 11.5.1. Пьезоэлектрический элемент

χ – диэлектрическая восприимчивость пьезоматериала;

E – напряженность поля.

Из уравнения обратного пьезоэффекта получим

$$\frac{\Delta Y S_0}{l_0} = d_n Y S_0 E - S_0 \sigma \ , \qquad (11.5.2)$$

где Δ – деформация пьезоэлемента;

Y – модуль упругости;

S_0 – поперечное сечение пьезоэлемента;

l_0 – первоначальная длинна пьезоэлемента.

Выражение в левой части (11.5.2) описывает усилие упругой деформации F_y, первое слагаемое в правой части (11.5.2) – усилие в ПП, вызванное приложенным электрическим полем $F_Э$. Механическое напряжение, входящее во второе слагаемое правой части (11.5.2), определяется статическим усилием F_C, приложенным к ИО и действующим на ПП со стороны ИО, а также комплексом усилий, возникающих при движении ИО: динамическим усилием $F_{ДИН}$ пропорциональным ускорению ИО, и демпфирующим усилием $F_Д$. пропорциональным скорости смещения ИО и вызванным процессами диссипации энергии в ПП. Описанная детализация позволяет записать (11.5.2) в виде следующего условия равновесия сил, приложенных к подвижной границе активной части ПП:

$$F_Y = F_Э + F_C + F_Д + F_{ДИН} \ , \qquad (11.5.3)$$

где $F_У = K_У\Delta$ – усилие упругой деформации ПП, Н;

$F_Э = d_П Y S_0 E$ – усилие в ПП, вызванное приложенным электрическим полем, Н;

$F_С$ – статическое усилие, приложенное к ИО, Н;

$F_Д = -\dfrac{K_Д d\Delta}{dt}$ – демпфирующее усилие в ПП, Н;

$F_{ДИН} = -\dfrac{m_\Sigma d^2\Delta}{dt}$ – динамическое усилие в ПП, Н;

$K_У = \dfrac{YS_0}{l_0}$ – коэффициент упругости ПП, Н/м;

$K_Д$ – коэффициент внутреннего демпфирования ПП, кг/с;

m_Σ – эквивалентная приведенная суммарная масса подвижных частей, кг.

Воспользуемся также выражением для тока смещения в диэлектрике $I_{СМ}$. Учитывая, что для пьезоэлектрических материалов $\chi >>> 1$, запишем:

$$I_{СМ} = \frac{S_0 dp}{dt} \ . \qquad (11.5.4)$$

Ввёдем σ из (11.5.2) в уравнение прямого пьезоэффекта (11.5.1) и продифференцируем полученную зависимость по времени, полагая модуль Юнга и диэлектрическую восприимчивость не зависящими от напряжённости электрического поля и от механической напряжённости в ПП.

Подставив результат дифференцирования в (11.5.4), получим

$$I_{СМ} = \frac{C_0 dU}{dt} + K_П V \ , \qquad (11.5.5)$$

где $C_0 = \dfrac{\epsilon_0 \lambda S_0 \left(1 + K_{ЭМ}^2\right)}{l_0}$ – емкость ПП, Ф;

$K_П = K_У d_П$ – коэффициент прямого пьезоэффекта, К/м;

$U = El_0$ – напряжение, приложенное к электродам ПП, В;

$V = V = \dfrac{d\Delta}{dt}$ – скорость исполнительного органа, м/с;

$$K_{ЭМ}^2 = \frac{d_П^2 Y}{\epsilon_0 \chi}$$ – коэффициент электромеханической связи.

Установим связь между усилием $F_Э$ и электрическим напряжением, приложенным к электродам ПП:

$$F_Э = K_0 U \,, \qquad (11.5.6)$$

где $K_0 = K_У d_П$ – коэффициент обратного пьезоэффекта, Н/В.

Отметим, что коэффициенты обратного и прямого пьезоэффектов равны между собой.

Примем, что заряд ПП осуществляется от источника ЭДС $E_П$ через эквивалентное внутреннее сопротивление последнего $R_{ВТ}$. Для такой цепи справедливо уравнение

$$\frac{E_П - U}{R_{ВТ}} = I_{СМ} \,. \qquad (11.5.7)$$

После преобразований выражений (11.5.5) – (11.5.7) получим

$$\frac{dF_Э}{dt} = \frac{K_0 e_П - F_Э}{C_0 R_{ВТ}} - \frac{K_0 K_П}{C_0} \,. \qquad (11.5.8)$$

Уравнение (11.5.8), в сочетании с двумя нижеприведёнными (11.5.9) и (11.5.10), которые могут быть выведены из выражений для составляющих усилия $F_В$

$$\frac{dV}{dT} = \frac{F_Э + F_С - K_У \Delta - K_Д}{m_\Sigma} \,; \qquad (11.5.9)$$

$$\frac{d\Delta}{dt} = V \,, \qquad (11.5.10)$$

образуют полную систему дифференциальных уравнений, описывающих ПП с ИО при сделанных выше допущениях.

На основании уравнений (11.5.9) – (11.5.10) составлена структурная схема. Сворачивание структуры приводит к следующей передаточной функции ПП, управляемого от источника ЭДС:

$$W_{\Delta f}^{Э}(p)=\frac{\Delta(p)}{e_{П}(p)}= \tag{11.5.11}$$

$$\frac{K_0 / K_Y}{1+\left(R_{BT}C_0+\frac{K_Д}{K_Y}+R_{BT}K_П\frac{K_0}{K_Y}\right)p+\left(\frac{m_\Sigma}{K_Y}+R_{BT}C_0\frac{K_Д}{K_Y}\right)p^2+R_{BT}C_0\frac{m_\Sigma}{K_Y}p^3}.$$

Выражение (2.5.11) показывает, что в ПП кроме демпфирования, обусловленного внутренними диссипативными процессами, имеет место также демпфирование, связанное с прямым пьезоэффектом [21].

Полученное выше описание ПП (11.5.8) – (11.5.11) пригодно не только для простейшего случая однородного плоского элемента. В области частот от нуля до первого механического резонанса оно удовлетворительно описывает процессы в ПП всех типовых конструкций, обеспечивающих повышенные перемещения – наборных столбцах, кольцеобразных, биморфных и мембранных ПП. Наилучшее совпадение динамических характеристик модели и объекта получается при использовании для моделирования экспериментально определенных параметров m_Σ, $K_У$, K_0, $K_П$, C_0, R_{BT}.

Явление прямого пьезоэффекта затрудняет формирование управляющего поля, особенно при реализации быстропротекающих динамических процессов. Усилители на мощных транзисторах имеют выходное сопротивление порядка десятков Ом. Это позволяет при анализе динамики ПП малой ёмкости (биморфные элементы) пренебрегать малой электростатической постоянной времени $T_Э = R_{BT}/C_0$. При управлении ПП большой ёмкости для компенсации явлений, связанных с прямым пьезоэффектом, необходимо применять специальные технические меры, такие как организация специальных быстродействующих контуров регулирования управляющего поля, включение в схему усилителя дополнительных диодов, образующих цепи замыкания наведенных токов [21]. Пренебрежение в (11.5.11) внутренней обратной связью по скорости ($K_П \approx 0$), влиянием внутреннего демпфирования ($K_Д \approx 0$) и инерционностью преобразователя ($T_Э \approx 0$), приводит к передаточной функции консервативного звена:

$$W_{\Delta f}^{Э}(p) = \frac{\Delta(p)}{e_{П}(p)} \approx \frac{\left(\frac{K_0}{K_Y}\right)}{1 + \frac{m_\Sigma}{K_Y} p^2} \ . \qquad (11.5.12)$$

В заключение следует отметить, что по частоте $\omega_M = \left(K_Y / m_\Sigma \right)^{\frac{1}{2}}$ и амплитудам первых колебаний реально наблюдаемая затухающая переходная функция, соответствующая передаточной функции (11.5.11), мало отличается от незатухающей переходной функции, отвечающей выражению (11.5.12). Консервативное звено (11.5.12) может рассматриваться как модель самого грубого первого приближения для многих ПП.

11.6. Крип-эффект и методика борьбы с ним

Недостатком пьезокерамики является так называемый крип-эффект (*creep* – ползучесть) – запаздывание реакции на изменение величины управляющего электрического поля. На рис. 11.6.1 схематично показаны временные диаграммы изменения управляющих полей и соответствующих смещений сканера по оси *Z* и в плоскости *X*, *Y* [20].

Крип-эффект приводит к тому, что в СЗМ изображениях наблюдаются геометрические искажения, связанные с этим эффектом. Особенно сильно крип-эффект сказывается при выводе сканера в заданную точку для проведения локальных измерений и на начальных этапах процесса сканирования. Для уменьшения влияния крип-эффекта керамики применяются временные задержки в указанных процессах, позволяющие частично скомпенсировать запаздывание сканера.

Проведем аналогию и рассмотрим пьезосканер как груз, закреплённый на неподвижном основании пружиной с жесткостью *k*.

В качестве модели системы с одной степенью свободы рассмотрим тело массой *m*, удерживаемое упругой связью с жесткостью *k* (рис. 11.6.2). На тело действует вынуждающая сила:

$$F_{BH} = \frac{Q}{d} = \frac{CU}{d} \ ,$$

где C – емкость, d – пьезомодуль, U – управляющее напряжение.

В этом случае уравнение движения груза имеет вид

$$\ddot{x}m + kx = \frac{CU}{d},$$

или после деления на m

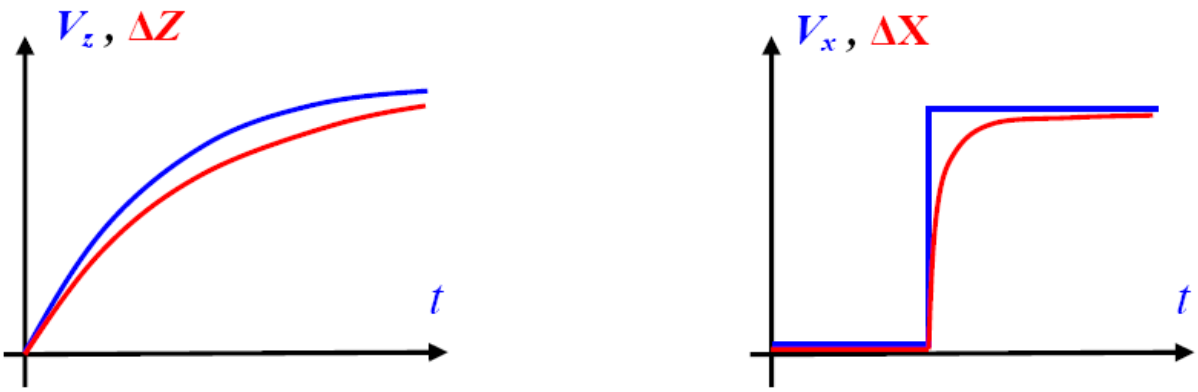


Рис. 11.6.1. Схематические временные диаграммы изменения управляющего поля на Z-электроде в цепи обратной связи и на X-электроде в процессе сканирования (верхние графики). на нижних графиках схематично показаны зависимости, соответствующие реакции сканера на изменение управляющих напряжений

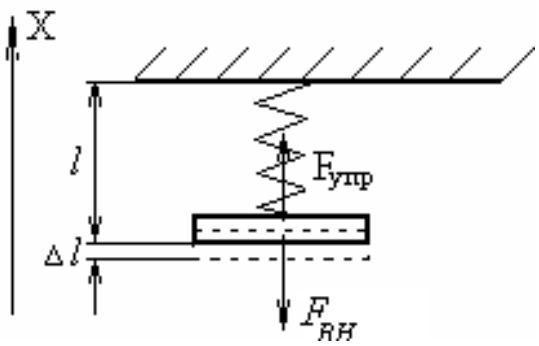


Рис. 11.6.2. Приближенная модель пьезосканера

$$\ddot{x}+\omega^2 x=\frac{CU}{md}.$$

Решаем уравнение:

$\ddot{x}+\omega^2 x=0$, где

$$\omega=\sqrt{\frac{k}{m}},$$

$$k=\frac{S\cdot E}{l}.$$

Решение уравнения:

$$x=C_1\cos\omega t+C_2\sin\omega t+\frac{F_{BH}}{k},$$

если $t = 0$, $x = 0$,

то $C_1=-\frac{F_{BH}}{k}$,

если $t=\frac{\pi}{4}=\frac{\pi}{2\omega}$, то $x=C_1\cos\frac{\pi}{2}+C_2\sin\frac{\pi}{2}+\frac{F_{BH}}{k}$,

если $x=\frac{F_{BH}}{k}$, $\Rightarrow C_2=0$, $x=-\frac{F_{BH}}{k}\cos\omega t+\frac{F_{BH}}{k}$,

$$x=\frac{F_{BH}}{k}(1-\cos\omega\, t).$$

$$v=\dot{x}=-\frac{F_{BH}}{k}\omega\sin\omega t,$$

$$a=\ddot{x}=-\frac{F_{BH}}{k}\omega^2\cos\omega t.$$

если $t = 0$, то $a=-\frac{F_{BH}}{k}\omega^2$, $v=0$, $x=0$.

