Васин В.А., Ивашов Е.Н., Степанчиков С.В.

НАДЕЖНОСТЬ ПЬЕЗОСКАНЕРОВ В ЗОНДОВОЙ МИКРОСКОПИИ

В статье рассмотрены вопросы надёжности систем из многофункциональных пьезомодулей, которая зависит от системы автоматического управления пьезосканерами в целом (и отдельными пьезомодулями), а также от надёжности работы самих пьезомодулей, в которых реализуется преобразование электрической энергии в механическую.

Ключевые слова: *сканирующая зондовая микроскопия, многофункциональный пьезомодуль, надёжность пьезосканера, вероятность безотказной работы, относительная погрешность.*

Основным элементом сканирующих зондовых микроскопов (СЗМ), который и обеспечивает возможность работы прибора в режимах атомных разрешений, является сканер (пьезодвигатель). Сканер 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 пикометров.

Кроме того, 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 значительно снижает качество работы прибора.

Именно эти обстоятельства привели к необходимости углубленного изучения свойств сканера и разработки технологии, их коррекции на физическом уровне.

Практически во всех СЗМ 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) [1].

Сканер зондового микроскопа перемещает зонд относительно образца по типу растровой картины как показано на рис. 1.

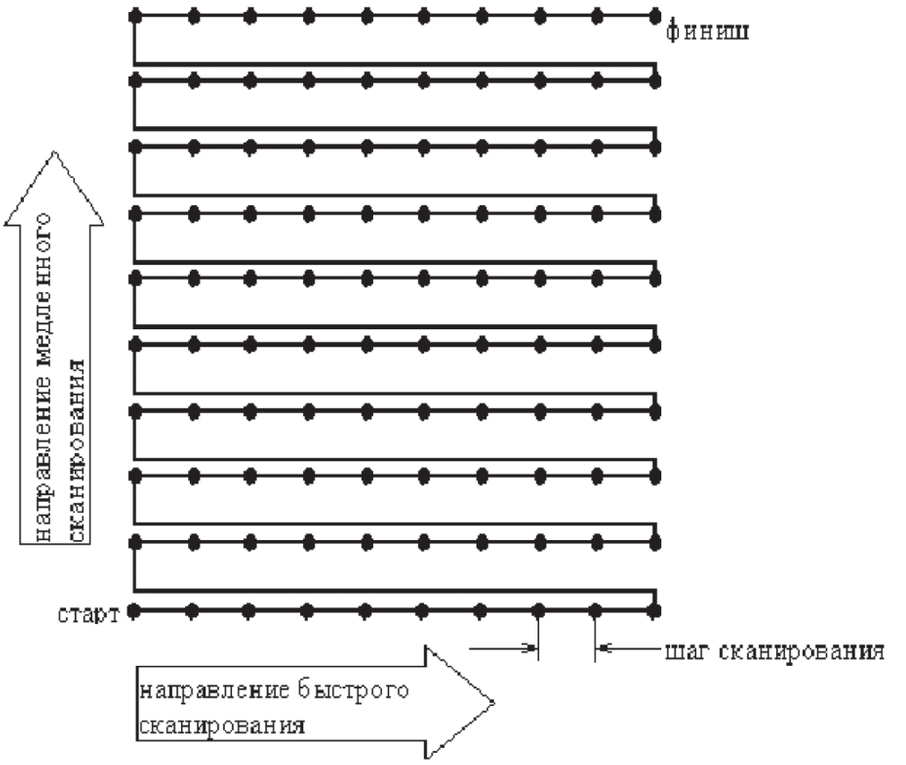

Рис. 1. Движение сканера СЗМ в плоскости (*X*, *Y*). Точками показаны места сбора информации

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 направлениях. Измеряемые данные при сканировании собираются только в одном направлении, обычно называемом 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 [2].

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 данных называется шагом сканирования. Размер шага определяется полным размером сканирования и числом точек данных на одну линию. В типичном сканирующем зондовом микроскопе 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 [3].