если $t=\frac{T}{4}=\frac{\pi}{2\omega}$, то $a=0$, $v=-\frac{F_{BH}}{k}$, $x=-\frac{F_{BH}}{k}$.

F_{BH} можно также записать как

$$F_{BH} = \sigma S = \frac{\Delta l_{\max}}{l} ES,$$

выше $F_{BH} = \frac{Q}{d} = \frac{CU}{d}$,

$$\frac{C \cdot U}{d} = \frac{\Delta l_{\max}}{l} \cdot E \cdot S \;\Rightarrow\; \Delta l_{\max} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S}$$

– эта формула связывает механические и пьезоэлектрические свойства материала.

В качестве времени выхода пьезосканера в нужную точку возьмём четверть периода (T/4)гармонической функции, это время соответствует максимальному значению функции, в которое она выходит за это период.

Расчётная часть

В качестве материала пьезосканера возьмём пьезокерамику состава ЦТС 19.

Её параметры:

$D = 200 \cdot 10^{-12}$ В/м, $E = 0{,}7 \cdot 10^{11}$ Н/м^2, $\varepsilon = 1500$, $\rho = 7$ гр/см^3.

Пьезосканер представляет собой цилиндр с радиусом основания $R = 10$ мм и высотой $h = 30$ мм.

$$S = \pi \cdot R^2 = 3{,}14 \cdot (10^{-2})^2 = 3{,}14 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2.$$

$$C = \frac{\varepsilon_0 \cdot \varepsilon \cdot S}{h} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 1500 \cdot 3.14 \cdot 10^{-4}}{3 \cdot 10^{-2}} = 13{,}9 \cdot 10^{-11} \text{ Ф}.$$

Рассчитаем максимальное удлинение и вместе с ним и время выхода на режим для различных значений напряжения: U = 10В; 30В; 50В; 100В и 200В.

$$\Delta l_{\max 1} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13{,}9 \cdot 10^{-11} \cdot 10 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}7 \cdot 10^{11} \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-4}} = 9{,}5 \cdot 10^{-9} \text{ м}.$$

$$\Delta l_{\max 2} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13{,}9 \cdot 10^{-11} \cdot 30 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}7 \cdot 10^{11} \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-4}} = 28{,}5 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

$$\Delta l_{\max 3} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13{,}9 \cdot 10^{-11} \cdot 50 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}7 \cdot 10^{11} \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-4}} = 47{,}5 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

$$\Delta l_{\max 4} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13{,}9 \cdot 10^{-11} \cdot 100 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}7 \cdot 10^{11} \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-4}} = 95 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

$$\Delta l_{\max 5} = \frac{C \cdot U \cdot l}{d \cdot E \cdot S} = \frac{13{,}9 \cdot 10^{-11} \cdot 200 \cdot 3 \cdot 10^{-2}}{200 \cdot 10^{-12} \cdot 0{,}7 \cdot 10^{11} \cdot 3{,}14 \cdot 10^{-4}} = 190 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

Как видно, увеличивая напряжение, мы увеличиваем длину пьезосканера. Найдём время выхода на данную длину пьезосканера.

$$t = \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m \cdot \Delta l \cdot d}{C \cdot U}}.$$

$m = V \cdot \rho = S \cdot h \cdot \rho = 3{,}14 \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 7 \cdot 10^{3} = 65{,}94 \cdot 10^{-3}$ кг.

$$t = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{65{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{13{,}9 \cdot 10^{-11} \cdot 10}} = 14{,}9 \cdot 10^{-5} \text{ с.}$$

Вычислим перемещение конца столбца по другой, известной ранее формуле:

$$\xi = dU - \frac{4 S_{33} h F_c}{\pi D^2} =$$

$$= 200 \cdot 10^{-12} \cdot 10 - \frac{4 \cdot 1{,}43 \cdot 10^{-11} \cdot 3 \cdot 10^{-2} \cdot 1{,}46}{3{,}14 \cdot 4 \cdot 10^{-4}} = 1{,}8 \cdot 10^{-9} \text{ м.}$$

где h, D – геометрические параметры трубки и столбца, м;

U – напряжение питания пьезодвигателя, В;

S_{33} – величины, обратные модулю упругости пьезоматериала трубки и столбца;

F_c – внешняя силовая нагрузка, Н.

$$F_{c\max} = \frac{\pi d D^2 U}{4 S_{33} h} =$$

$$= \frac{3{,}14 \cdot 200 \cdot 10^{-12} \cdot 4 \cdot 10^{-4} \cdot 10}{4 \cdot 1{,}43 \cdot 10^{-11} \cdot 3 \cdot 10^{-2}} = 1{,}46 \text{ Н}.$$

Посчитаем, какое напряжение необходимо для выхода на данную длину за время на порядок меньше.

$$t = \frac{\pi}{4} = \frac{\pi}{2\omega} = \frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{m \cdot \Delta l \cdot d}{C \cdot U}} \Rightarrow U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4 t^2 C}.$$

Пусть $t = 10^{-5}$ с:

для $\Delta l = 9{,}5 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4 t^2 C} = \frac{3{,}14^2 \cdot 65{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot 9{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13{,}9 \cdot 10^{-11}} = 22{,}21 \text{ В};$$

для $\Delta l = 28{,}5 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4 t^2 C} = \frac{3{,}14^2 \cdot 65{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot 28{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13{,}9 \cdot 10^{-11}} = 67 \text{ В};$$

для $\Delta l = 47{,}5 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4 t^2 C} = \frac{3{,}14^2 \cdot 65{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot 47{,}5 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13{,}9 \cdot 10^{-11}} = 111 \text{ В};$$

для $\Delta l = 95 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4 t^2 C} = \frac{3{,}14^2 \cdot 65{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot 95 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13{,}9 \cdot 10^{-11}} = 222 \text{ В};$$

для $\Delta l = 190 \cdot 10^{-9}$ м,

$$U = \frac{\pi^2 m \Delta l d}{4 t^2 C} = \frac{3{,}14^2 \cdot 65{,}94 \cdot 10^{-3} \cdot 190 \cdot 10^{-9} \cdot 200 \cdot 10^{-12}}{4 \cdot 10^{-10} \cdot 13{,}9 \cdot 10^{-11}} = 444 \text{ В}.$$

Таблица 11.6.1

Результаты расчётов

U, В	$\Delta l \cdot 10^9$ м	$U_{ск}$, В
10	9,5	22,2
30	28,5	67
50	47,5	111
100	95	222
200	190	444

Результаты расчётов представлены в табл. 2.6.1.

Таким образом, что бы за меньший интервал времени выйти на нужную величину, нужно подать скачек напряжения за этот интервал и вернуть значение напряжения на тот уровень, который обеспечивает эту величину приращения.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 11

1. Багаев Д.В. Информационная технология проектирования гидромашин на стадиях предварительной разработки. – Дисс. на соиск. уч. ст. к.т.н. – Ковров: Ковровская государственная технологическая академия, 2003. – 214 с.
2. Норенков И.П. Основы автоматизированного проектирования: Учеб. для вузов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 360 с.
3. Сольницев Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления: Учеб. для вузов по специальности «Автоматика и управление в технологических системах». – М.: Высш. шк., 1991. – 335 с.
4. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И.И. Бажин, Ю.Г. Беленгард, М.М. Гайцгорн и др.; Под. общ. ред. С.А. Ермакова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
5. Автоматизированное проектирование следящих приводов и их элементов / Под. ред. В.Ф. Казмиренко. – М.: Энергоиздат, 1984.
6. Верминив Ю.Х. Основы автоматизации проектирования. – М.: Радио и связь, 1988. – 280 с.
7. Половинкин А.И. Основы инженерного творчества.: Учеб. пособие для студентов втузов. – М.: Машиностроение, 1988. – 368 с.
8. Панов В.М., Степанов А.И. Автоматизированное проектирование гидро- и пневмоприводов. Конструкторское проектирование: Учеб. пособие. – М.: МАДИ, 1987. – 218 с.
9. Хокс Б. Автоматизированное проектирование и производство / Пер. с англ. – М.: Мир, 1991. – 296 с.
10. Автоматизированное проектирование радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пововаров и др.; Под. ред. О.В. Алексеева. – М.: Высшая шк., 2000. – 479 с.
11. Соболь И.М., Статников Р.Б. Выбор оптимальных параметров в задачах со многими критериями. – М.: Наука, 1981.
12. Львов Б.Г. Основы теории технических систем. – М.: МИЭМ, 1991. – 136 с.

13. Арменский Е.В., Львов Б.Г., Митрофанов С.А. Стратегия построения концептуальной модели технического объекта / Межвузовский сборник “Методы моделирования и оптимизации в САПР конструкторско-технологических работ”. – М.:МИЭМ, 1989.
14. Слободин М.Ю., Царев Р.Ю. Компьютерная поддержка многоатрибутивных методов выбора и принятий решения при проектировании корпоративных информационно-управляющих систем. – СПб.: Инфо-да, 2004. – 223 с.
15. Подиновский В. В. Ногин В.Д. Парето-оптимальные решения многокритериальных задач. – М.: Наука, 1982.
16. Подиновский В. В. Об относительной важности критериев в многокритериальных задачах принятия решения // В кн.: Многокритериальные задачи принятия решений. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 48÷82.
17. Озерной В.М., Граф М.Г. Методология решения многокритериальных задач // Многокритериальные задачи принятия решений. – М.: Машиностроение, 1978. – С. 14÷17.
18. Мамиконов А.Г. Проектирование АСУ. – М.: Высшая школа, 1987. – 304 с.
19. Михалевич В.С., Волкович В.Л. Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. – М.: Наука, 1982. – 286 с.
20. Миронов. В.Л. Основы сканирующей зондовой микроскопии: Учебное пособие для студентов старших курсов высших учебных заведений. – Н. Новгород: Российская академия наук. Институт физики микроструктур, 2004. – 110 с.
21. Валиахметов В., Звездин В.В., Заморский В.В. Модель привода точной подстройки на основе пьезоэлектрического элемента / Материалы конференции. – Камский государственный политехнический институт, 2005.

ГЛАВА 12. СИСТЕМА ПОДДЕРЖКИ ПРИНЯТИЯ РЕШЕНИЙ ПРИ ПРОЕКТИРОВАНИИ ПРОЦЕССА ФОРМИРОВАНИЯ ОБЪЕКТОВ ЛАЗЕРНОЙ ОБРАБОТКИ

12.1. Структура проектирования процессов лазерной обработки

Первой задачей, составляющей предмет исследования, является задача разработки структуры информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процесса формирования объектов в лазерной технологии на начальных этапах проектирования[1]. В её основу положены методы проектирования и программно-технические средства, объединённые в технологическую цепочку, обеспечивающую сбор, обработку, хранение, распространение и отображение информации.

Программным средством, позволяющим решать указанные выше задачи, является проблемно-ориентированная автоматизированная система комплексного анализа структуры информационной системы поддержки принятия решений при проектировании процесса формирования объектов в лазерной технологии (рис. 12.1.1), которая является инструментарием проектировщика в рамках предлагаемой информационной технологии.

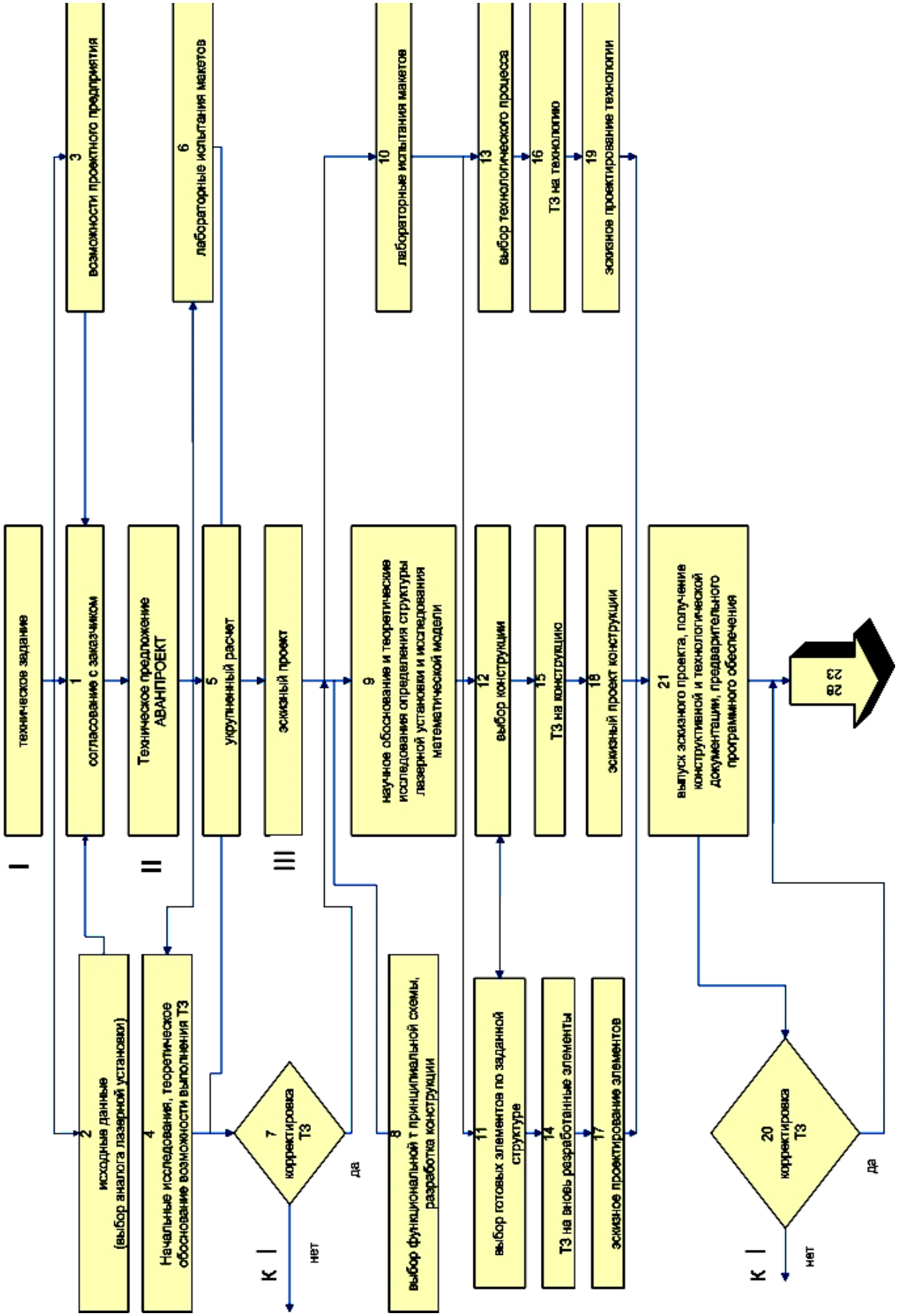
На рис. 12.1.2 представлена структура информационной технологии начальных этапов проектирования объектов в современной лазерной технологии.

В первую очередь осуществляется сбор необходимой для расчётов информации по справочникам. Затем следует обработка входной информации, включающая комплексный расчёт на ЭВМ статических идинамических характеристик лазерного оборудования, а так же систематизацию характеристик материалов. Как исходные данные, так и результаты расчётов должны быть сохранены в базе данных (БД). БД должна быть построена по

Рис. 12.1.1. Структура принятия решения в лазерной технологии

Рис. 12.1.2. Структура информационной технологии ранних этапов проектирования

иерархическому признаку. Между параметрами ввода и вывода необходимо обеспечить связь посредством взаимодействия БД. Кроме того, следует так же обеспечить обмен информации через интерфейсы с другими системами. Для осуществления ввода в ЭВМ конструкций и воздействующих на них внешних и внутренних факторов, а так же принятия решения по результатам расчётов, необходимо отобразить в графическом виде всю вход-


I
II
III
техническое задание
1
согласование с заказчиком
2
исходные данные
(выбор аналога лазерной установки)
3
возможности проектного предприятия
Техническое предложение
АВАНПРОЕКТ
4
Начальные исследования, теоретическое
обоснование возможности выполнения ТЗ
5
укрупненный расчет
6
лабораторные испытания макетов
7
корректировка
ТЗ
К I
нет
да
эскизный проект
9
научное обоснование и теоретические
исследования определения структуры
лазерной установки и исследования
математической модели
8
выбор функциональной т принципиальной схемы,
разработка конструкции
10
лабораторные испытания макетов
12
выбор конструкции
11
выбор готовых элементов по заданной
структуре
13
выбор технологического процесса
15
ТЗ на конструкцию
14
ТЗ на вновь разработанные элементы
16
ТЗ на технологию
18
эскизный проект конструкции
17
эскизное проектирование элементов
19
эскизное проектирование технологии
21
выпуск эскизного проекта, получение
конструктивной и технологической
документации, предварительного
программного обеспечения
20
корректировка
ТЗ
К I
нет
да
22

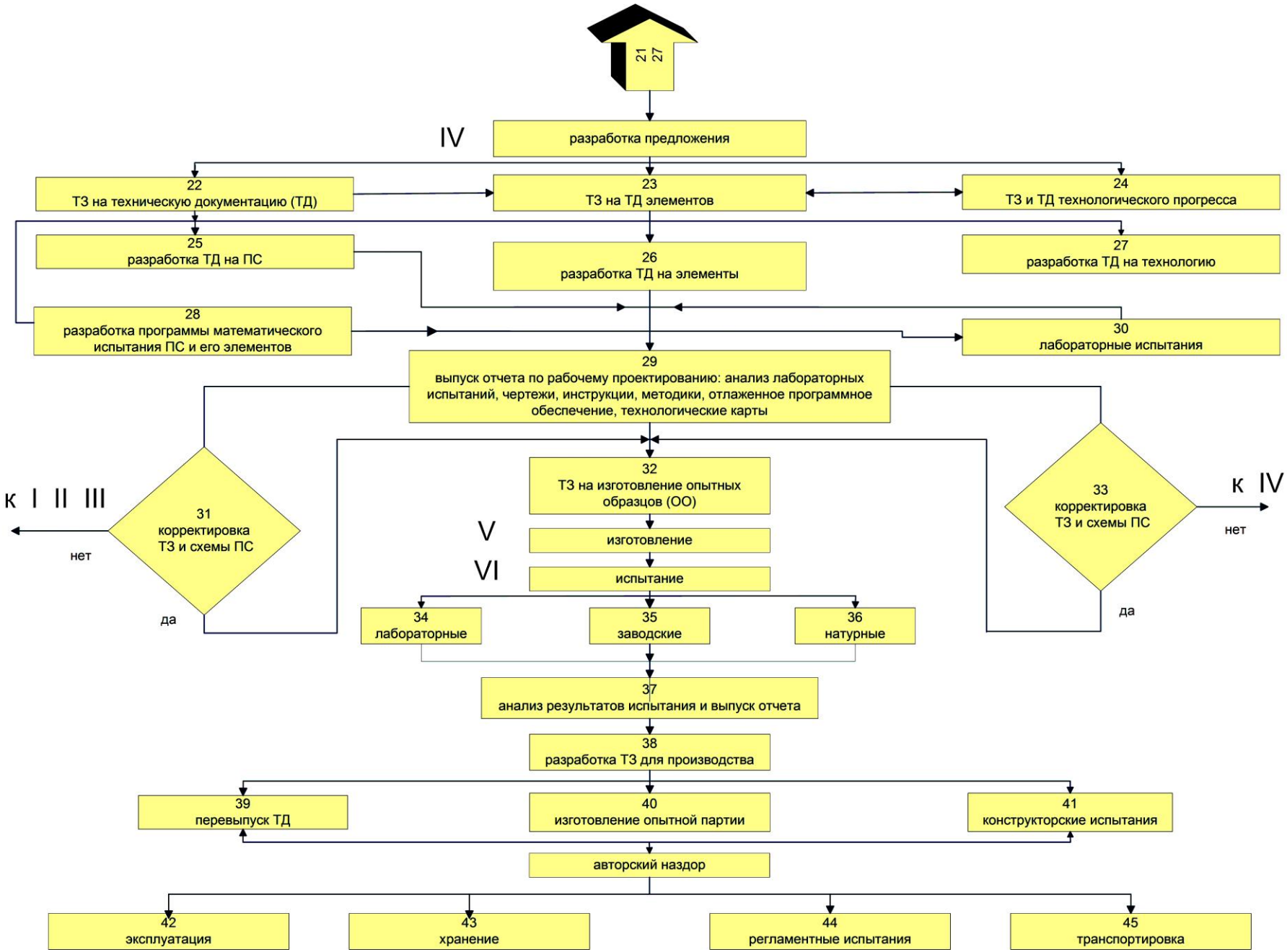


Рис. 12.1.3. Структура этапов проектирования лазерного оборудования

ную и выходную информацию на экране монитора.

Прогресс производства в современных условиях связывают с достижениями в области автоматизации производства. Поскольку проектирование и разработка технологии являются ступенью производства (логическим уровнем), то прогресс на этой ступени также должен определяться автоматизацией.

При неавтоматизированном проектировании результаты во многом определяются инженерной подготовкой конструкторов, производственным опытом, профессиональной интуицией и другими факторами [2–4].

В настоящее время проектирование конструкций лазерных технологических установок (ЛТУ) ведётся на основе неавтоматизированного подхода. Данный подход к проектированию включает в себя два уровня. На первом уровне проектирование ЛТУ вёдется на основе новой разработки, а на втором – выполняется согласно прототипу. В основном наибольшее применение получил второй уровень, который и будет рассмотрен ниже.

Второй уровень задается ГОСТом или ОСТом данной отрасли промышленности, уточняется на конкретном предприятии и представляет собой довольно трудоемкий процесс, традиционно состоящий из следующих этапов: согласование ТЗ, техническое предложение, эскизный проект, рабочее проектирование, изготовление опытных образцов, испытания (рис. 12.1.3) [2, 5].

Разберём последовательно содержание начальных стадий процесса проектирования, к которым традиционно относятся согласование ТЗ, техническое предложение и эскизный проект.

Этап согласования технического задания обычно реализуется во взаимодействии предприятия-«заказчика» (заказчик) и предприятия-«проектировщика» (конструктор). Заказчик, естественно, стремится получить от конструктора всё, что он хотел бы воплотить в проекте. Конструктор исходит из конкретных возможностей проектного предприятия и тех, необходимых в проектном деле и сохраняемых на непредвиденные случаи

запасов ресурсов, а также предварительных заделов по аналогичным разработкам, которыми он располагает (блок 1). Конструктор должен вначале определиться с аналогом (блок 2), выбрав схемное решение и найти ЛТУ близкое по характеристикам к разрабатываемой конструкции. Это достаточно трудоёмкий процесс работы с документацией. Данный этап реализован в виде блоков 1, 2, 3. Автоматизацию для приведённых блоков можно применить для блока 1.

Этап технического предложения предназначен для исследования разработки принципов построения ЛТУ, определения возможности выбора готовых или разработки новых её устройств, определения путей и способов проектирования (блок 4). На этом этапе формируются чертежи общих видов («деталировочные» чертежи), осуществляются предварительные расчёты и оценки динамических, точностных и других характеристик ЛТУ. Конструктор решает вопросы изготовления деталей и сборки всего изделия. Затем производятся расчёты новых размеров на основе технического задания и расчёты на прочность узлов ЛТУ (блок 5). Расчёты проводятся на основе эмпирических формул, что ведет к многообразию возможных решений, в зависимости от констант. Выбор необходимого решения зачастую происходит достаточно субъективно. Далее разработчик либо проводит исследования математической модели движения, либо пропускает этот этап. Реализация данного этапа выполнена в виде блоков 4, 5, 6. С точки зрения автоматизации данный этап является одним из наиважнейших, так как именно на этом этапе определяется целесообразность принятия решения по проектированию (процессов в лазерной технологии) конструкции ЛТУ. Кроме того, практически все блоки этапа, кроме блока 6, могут быть автоматизированы.

Этап эскизного проектирования (ЭП) начинается с результатов предыдущего этапа и заканчивается конструктивной схемой лазерной установки и её узлов (блок 21). Именно конструктивная схема, выбранная и детально обоснованная на этом этапе расчётами, моделированием и испы-

таниями на макетах, служит основной для разработки конструкторской и технологической документации по изготовлению лазерных установок и её деталей и узлов. Конструктивные схемы являются неотъемлемой частью проекта, что качественно отличает этот этап от предыдущих. На этапе ЭП осуществляется декомпозиция (разбиение) лазерной установки на устройства, а устройств – на элементы (блок 8). Ведётся сложная, кропотливая разработка и взаимная увязка этих устройств и элементов. Здесь критерии, условия и ограничения носят более детальный и конкретный характер. Сроки их проектирования и стоимости меньше. Документация, выпуска-емая на этом этапе, носит временный характер и служит для изготовления отдельных экспериментальных макетов и образцов устройств лазерной установки. Такая документация содержит эскизы конструкций, техноло-гических карт, монтажных схем, условия технической эксплуатации, предварительное программное обеспечение. По этой эскизной документации на опытном производстве изготовляются макеты изделий и узлов лазерной установки. Макеты объединяются в комплексные стенды, на которых начинается реализация наиболее трудоёмких и сложных проектных процедур лазерных установок – анализ отдельных её устройств и элементов методами стендовых испытаний и физического моделирования. Кроме того на этапе эскизного проектирования составляются математические модели, алгоритмы и решаются задачи анализы и синтеза лазерных установок, оптимизации её параметров, вырабатываются вычислительные алгоритмы (блоки 9, 11, 12). В дальнейшем проводятся конструкторские расчёты устройств лазерной установки на прочность, жесткость, определяются моменты инерции и центры тяжести, предварительные согласования габаритных, установочных и присоединительных размеров изделия; предварительно проводится оценка показателей качества изделия, рассчитывается надёжность, проводится детальное технико-экономическое обоснование проекта. Последний из прилагаемых этапов наиболее длинный и содержит 14 различных блоков. Если обратить внимание на структуру схемы, то можно заметить, что с ле-

вой стороны расположены блоки, которые отвечают за документооборот, в середине находятся блоки, выполняющие основную задачу процесса моделирования, а именно выбор, расчёт и анализ, а справой стороны расположены блоки, отвечающие за испытание и технологию. Для автоматизации процесса эскизного проектирования целесообразно автоматизировать блоки 8, 9, 11, 12, 14, 15, 17, 18 и 21.

Проведённый анализ процесса проектирования лазерных установок позволяет перейти к решению одной из важнейших задач при создании ИТ – выбору проектных процедур, подлежащих автоматизации. Для решения этой задачи необходимо формализовать процесс проектирования, составить его математические модели с тем, чтобы обоснованно проводить математизацию проектных процедур.

Следует особо подчеркнуть проблемы, которые появляются при проектировании лазерных установок, а именно [2, 6]:

1. Сложность и уникальность деталей лазерных установок, конструирование которых осуществляется в трёхмерном пространстве.
2. Обеспечение прочности при разработке лазерных установок.
3. Необходимость учёта технологических проблем в лазерной установке.
4. Сравнительно низкий уровень межотраслевой и внутриотраслевой унификации и стандартизации деталей, узлов, проектных и конструкторских решений, что требует создания на каждом предприятии своей базы данных, содержащей индивидуальные математические, графические и информационные модели элементов.

Разработка любого лазерного технологического процесса обычно включает в себя (рис. 12.1.4) создание модуля (установки), получение или выбор материалов для лазерного процесса и отработку самого процесса.

Оптимизация технологических лазерных процессов проводится по параметрам формируемых структур, технологическому согласованию лазерных процессов и производительности [1, 4].

Рис. 12.1.4. Структура лазерного процесса

12.2. Схема процесса автоматизированного проектирования оборудования для производства объектов лазерной обработки

При проектировании оборудования для производства объектов лазерной технологии решаются следующие проектные задачи (рис. 12.2.1):

- задачи синтеза;
- задачи анализа и оптимизации;
- исследование разбросов;
- обеспечение надежности.

Задача синтеза технических объектов направлена на создание новых вариантов проектных решений. Создаваемые в процессе синтеза проектные решения должны быть оформлены на языке оформления проектной задачи, например в виде чертежей, схем и пояснительного текста. В этом языке действуют правила, установленные единой системой конструкторской документации (ЕСКД) [7].

В случае структурного синтеза синтезируется структура проектируемого объекта, в случае проектируемого – синтезируются параметры проектируемого объекта. Задача анализа технических объектов направлена на изучение их свойств. В процессе анализа исследуются заданные объекты.

Рис. 12.2.1. Классификация проектных задач

Выходные характеристики оборудования, режим работы его элементов, тепловые и механические режимы установки и т.д. можно получить путём решения задачи анализа.

Довольно часто задачи синтеза решаются путём многократного решения задач анализа [7].

Поиск наилучшего проектного решения осуществляет решение задачи оптимизации. Если в процессе оптимизации ищется наилучшая структура, то такая задача является структурной оптимизацией, а если при заданной структуре отыскиваются параметры объекта, удовлетворяющие заданному критерию, то это параметрическая оптимизация.

Эффективность оптимизации в значительной мере определяется правильным выбором критериев и целевых функций. Основной целью в данном случае является разработка технологического процесса, позволяющего с наименьшими затратами выполнить требуемую операцию и обеспечить заданное качество. Основную группу критериев составляют стоимостные:

$$C = \sum_{i=1}^{p} c_i \ ,$$

где p – число переходов (операций); c_i - затраты на выполнение i-го перехода [8].

Параметры элементов любого технического объекта не могут иметь точно заданные значения. Это является следствием неизбежных погрешностей технологического оборудования, влияния внешних факторов, разбросов параметров материалов и т.д. Поэтому параметры элементов являются случайными величинами. Выходные характеристики партии объектов будут лежать в некотором диапазоне. Хорошо если этот диапазон не выходит за рамки регламентируемого в техническом задании. Учесть влияние разбросов параметров элементов на выходные характеристики и уменьшить это влияние позволяет решение задачи исследования разбросов.

Задача обеспечения надёжности направлена на достижение, заданных в техническом задании, показателей надёжности. Первая особенность

этой задачи заключается в том, что её решение осуществляется на всех этапах проектирования и при выполнении большинства проектных операций. Вторая особенность заключается в том, что решение этой задачи интегрирует в себе результаты решения практически всех задач анализа характеристик объекта и исследования их разбросов [7].

Исходным документом является ***техническое задание (ТЗ)***. В нём перечислены все технические требования, предъявляемые к создаваемой установке.

В состав основных требований входят:

- значение выходных характеристик и их допустимые разбросы (шероховатость поверхности, геометрическая дефектность, примесная дефектность, адгезионные свойства и т.п.);
- показатели надёжности (время эксплуатации, срок службы и др.);
- условия эксплуатации (давление и рабочая температура);
- специальные воздействия – электромагнитная и магнитная поляризация (использование воздействия перпендикулярного магнитного поля, использование электромагнита);
- условия хранения и транспортировки.

На основе технического задания создается проект (рис. 12.2.2, стрелка 1). Это эвристический набросок оборудования. На этом этапе разрабатываются эскизы структурной и функциональной схем устройства, производится предварительная компоновка и размещение.

На основе эскизов схем и конструкций производится формализация проекта (стрелка 2), результатом которой являются физические модели, схемы конструкции, составленные в терминах соответствующего научного направления. Формализация проекта производится с позиции системного подхода и заключается в учёте тех или иных факторов, влияющих на функционирование аппаратуры при построении физических моделей.

На основе физических моделей получают математические модели (стрелка 3), полученные с использованием математических методов и законов

соответствующих наук. Они являются основой для расчёта выходных характеристик, проектируемой аппаратуры, а также параметров и факторов по которым оценивается фактическое состояние схемы или конструкции [7].

Решение этих задач основано на применении теории графов – разделе математики, оперирующем формальным представлением связей между

Рис. 12.2.2. Схема процесса автоматизированного проектирования для производства объектов в лазерной технологии

объектами. Исходным для решения топологических задач является принципиальная схема разрабатываемого устройства, которая по определённым правилам представляется в виде графа. Далее, в зависимости от задачи, над графом проводятся соответствующие преобразования для получения решения, которое удовлетворяет принятому критерию.

Граф есть некоторое абстрактное представление схемы, не учитывающей её электрические параметры.

В результате расчёта с использованием математических моделей (стрелка 4) получается информационная модель устройства, которая включает в себя расчётные значения выходных характеристик, требования технического задания, информацию из технических условий на элементы оборудования, расчётные значения электрических, тепловых и механических режимов работы элементов, показатели, определяющие надёжность и качество изделия, а также множество внутренних параметров схемы и конструкции, которые могут быть управляемыми. Под множеством управляемых параметров понимается перечень внутренних параметров аппаратуры, которые можно изменять в процессе проектирования, для улучшения выходных характеристик оборудования и режимов работы её элементов.

Путём сопоставления требований ТЗ с расчётными характеристиками режимов работы элементов с допустимыми режимами, приведёнными в технических условиях (стрелка 5), выявляются те характеристики и режимы работы элементов, которые необходимо изменить. На этой основе строится модель чувствительности.

В результате расчёта модели чувствительности (стрелка 6) определяются функции чувствительности, показывающие степень влияния управляемых параметров на выходные характеристики и позволяющие окончательно сформулировать проектные задачи (стрелка 7), которые необходимо решить для доработки проекта [7].

Таким образом, можно выделить три группы проектных задач:

- задачи синтеза, расчёта и оптимизации структуры и параметров оборудования;
- задачи исследования разбросов параметров вокруг номинальных значений;
- задачи обеспечения показателей надёжности и качества.

Решение сформулированных проектных задач позволяет внести соответствующие изменения в схему и конструкцию проектируемого оборудования и уточнить проект.

Так как решения в процессе проектирования принимаются в условиях отсутствия полной информации, то возникают ситуации, когда были приняты не реализуемые, по тем или иным причинам, решения. Их исправление происходит путём повторного выполнения проектных процедур.

Процесс проектирования реализуется путём моделирования различных физических процессов, протекающих в оборудовании при его функционировании.

12.3. Математические модели объекта проектирования

Математическая модель включает в себя совокупность математических элементов (чисел, переменных векторов, множеств и т.п.) и отношений между ними, которые с требуемой для проектирования точностью описывают свойства проектируемого объекта. На каждом этапе проектирования используется свое математическое описание проектиру-емого объекта, сложность которого должна быть согласована с возможнос-тями анализа на ЭВМ, что приводит к необходимости иметь для одного объекта несколько моделей различного уровня сложности [4].

Описание объекта проектирования в форме математической модели должно включать следующие компоненты и правила:

C – цель функционирования;

$N\{n_d\}$ – множество элементов, составляющих систему;

$T\{t_c\}$ – множество элементов времени;

$П_m\{n_m^K\}$ – множество признаков, характеризующих систему в целом на всех этапах жизненного цикла;

$П_B\{П_B^C\}$ – множество признаков, характеризующих элементы на всех этапах жизненного цикла;

$D^e\{d_B^K\}$ – множество состояний элементов в рассматриваемый промежуток времени;

$W = D^e \times T$ – правило упорядочения смены состояний;

$V\{n_d, n_e\}$ – множество связей между всеми элементами системы;

$R:\{n_B^K = p_u(n_d^K)\}$ – математические схемы, описывающие отношения между признаками элементов и признаками систем;

$П_a\{П_a\}$ – множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой;

$П_0 = ОП_1 \to ОП_2 \to \ldots ОП_l, l = \overline{1\ldots L}$ – процесс проектирования;

$ОП_1, ОП_2 \ldots ОП_l$ – описание объекта проектирования на разных этапах его разработки;

$ОП_1 = C_0 = \{c_1, c_2, \ldots, c_u\}$ – целевое описание объекта проектирования;

$ОП_2 = \{C_0, П_m\}$ – концептуальное описание объекта проектирования.

Функциональное описание объекта содержит множество признаков, определяющих взаимодействие системы со средой $П_a$ и правило упорядочения смены состояний $W : ОП_3 = \{П_a, W\}$.

Структурное описание системы включает множества: элементов составляющих систему *N*; признаков, характеризующих элементов на всех этапах жизненного цикла $П_B$; связей между всеми элементами системы *V*, т.е. $ОП_4 = \{N, П_B, V\}$.

Динамическое описание включает математические модели, построенные на множестве признаков, определяющих взаимодействие системы со средой $П_a$, множестве элементов времени *T* и математических схемах,

описывающих отношения между признаками элементов и признаками системы [38]:

$$ОП_5 = \{П_a, T, R : (П_B^K = p_u(n_d^k))\}.$$

Важный аспект проектирования оборудования – разработка наиболее экономичного, для разных производственных условий, варианта перехода от описания конструкции в виде математической модели к готовому изделию [8].

Математическую модель любого объекта характеризуют внутренними, внешними, выходными параметрами и фазовыми переменными. Внутренние параметры модели определяются характеристиками компонентов, входящих в проектируемый объект. Каждый из параметров, в свою очередь, может быть функцией, вектором или ещё более сложным математическим функционалом в зависимости от объекта проектирования [4].

Выходные параметры модели – это показатели, характеризующие функциональные, эксплутационные, конструкторско-технологические, экономические и другие характеристики проектируемого объекта. К таким показателям могут относиться коэффициенты передачи, масса, габариты проектируемого объекта, надёжность, стоимость и т.п. Понятия внутренних выходных параметров инвариантны. При моделировании на более сложном уровне выходные параметры могут стать внутренними и наоборот.

Внешние параметры модели – это характеристики внешней по отношению к проектируемому объекту среды, а также рабочие управляющие воздействия.

Уравнения математической модели могут связывать некоторые физические характеристики компонентов, которые полностью характеризуют состояние объекта, но не являются выходными или внутренними параметрами модели (фазовые переменные). Использование вектора фазовых переменных позволяет упростить алгоритмическую реализацию программ, составляющих уравнения математической модели устройства.

Математические модели компонентов представляют собой системы уравнений, устанавливающих связь между фазовыми переменными, внутренними и внешними параметрами, относящимися к данному компоненту. Эти уравнения являются компонентными, а соответствующая модель компонентой [4].

Математическая модель объекта проектирования, представляющего объединение компонентов, получают на основе математических моделей компонентов, входящих в объект. Объединение компонентных уравнений в математическую модель объекта осуществляется на основе фундаментальных физических законов, выражающих условия непрерывности и равновесия фазовых переменных. Уравнения, описывающие эти законы, называют топологическими, они отражают связи между компонентами в устройстве. Совокупность компонентных и топологических уравнений для проектируемого объекта образует систему, являющуюся математической моделью объекта.

Математические модели деталей и процессов на микроуровне отражают непрерывные физические процессы, протекающие в сплошных средах. Независимыми переменными в этих моделях являются пространственные координаты и время. В качестве зависимых переменных выступают переменные, такие как потенциалы, напряженности полей, концентрации частиц, деформации и т.п. Взаимосвязи переменных выражаются с помощью уравнений математической физики – интегральных, интегро-дифференциальных или дифференциальных уравнений в частных производных. Эти уравнения составляют основу математических моделей на микроуровне [8].

Для получения законченной математической модели, используемой в задачах проектирования, необходимо дополнительно выполнить ряд процедур:

- выбрать краевые условия. Краевые условия представляют собой сведения о значениях фазовых переменных и (или) их производных на границах рассматриваемых пространственных и временных областей;

- дискретизировать задачу. Дискретизация подразумевает разделение рассматриваемых пространственных и временных областей на конечное число элементарных участков с представлением фазовых переменных конечным числом значений в избранных узловых точках, принадлежащих элементарным участкам;
- алгебраизировать задачу – аппроксимировать дифференциальные и интегральные уравнения алгебраическими.

Используют два основных подхода к дискретизации и алгебраизации краевых задач, составляющих сущность методов конечных разностей (МКР) и конечных элементов (МКЭ). С помощью любого из этих методов формируется окончательная модель, исследуемая при выполнении различных процедур анализа проектируемого объекта.

Пользователь автоматизированного проектирования, средствами входного языка, задает исходную информацию о конфигурации проектируемого объекта, о способе дискретизации – разделении среды на элементы, о физических свойствах участков среды. Формирование модели объекта, т.е. разделение среды на элементы, выбор математических моделей элементов из заранее составленных библиотек, объединение моделей элементов в общую систему уравнений, так же как и решений получающихся уравнений, осуществляется автоматически на ЭВМ.

Основу большинства моделей объектов на микроуровне составляют дифференциальные уравнения.

Примерами уравнения теплопроводности, диффузии, упругости, электродинамики, газовой динамики, в которых независимыми параметрами являются время t и пространственные координаты x_i, а зависимыми могут быть температура, концентрация частиц, напряженность поля, деформация, электрические разряды, плотность и т.п. Общий вид дифференциального уравнения в частных производных (ДУЧП) [8]:

$$L_{\varphi}(Z) = f(Z), \qquad (12.3.1)$$

где $Z = (t, x_1, x_2, x_3)$ – вектор независимых переменных; $f(Z)$ – функция, выражающая заданные внешние воздействия на исследуемую среду; L – дифференциальный оператор; $\varphi(Z)$ – функция, определяемая природой описываемого объекта.

В частных случаях в вектор Z может входить менее четырех переменных. Если в Z отсутствует t, то уравнение является стационарным, в противном случае – нестационарным. Уравнение может быть одно-, двух- и трёхмерным в зависимости от числа переменных x_i в векторе Z.

В качестве L могут фигурировать также интегральные или интегро-дифференциальные операторы[8].

Переход на макроуровень осуществляется путем выделения в моделируемом объекте конечного числа частей (элементов). Такое выделение можно представить как дискретизацию пространства, при которой из независимых переменных исключаются пространственные координаты. Вместо полей фазовых переменных $\varphi(Z)$ появляется конечное число фазовых переменных $\varphi(t)$, каждая из которых относится к определенному элементу дискретизированного пространства.

При переходе к представлениям макроуровня уравнение (12.3.1) превращается в систему обыкновенных дифференциальных уравнений (ОДУ):

$$\Psi(V, V', t) = 0, \qquad (12.3.2)$$

где V – вектор фазовых переменных, $V = \dfrac{dV}{dt}$.

Состояние объекта выражается значениями фазовых переменных. Типичные математические модели на макроуровне, представленные уравнениями (12.3.2) с заданными начальными условиями V_0, описывают непрерывные процессы смены состояний в исследуемом объекте. В частных случаях могут исследоваться только установившиеся состояния, тогда V=0, и (12.3.2) вырождается в систему алгебраических уравнений:

$$F(V) = 0. \qquad (12.3.3)$$

Переход к представлениям верхних иерархических уровней для аналоговых и дискретных объектов осуществляется по-разному.

Исходя из задач конкретного этапа проектирования математическая модель проектируемого объекта должна отвечать самым различным требованиям: отражать с требуемой точностью зависимость выходных параметров объекта от его внутренних и внешних параметров в широком диапазоне их изменения; иметь однозначное соответствие физическим процессам в объекте; включать необходимые аппроксимации и упрощения, которые позволяют реализовать её программно на ЭВМ с различными возможностями; иметь большую универсальность, т.е. быть применимой к моделированию многочисленной группы однотипных устройств; быть экономичной с точки зрения затрат машинных ресурсов и т.п. Эти требования, в своем большинстве, являются противоречивыми, и удачное компромиссное удовлетворение этих требований в одних задачах может оказаться далёким от оптимальности в других. По этой причине для одного и того же компонента или устройства часто приходится иметь не одну, а несколько моделей. В связи с этим классификация моделей должна выполняться по множеству признаков, чтобы описать все возможные случаи [37].

Математические модели должны удовлетворять таким требованиям, как:

- адекватность;
- универсальность;
- экономичность.

Адекватность математических моделей

Модель считается адекватной, если она отражает заданные свойства объекта с приемлемой точностью. Точность определяется как степень совпадения значений выходных параметров модели и объекта. Пусть ε_j – относительная погрешность модели по j-му выходному параметру:

$$\varepsilon_j = (\tilde{y}_j - y_j) / y_j, \qquad (12.3.4)$$

где $\tilde{y}_j$ – j-ый и выходной параметр, рассчитанный с помощью модели; y_j – тот же выходной параметр, имеющий место в моделируемом объекте [10].

Погрешность модели ε_M, по совокупности учитываемых выходных параметров, оценивается одной из норм вектора $\varepsilon = (\varepsilon_1, \varepsilon_2, ..., \varepsilon_m)$, например,

$$\varepsilon_M = \max_{j=1,m} |e_j| \text{ или } \varepsilon_M = \sqrt{\sum_{j=1}^{m} \varepsilon_j^2} \ . \qquad (12.3.5)$$

Точность модели различна в разных условиях функционирования объекта. Эти условия характеризуются внешними параметрами. Если задаться предельной допустимой погрешностью $\varepsilon_{ïðåä}$, то можно в пространстве внешних параметров выделить область, в которой выполняется условие $\varepsilon_M < \varepsilon_{ïðåä}$.

Эту область называют областью адекватности (ОА) модели. Возможно введение индивидуальных предельных значений $\varepsilon_{ï\,ðåä\,j}$ для каждого выходного параметра и определение ОА как области, в которой одновременно выполняются все m условий вида $|e_j| \le \varepsilon_{ïðåä\,j}$.

Пример области адекватности (заштрихована) в двумерном пространстве представлен на рис. 12.3.1. Здесь q_k – k-ый внешний параметр [39].

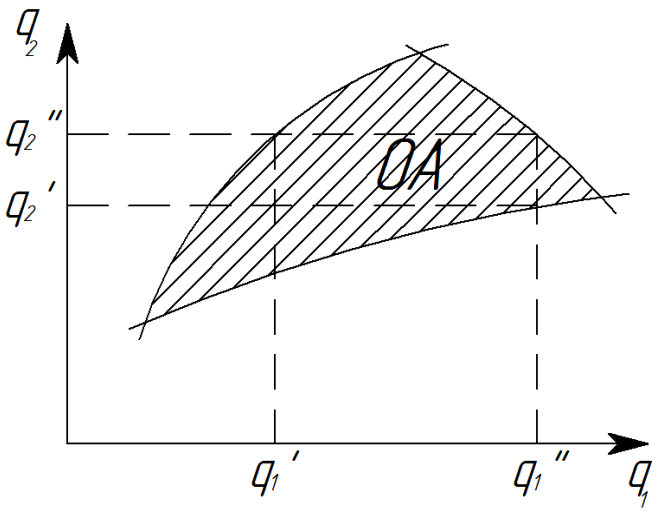


Рис. 12.3.1. Область адекватности

Определение областей адекватности для конкретных моделей – сложная процедура, требующая больших вычислительных затрат. Эти затраты и трудности представления ОА быстро растут с увеличением размерности пространства внешних параметров. Определение ОА – более трудная задача, чем, например, задача параметрической оптимизации, поэтому для моделей вновь проектируемых объектов ОА не рассчитывают.

Для моделей унифицированных элементов расчёт областей адекватности становится оправданным в связи с однократностью определения ОА и многократностью их использования при проектировании различных систем. Знание ОА позволяет правильно выбирать модели элементов из числа имеющихся и тем самым повышать достоверность результатов машинных расчётов [10].

В общем случае ОА может иметь произвольную форму, сведения о которой выражаются громоздко, и неудобна в использовании, поэтому на практике вместо истинных ОА применяют те или иные их аппроксимации. Наиболее просто представляются и используются сведения об областях, имеющих формулу гиперпараллелепипеда, который задается p двусторонними неравенствами:

$$q'_k \le q_k \le q''_k,\ k = \overline{1, p}\,.$$

Здесь p – размерность пространства внешних параметров.

В библиотеку моделей элементов наряду с алгоритмом, реализующим модель и номинальными значениями параметров, должны включаться граничные значения внешних параметров q'_k и q'', задающие область адекватности.

Графическое представление области адекватности и аппроксимирующего ее гиперпараллелепипеда удобно для двумерных случаев (см. рис. 12.3.1).

Возможно использование и других аппроксимаций ОА, например областей с линеаризованными границами в виде участков гиперплоскостей, областей в форме гиперсфер и т.п.

Универсальность

При определении ОА необходимо выбрать совокупность внешних параметров и совокупность выходных параметров, отражающих учитываемые в модели свойства. Типичными внешними параметрами при этом являются параметры нагрузки и внешних воздействий (электрических, механических, тепловых, радиационных и т.п.). Увеличение числа учитываемых внешних факторов расширяет применимость модели, но существенно удорожает работу по определению ОА. Выбор совокупности выходных параметров также неоднозначен, однако для большинства объектов число и перечень учитываемых свойств и соответствующих им выходных параметров сравнительно невелики, достаточно стабильны и составляют типовой набор выходных параметров [10]. Например, для макромоделей оборудования для производства объектов лазерной технологии, такими выходными параметрами являются: диаметр пучка, мощность лазерной установки, КПД и др.

Если адекватность характеризуется положением и размерами ОА, то универсальность модели определяется числом и составом учитываемых в модели внешних и выходных параметров.

Экономичность

Экономичность модели характеризуется затратами вычислительных ресурсов для её реализации, а именно затратами машинного времени T_M и памяти $\ddot{I}_M$. Общие затраты T_M и $\ddot{I}_M$ на выполнение в автоматизированном проектировании какой-либо проектной процедуры зависят как от особенностей выбранных моделей, так и от методов решения.

В большинстве случаев, при реализации численного метода, происходят многократные обращения к модели элемента, входящего в состав моделируемого объекта. Тогда удобно экономичность модели элемента характеризовать затратами машинного времени, получающимися при обращении к модели, а число обращений к модели должно увеличиваться

при оценке экономичности метода решения.

Экономичность модели по затратам памяти оценивается объёмом оперативной памяти, необходимой для реализации модели.

Требования широких областей адекватности, высокой степени универсальности, с одной стороны, и высокой экономичности, с другой, являются противоречивыми. Наилучшее компромиссное удовлетворение этих требований оказывается неодинаковым в различных применениях. Это обстоятельство обусловливает использование в автоматизированном проектировании многих моделей для объектов одного и того же типа – различного рода макромоделей, многоуровневых, смешанных моделей и т.п. [10].

Математическая модель элемента (ММЭ), наиболее точно отражающая свойства моделируемого объекта, называется полной моделью. ММЭ менее универсальные и точные, но более экономичные по сравнению с полной моделью называются макромоделями.

12.4. Уравнение состояния лазерной технологической системы

Лазерной системе свойственно определенная совокупность термодинамических форм движения материи. Важно отметить, что все эти формы движения, определяющие внутренние степени свободы системы, органически связаны между собой.

Число связанных степеней свободы l, как и общее число степеней свободы m, зависит от конкретных свойств системы. С изменением условий, в которых находится система, величины l и m могут изменяться.

Наличие связей между внутренними степенями свободы позволяет аналитически отобразить состояние системы, так как каждая функция состояния однозначно определяется факторами экстенсивности E. В соответствии с этим всегда можно составить такие уравнения, в которых аргументами будут служить факторы экстенсивности E, а функциями – функции состояния.

Лазерную систему можно рассматривать как совокупность двух потоков излучения: электромагнитного и электронно-ионного. При этом, уравнение состояния для двух связанных внутренних степеней свободы (m=2) имеет вид [11]:

$$\left.\begin{aligned} L_1 &= f_1(s_1, s_2) \\ L_2 &= f_2(s_1, s_2) \end{aligned}\right\}, \qquad (12.4.1)$$

или (в дифференциальной форме):

$$\left.\begin{aligned} dL_1 &= A_{11}ds_1 + A_{12}ds_2 \\ dL_2 &= A_{21}ds_1 + A_{22}ds_2 \end{aligned}\right\},$$

где коэффициенты

$$A_{11} = \left(\frac{\partial L_1}{\partial s_1}\right)_{s_2}; \; A_{22} = \left(\frac{\partial L_2}{\partial s_2}\right)_{s_1};$$

$$A_{12} = \left(\frac{\partial L_1}{\partial s_2}\right)_{s_1}; \; A_{21} = \left(\frac{\partial L_2}{\partial s_1}\right)_{s_1}.$$

Продифференцировав уравнение (12.4.1) по x, имеем:

$$\frac{dL_1}{dx} = \frac{dL_1}{ds_1}\cdot\frac{ds_1}{dx} + \frac{dL_1}{ds_2}\cdot\frac{ds_2}{dx};$$

$$\frac{dL_2}{dx} = \frac{dL_2}{ds_1}\cdot\frac{ds_1}{dx} + \frac{dL_2}{ds_2}\cdot\frac{ds_2}{dx}.$$

Умножим первое уравнение на коэффициент C_{11}, а второе на C_{22}:

$$C_{11}\frac{dL_1}{dx} = C_{11}\frac{dL_1}{ds_1}\cdot\frac{ds_1}{dx} + C_{11}\frac{dL_1}{ds_2}\cdot\frac{ds_2}{dx};$$

$$C_{22}\frac{dL_2}{dx} = C_{22}\frac{dL_2}{ds_1}\cdot\frac{ds_1}{dx} + C_{22}\frac{dL_2}{ds_2}\cdot\frac{ds_2}{dx}. \qquad (12.4.2)$$

Левая часть первого уравнения определяет полный поток s_1 в системе, левая часть второго уравнения – поток s_2, т.е.

$$j_1 = -C_{11}\frac{dL_1}{dx};$$

$$j_2 = -C_{22}\frac{dL_2}{dx}.$$

Если градиент второго потенциала равен нулю $\left(\frac{dL_2}{dx} = 0\right)$, то второго потока нет, а в первой формуле выражения (12.4.2) слагаемое $\left(\frac{dL_1}{ds_1}\frac{ds_1}{dx}\right)$ представляет собой силу X_1, для первого потока:

$$X_1 = -\frac{\partial L_1}{\partial s_1}\cdot\frac{ds_1}{dx}.$$

Аналогичным образом при отсутствии первого потока из второй формулы выражения (12.4.2) получим

$$X_2 = -\frac{\partial L_2}{\partial s_2}\frac{ds_2}{dx}.$$

Из выражений для X_1 и X_2 находим производные:

$$\frac{ds_1}{dx} = -\frac{X_1}{\frac{\partial L_1}{\partial s_1}};$$

$$\frac{ds_2}{dx} = -\frac{X_2}{\frac{\partial L_2}{\partial s_2}}.$$

Подставляя найденные величины в формулу (12.4.2) имеем:

$$\left.\begin{aligned} j_1 &= C_{11}X_1 + C_{12}X_2 \\ j_2 &= C_{21}X_1 + C_{22}X_2 \end{aligned}\right\}, \qquad (12.4.3)$$

где приняты следующие обозначения:

$$C_{12} = C_{11}\frac{\frac{\partial L_1}{\partial s_2}}{\frac{\partial L_2}{\partial s_2}};$$

$$C_{21} = C_{22} \frac{\frac{\partial L_2}{\partial s_1}}{\frac{\partial L_1}{\partial s_1}}.$$

Уравнения (12.4.3) определяют с количественной стороны процессы в лазерной системе с двумя потоками электромагнитного и электронно-ионного излучения[11, 12]. Они по существу являются кинетическими уравнениями состояния такой системы.

12.5. Методы оптимизации процесса формирования объектов лазерной обработки

Комплексные САПР охватывают все этапы разработки технических объектов, в том числе и этап технологической подготовки производства. Автоматизация проектирования технологических процессов включает в себя разработку принципиальных схем технологических процессов, маршрутной технологии, операционной технологии и получение управляющей информации на машинных носителях программно-управляемого технологического оборудования [13, 14].

Лазерный технологический процесс можно представить в виде некоторой системы, а следовательно, для его организации следует применять системный подход, сущность которого заключается в комплексном, едином рассмотрении всех частей систем технологического проектирования и в гармоническом их сочетании.

Постановку задачи оптимизации технологического процесса формирования объектов в лазерной технологии можно представить следующим образом (рис. 12.5.1) [16]. Лазерный технологический процесс рассматривается как объект проектирования, на вход которого поступает вектор $\mathbf{X}(t) = (x_1(t),...,x_n(t))$ входных переменных, а скалярный выход F характеризует качество технологического процесса. Требуется сформировать та-

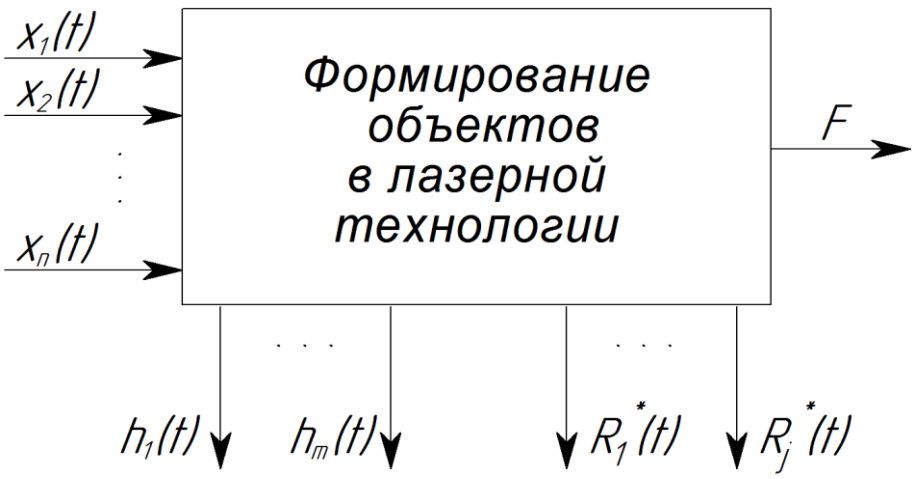


Рис. 12.5.1. Постановка задачи оптимизации технологического процесса

кой вектор управляющих воздействий $\mathbf{R}^*(t) = (R_1^*(t),....,R_l^*(t))$, который минимизировал бы значение показателя F, т.е.

$$F(\mathbf{X}(t), R^*(t)) = \min\{F_k(\mathbf{X}(t), \mathbf{R}(t))\}.$$

Выходы $h_1(t),...,h_m(t)$ характеризуют состояние процесса и индицируют нежелательные режимы работы оборудования или выход контролируемых параметров технологического процесса за установленные пределы:

$$h_j(t) \le b_j,\ j = \overline{l,m},$$

где b_i – требуемые или допустимые значения соответствующих параметров.

Таким образом, оптимизация процесса при проектировании процессов формирования объектов в лазерной технологии рассматривается как задача определения оптимального вектора управления $\mathbf{R}^*(t)$, минимизирующего целевую функцию $F(\mathbf{X}(t), \mathbf{R}(t))$ при условии выполнения заданных ограничений.

Подобные задачи оптимизации решают в два этапа. На первом этапе определяют идеальный вектор управления $\mathbf{R}^*_{ид}(t)$, обеспечивающий оптимизацию технологического процесса. Практически реализовать это не

представляется возможным, и вектор $\mathbf{R}^*_{ид}(t)$ является эталоном, к которому надо стремиться [11]. Зная $\mathbf{R}^*_{ид}(t)$ на втором этапе, выбирают реализуемый квазиоптимальный вектор управления, с помощью которого стараются получить решение, наименее отличающееся от идеального и в тоже время, реализуемое наиболее просто.

Следует отметить, что в большинстве практических случаев оптимизированные технологические процессы дополнительно подвергаются наладке и корректировке, поскольку при построении математических моделей процессоров невозможно учесть все влияющие на процесс факторы.

На технологический процесс оказывает влияние множество случайных факторов (неточность оборудования, отклонения луча, неточности измеряемых приспособлений, внутренние напряжения обрабатываемой детали, разброс параметров обрабатываемого образца и т.д.). Поэтому параметры изготовляемых изделий являются случайными величинами, причём влияние действующих случайных факторов на изменение параметров изделий можно, как правило, определить из статистического анализа. В подобных случаях очень важно учитывать характер взаимосвязи между случайными величинами. Для количественного выражения этой взаимосвязи служат регрессия и корреляция.

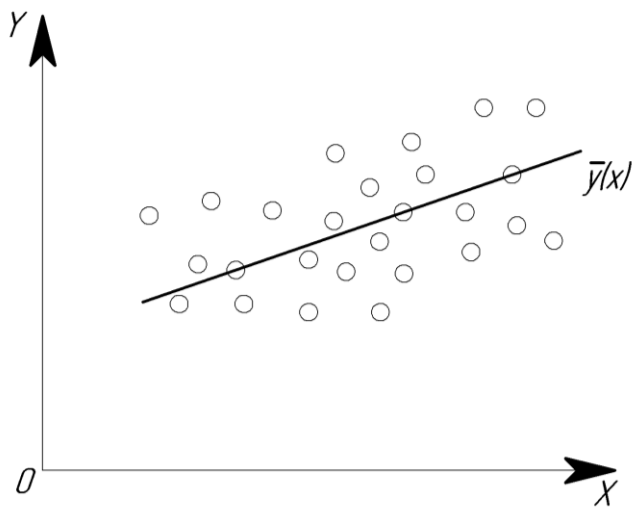


Рис. 12.5.2. Линия регрессии

Пусть x и y – случайные величины, характеризующие параметры некоторого из изделий, причём упорядоченная пара (x, y) характеризует параметры одного варианта изделия и может быть изображена точкой на плоскости. Полная совокупность вариантов изображается множеством точек, показанных на рис. 12.5.2. Математические ожидания случайных величин x и y равны соответственно $M_{(x)}$ и $M_{(y)}$, и среднеквадратичные отклонения σ_x и σ_y характеризуют рассеивание величин x и y относительно их математических ожиданий.

Рассмотрим зависимость $\overline{y}(x)$, являющуюся условным математическим ожиданием $M_{(x|y)}$. Используя выражения для условного математического ожидания и обозначая через $p(x,y)$ совместную вероятность данных значений x и y, находим:

$$\overline{y}(x) = M_{(y|x)} \sum_y yp(x,y) / \sum_y p(x,y) .$$

Определяя $\overline{y}(x)$ при различных x, можно построить линию, графически выражающую эту зависимость и называемую линией регрессии y по x (см. рис. 12.5.2). Аналогично может быть получена зависимость $\overline{x}(y)$, называемая регрессией x по y.

На практике наиболее часто встречается случай линейной регрессии, уравнение которой записывается в виде

$$\overline{y}(x) = a + b(x - M_{(x)}) .$$

Коэффициенты a и b выбирают такими, чтобы получить наибольшую концентрацию точек (x, y) вблизи прямой $\overline{y}(x)$, что выражается условием

$$\phi(a,b) = M\left\{ \left[y - \overline{y}(x) \right]^2 \right\} = \min .$$

Это выражение, с учётом предыдущего, даёт следующую систему уравнений для определения коэффициентов a и b:

$$M_{(y)} - a = 0; \quad M[y(x - M_{(x)})] - b\sigma_x^2 = 0. \qquad (12.5.1)$$

Величину $\mu_{xy} = M[y(x-M_{(x)})]$ называют ковариацией между x и y. Она служит мерой взаимной связи между случайными величинами a и b.

Из (12.5.1) находят значения $a=M_{(y)}$ и $b = \mu_{xy} / \sigma_x^2$, определяющие линию регрессии.

Ковариация μ_{xy} зависит от дисперсий самих случайных величин, поэтому для оценки взаимосвязи между случайными величинами более удобен коэффициент корреляции $r_{xy} = \mu_{xy} /(\sigma_x \sigma_y)$, который может меняться от нуля для независимых случайных величин до единицы, если случайные величины связаны линейной функциональной зависимостью [16].

При технологическом проектировании процессов в лазерной технологии в качестве критериев оптимальности могут рассматриваться такие показатели эффективности, как себестоимость производства изделий, производительность технологического процесса, основное технологическое время и т.д.

Основные методы выбора наилучших лазерных установок по параметрам

Как известно, наиболее простым типом оптимизационных задач является безусловная оптимизация функции одной переменной. Она занимает центральное место в теории оптимизации как с теоретической, так и практической точек зрения. Задачи однопараметрической оптимизации достаточно часто встречаются в инженерной практике и, кроме того, находят своё применение при реализации более сложных интерактивных процедур многопараметрической оптимизации.

Индикатором важности методов оптимизации функции одной переменной является огромное множество реализованных алгоритмов, которые условно можно сгруппировать следующим образом.

- Методы исключения интервалов:
    - метод половинного деления,

- метод «золотого» сечения,
- метод Фибоначчи;

- Методы полиномиальной аппроксимации;
- Методы с использованием производных.

Методы безусловной оптимизации делятся на методы одномерной и многомерной оптимизации.

К методам ***многомерной оптимизации*** относятся.

1. Методы нулевого порядка:
   - покоординатного спуска,
   - Хука-Дживса,
   - симплексный метод Нелдера-Мида;
2. Методы первого порядка:
   - градиентный,
   - наискорейшего спуска,
   - сопряженных градиентов:
     - метод Дэвидона-Флетчера-Пауэла,
     - метод Флетчера-Ривса.

Необходимые и достаточные условия оптимизации

Рассмотрим функцию n действительных переменных

$$f(x_1, x_2, ..., x_n) = f(x).$$

Точка в n-мерном евклидовом пространстве с координатами $x_1, x_2, x_3..., x_n$ обозначается вектором-столбцом x. Градиент функции, т.е. вектор с компонентами $\partial f/\partial x_1, \partial f/\partial x_2, ..., \partial f/\partial x_n$, обозначается $\nabla f(x)$ или, иногда, $g(x)$. Матрица Гессе (гессиан) функции $f(x)$ обозначается как $G(x)$ и является симметричной матрицей $n \times n$ элементов вида

$$G_{ij} = \partial^2 f/\partial x_i \partial x_j .$$

Функция $f(x)$ имеет локальный минимум в точке x_0, если существует окрестность точки x_0, такая, что $f(x) > f(x_0)$ во всех точках этой окрестности, т.е. существует положительная величина δ, такая, что для $|x - x_0| < \delta$ справедливо неравенство $f(x) \geq f(x_0)$.

В случае глобального минимума в точке x^* для всех x справедливо неравенство $f(x) \geq f(x^*)$. Необходимым условием минимума в точке x_0 является уравнение $\nabla f(x_0) = 0$.

Т.е.

$$\partial_{f(x_0)} / \partial_{x_i} = 0, (i = 1, \ldots, n).$$

Тогда знак разности $f(x_0 + h) - f(x_0)$ определяется членом

$$1/2 h^T G(x_0) h.$$

Если матрица $G(x_0)$ положительно определена, то этот член положителен для всех h. Следовательно, необходимым и достаточным условием минимума являются:

$\nabla f(x_0) = 0;\ G(x_0)$ – положительно определена.

Необходимым и достаточным условием максимума являются:

$\nabla f(x_m) = 0;\ G(x_m)$ – отрицательно определена.

Метод координированного спуска

Одним из методов нахождения минимума функции n-переменных являются методы прямого поиска. Методы прямого поиска являются методами, в которых используются только значения функции.

Рассмотрим функцию двух переменных. Её линии уровня представлены на рис 12.5.3, а минимум лежит в точке (x_1^*, x_2^*). Простейшим методом поиска является метод покоординатного спуска. Из точки А произведём поиск минимума вдоль направления оси x_1 и, таким образом, находим

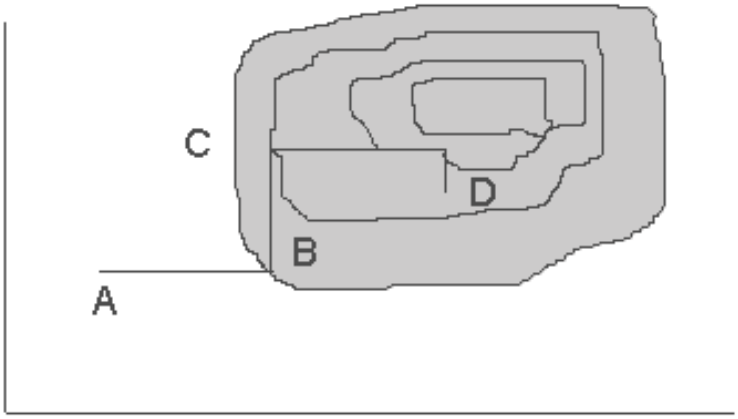


Рис. 12.5.3. Метод прямого поиска

точку B, в которой касательная к линии постоянного уровня параллельна оси x_1. Затем, производя поиск параллельно оси x_2, получаем точку D, и т.д. Таким образом, мы приходим к оптимальной точке. Очевидным образом это идею можно применить для функции n переменных.

Теоретически данный метод эффективен в случае единственного минимума функции. Но на практике он оказывается слишком медленным. Поэтому были разработаны более сложные методы, использующие больше информации на основании уже полученных значений функции [18, 19].

Метода наискорейшего спуска

В методе наискорейшего спуска (рис 12.5.4) желательно использовать рассмотренное свойство направления градиента. Поэтому, если мы находимся в точке x_i на некотором шаге от процесса оптимизации, то поиск минимума функции осуществляется вдоль направления $\nabla f(x_i)$. Данный метод является итерационным. На шаге i точка минимума аппроксимируется точкой x_i. Следующей аппроксимацией является точка

$$x_{i+1} = x_i - \lambda_i \nabla f(x_i),$$

где λ_i - значение λ, минимизирующее функцию

$$\varphi(\lambda_i) = f\left[x_i - \lambda \nabla f(x_i)\right].$$

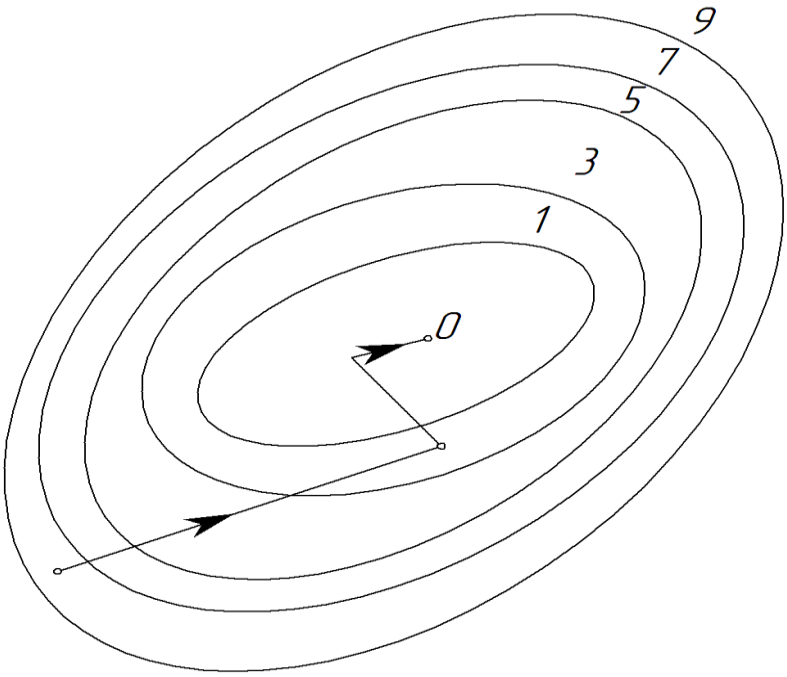


Рис. 2.5.4. Метод наискорейшего спуска

Значение λ_i может быть найдено с помощью одного из методов одномерного поиска (например, методом квадратичной интерполяции).

2.6. Базовые модели оптимизации для различных структур лазерного оборудования

Модель L-1. Формирование оптимального состава модулей лазерного оборудования (без избыточности)

Лазерное оборудование составлено из набора модулей последовательного исполнения. Доступно более чем одно техническое решение (ТР) каждого модуля, но, из-за жестких ограничений по стоимости (а такой случай не должен исключаться из рассмотрения), и/или некритического характера части или всего оборудования, сохранение многократных ТР модулей нежелательно. Модель, разработанная для этой ситуации, позволяет сформировать оптимальный состав набора модулей для однотипного оборудования, оптимизируя надёжность, при существующих стоимостных ограничениях, благодаря которым полная стоимость разработки остаётся

приемлемой, а проект осуществим [20]:

$$\max R = \prod_{i=1}^{n} R_i \ . \qquad (12.6.1)$$

В соответствии с ограничениями

$$\sum^{m_i} X_{ij} = 1; \ i = 1,...,n \ ; \qquad (12.6.2)$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} C_{ij} \le B \ ; \qquad (12.6.3)$$

$$X_{ij} = 0,1; \quad i = 1,...,n; \quad j = 1,...,m_i, (ii) \ ,$$

причём

$$R_i = \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} R_{ij} \ . \qquad (12.6.4)$$

Целевая функция *модели L-1* отражает последовательное выполнение модулей. Совокупность ограничений (2.6.2) гарантирует, что одно ТР обязательно выбрано для каждого модуля. Ограничения (2.6.3) гарантируют, что общие затраты не превысят *B*.

Модель L-2. Формирование оптимального состава модулей лазерного оборудования (с избыточностью)

Вторая, рассматриваемая ситуация соответствует случаю, когда лазерное оборудование выполняет одну, но наиболее важную функцию, отказ которой может привести к очень серьезным негативным последствиям. Надёжность однотипного оборудования достигается путём введения в систему избыточных ТР каждого модуля. Соответственно, ограничения на стоимость системы, выполняющей такие функции, должны быть достаточными, чтобы допустить избыточность модулей.

Цель *модели L-1* – определить оптимальный состав модулей с учётом

избыточности ТР, максимизируя надёжность оборудования, не нарушая рамки стоимостных ограничений.

Итак, сформулируем задачу, аналогичную описанной выше, но разрешив избыточность ТР модулей оборудования [20]:

$$\max R = \prod_{i=1}^{n} R_i \quad . \tag{12.6.5}$$

В соответствии с ограничениями

$$X_{ij} = 0,1; \quad i = 1,...,n; \quad j = 1,...,m(ij) \quad ,$$

где

$$\sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} \geq 1; \; i = \overline{1,n} \; ;$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} C_{ij} \leq B \; ; \tag{12.6.6}$$

$$R_i = 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij})^{X_{ij}} \quad .$$

Надёжность i-го модуля определяется как вероятность того, что по крайней мере одно из m_i ТР выполняется правильно, а совокупность ограничений гарантирует, что для каждого i-го модуля выбрано по крайней мере одно ТР. Один из вариантов решения данной задачи – использование алгоритма динамического программирования.

Модель LZ-1. Формирование оптимального многофункционального [(K)-функций] лазерного оборудования (без избыточности)

Итак, имеем дело с лазерным оборудованием, состоящим из нескольких функциональных блоков, каждый из которых выполняет свою функцию. Каждый блок содержит ряд модулей. Функциональные блоки могут вызываться соответствующими функциями оборудования, а модули – любым блоком. Цель этой модели состоит в определении оптимального набора модулей для функциональных блоков без использования избыточ-

ности таким образом, чтобы надёжность оборудования была максимальна при заданных ограничениях по стоимости.

Через S_k обозначим набор модулей, соответствующих функциональному блоку k. Для каждого модуля $i \in S_k$ имеются m_i доступных ТР. Обратим внимание на то, что один и тот же модуль может вызываться различными функциональными блоками. Пронумеруем все вызываемые модули числами от 1 до n. Задача может быть сформулирована следующим образом [49]:

$$\max R = \sum_{k=1}^{K} F_k \prod_{i \in S_k} R_i \ ,$$

при ограничениях

$$\sum_{j-1}^{m_i} X_{ij} = 1; \ i = 1,...,n;$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} C_{ij} \le B; \qquad (12.6.7)$$

$$X_{ij} = 0,1; \quad j = 1,...,m_i; \quad i = 1,...,n \ .$$

Здесь R_i задаётся выражением

$$R_i = \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} R_{ij} \ .$$

Полученная постановка задачи может быть решена методом, подобным тому, который использовался для задачи (см. пункт 12.6.1) с незначительной коррекцией.

Модель LZ-2. Формирование оптимального многофункционального [(K)-функций] лазерного оборудования (с избыточностью)

Отличие рассматриваемой задачи заключается в том, что избыточность теперь разрешена, и возможен выбор более чем одной версии для каждого модуля лазерного оборудования.

Сформулируем задачу:

$$\max R = \sum_{k=1}^{K} F_k \prod_{i \in S_k} R_i \ ,$$

при ограничениях

$$\sum_{j-1}^{m_i} X_{ij} \geq 1; \ i = 1,...,n;$$

$$\sum_{i=1}^{n} \sum_{j=1}^{m_i} X_{ij} C_{ij} \leq B; \qquad (12.6.8)$$

$$X_{ij} = 0,1; \quad j = 1,...,m_i; \quad i = 1,...,n \ .$$

Здесь R_i задаётся выражением

$$R_i = 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij})^{X_{ij}} \ .$$

Из-за наличия ограничений, так как мы имеем дело с $K > 1$ функциями лазерного оборудования, ни один из методов, предложенных ранее, не может быть «напрямую» использован для решения этой задачи. Кроме того, целевая функция – нелинейная, и решать эту задачу непосредственно, например, как задачу целочисленного программирования, невозможно [21].

Перепишем целевую функцию в линейном виде. Обратим внимание на то, что выражение $(1 - R_{ij})^{X_{ij}}$ в (12.6.6) может быть записано как [49]:

$$1 - X_{ij} R_{ij}; \quad X_{ij} = [0,1],$$

так как, если $X_{ij} = 0$, то $(1 - R_{ij})^{X_{ij}} = 1$. Если $X_{ij} = 1$, то $(1 - R_{ij})^{X_{ij}} = 1 - R_{ij}$.

Следовательно, (12.6.6) можно переписать в виде:

$$R_i = 1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij} X_{ij}) \ ,$$

и целевую функцию можно представить как

$$R_i = \max \sum_{k=1}^{K} F_k \prod_{i \in S} [1 - \prod_{j=1}^{m_i} (1 - R_{ij} X_{ij})] .$$

Полученная целевая функция все ещё не линейна, т.к. включает произведение бинарных переменных. Однако, выразив произведение n бинарных переменных Z_i как

$$\prod_{i=1}^{n} Z_i \; ; \quad Z_i = 0,1 ,$$

определяем

$$y = \prod_{i=1}^{n} Z_i \; ; \quad y = 0,1 \; ,$$

двумя линейными функциями:

$$Z_1 + Z_1 + ... + Z_n - y \le n - 1 \; ;$$

$$1/nZ_1 + 1/nZ_2 + ... + 1/nZ_n - y \ge 0 \; .$$

Разделение на надёжностные оптимизационные модели для оборудования лазерной технологии позволяет более адекватно выбирать соответствующую модель для реальной ситуации при проектировании.

ЛИТЕРАТУРА К ГЛАВЕ 12

1. Ивашов Е.Н., Реутова М.В. Применение метода Саати при структурировании множества альтернатив получения углеродных нанотрубок, фуллеренов и кластеров. Деп. Рукопись ВИНИТИ №2325. В 2003; 31.12.2003. – 12 с.
2. Компьютерные технологии обработки информации: Учеб. пособие / С.В. Назаров, В.И. Першиков, В.А. Тафинцев и др.; Под ред. С.В. Назарова. – М.: Финансы и статистика, 1995. – 248 с.
3. Сольницев Р.И. Автоматизация проектирования систем автоматического управления: Учеб. для вузов по спец. «Автоматика и управление в технических системах». – М.: Высшая школа, 1991. – 335 с.
4. Проектирование гидравлических систем машин: Учеб. пособие для студентов вузов по специальности «Гидравлические машины, гидроприводы и гидропневмоавтоматика» / Г.М. Иванов, С.А. Ермаков, Б.Л. Коробочкин, Р.М. Пасынков; Под общ. ред. Г.М. Иванова. – М.: Машиностроение, 1992. – 224 с.
5. Автоматизация проектирования радиоэлектронных средств: Учеб. пособие для вузов / О.В. Алексеев, А.А. Головков, И.Ю. Пивоваров и др.; Под. ред. О.В. Алексеева. – М.: Высшая школа, 2000. – 497 с.
6. ГОСТ 34.601-90. «Информационная технология. Комплекс стандартов на автоматизированные системы. Стадии создания».
7. Автоматизированное проектирование машиностроительного гидропривода / И.И. Бажин, Ю.Г. Беренгард, М.М. Гайцгорн и др.; Под общ. ред. С.А. Ермакова. – М.: Машиностроение, 1988. – 312 с.
8. Тумковский С.Р. РТУиС, МИЭМ. Курс лекций «Автоматизированное проектирование РЭС».

9. Норенков И.П., Маничев В.Б. Основы теории и проектирования САПР: Учебник для втузов. – М.: Высшая школа, 1980. – 335 с.
10. Быков В.П. Методическое обеспечение САПР в машиностроении. –Л.: Машиностроение. Ленингр. отделение, 1989. – 255 с.
11. Теоретические основы САПР: Учебник для вузов/ В.П. Корячко, В.М. Курейчик, И.П. Норенков. – М.: Энергоавтомиздат, 1987, – 400 с.
12. Вейк А.И. Техническая термодинамика и основы теплопередачи. – М.: Металлургия, 1965. – 375 с.
13. Вейк А.И. Термодинамика. 2-е изд. – М.: Высшая школа, 1965. – 282 с.
14. Иванов Ю.В., Лакота Н.А. Гибкая автоматизация производства РЭА с применением микропроцессоров и роботов. – М.: Радио и связь, 1987. – 464 с.
15. Норенков И.П. Принципы построения и структура САПР. – М.: Высшая школа, 1986. – 146 с.
16. Основы автоматизации управления производством / Под ред. И.М. Макарова. – М.: Высшая школа, 1983.
17. Чулков В.П. Расчет комплексов оборудования. – М.: МИЭМ, 2006. – 26 с.
18. Банди Б. Методы оптимизации. Основной курс. – М.: Высшая школа, 1988. – 127 с.
19. Хук Р., Дживс Т.А. Прямой поиск решения для числовых и статических проблем. 1961. – С. 212-219.
20. Слободин М.Ю., Царев Р.Ю. Компьютерная поддержка многоатрибутивных методов выбора и принятия решения при проектировании корпоративных информационно-управляющих систем. – СПб.: Инфо-да, 2004. – 223 с.
21. Васильков В.М. Автоматизация управления производством изделий электроники. – М.: Радио и связь, 1982. – 222 с.

Содержание

Предисловие 3

Глава 7. Моделирование упругих чувствительных элементов туннельных преобразователей 8

7.1. Конечноэлементный расчет напряженно-деформированного состояния многослойных упругих чувствительных элементов (УЧЭ) туннельных преобразователей 8

7.2. Эффект схлопывания электродов (pull-in instability) электростатического актюатора УЧЭ туннельного преобразователя .. 18

7.3. Особенности функционирования электростатических актюаторов с субмикронным межэлектродным зазором 28

Литература к главе 7 36

Глава 8. Высоковакуумная коммутационная аппаратура 42

8.1. Анализ многомодульного оборудования для обработки изделий в вакууме в едином технологическом цикле 42

8.2. Критерии надежности коммутационной аппаратуры в многомодульном технологическом оборудовании микроэлектроники 52

8.3. Современный уровень развития коммутационной вакуумной аппаратуры 59

8.4. Перспективы создания бескорпусных вакуумных клапанов и затворов 83

Литература к главе 8 86

Глава 9. Прецизионные перемещения на основе пьезоэффекта 89

9.1. Пьезосканеры в приборостроении 89

9.2. Схемы пьезоэлектрических приводов 90

9.3. Морфологический анализ пьезоэлектрических приводов 99

9.4. Разнообразие пьезоэлементов 104

9.5. Пьезоэлектрический сканер зондового микроскопа 110

Глава 10. Материалы пьезосканеров 111

10.1. Основные понятия и определения 111

10.2. Основные зависимости для пьезопреобразователя 117

10.3. Основные характеристики пьезоэлектрических материалов 123

Литература к главам 9 и 10 127

Глава 11. Особенности создания элементов автоматизированной системы проектирования пьезосканеров 128

11.1. Структура информационной технологии проектирования пьезосканеров на этапах предварительной разработки 128

11.2. Модель многокритериальной задачи принятия решений 137

11.3. Сравнение вариантов на основе порядковой шкалы оценок и на основе интегральной шкалы полезности оценки по показателям 143

11.4. Основы методики выбора предпочтительного варианта пьезосканера по совокупности показателей 159

11.5. Математическая модель пьезосканера на основе пьезоэлектрического элемента 163

11.6. Крипт-эффект и методика борьбы с ним 168

Литература к главе 11 175

Глава 12. Системы поддержки принятия решений при проектировании объектов лазерной обработки 177

12.1. Структура проектирования процессов лазерной обработки 177

12.2. Схема процесса автоматизированного проектирования оборудования для производства объектов лазерной обработки 187

12.3. Математические модели объекта проектирования..... 192

12.4. Уравнение состояния лазерной технологической системы..... 202

12.5. Методы оптимизации процесса формирования объектов лазерной обработки 205

Литература к главе 12 219