При работе сканеров имеют место такие нежелательные эффекты, как гистерезис, старение, крип, которые приводят к искажению получаемого изображения.

Пьезоэлектрические сканеры является критическими элементами в сканирующих зондовых микроскопах, которые существенно влияют на качество получаемого изображения. Поэтому характеристики сканера должны удовлетворять определенным требованиям. Одним из самых важных требований, предъявляемых к сканеру, является требование ортогональности сканера [4].

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. Эффект практически линейный, то есть степень поляризации прямо пропорциональна величине прилагаемого усилия, но направление поляризации зависимо, так как усилие сжатия или растяжения генерирует электрические поля, а следовательно, и напряжение противоположной полярности. Соответственно, при помещении кристалла в электрическое поле, упругая деформация вызовет увеличение или уменьшение его длины в соответствии с величиной и направлением полярности поля.

В современных условиях протекания процессов особое внимание уделяется точным методам позиционирования и перемещения в вакууме. И к прецизионным системам предъявляются высокие требования – это точность позиционирования, быстродействие, а также малая инерционность систем позиционирования. Прецизионные системы перемещения являются необходимым условием увеличения процента выхода годных изделий. В современном технологическом и исследо-

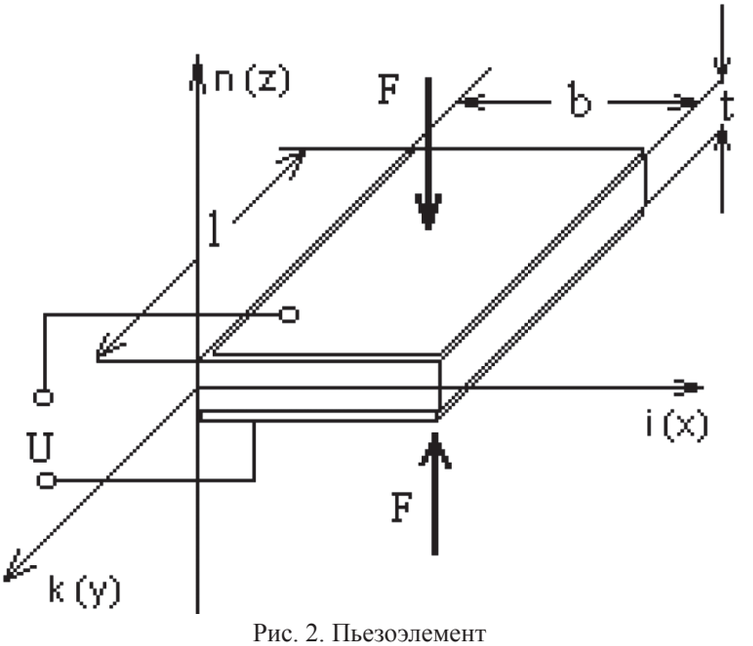

Рис. 2. Пьезоэлемент

вательском оборудовании используются различные типы устройств прецизионных перемещений. Но особо выделим устройства на пьезопреобразователях, отличительной чертой которых является их безинерционность. **Благодаря своей жесткой структуре пьезосканера являются идеальным инструментом для быстрой и точной их настройки**.

Характеристики пьезопреобразователя выражаются простейшими соотношениями (рис. 2).

$$E_i = g_{in} \times \sigma_n = - h_{in} \times \varepsilon_n; \quad (1)$$

$$\varepsilon_n = d_{kn} \times E_k; \quad (2)$$

$$\sigma_n = C_{nn} \times \varepsilon_n; \quad (3)$$

$$U_i = E_i \times l_i; \quad (4)$$

$$C_n = \varepsilon_r \times \varepsilon_0 \times F_x / l_n, \quad (5)$$

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* [6].

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:

$$D = P + \varepsilon_0 E = d\sigma. \quad (6)$$

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 компонентов. В компонентном представлении мы получаем следующие отношения:

$$D = \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{12}d_{13}d_{14}d_{15}d_{16} \\ d_{21}d_{22}d_{23}d_{24}d_{25}d_{26} \\ d_{31}d_{32}d_{33}d_{34}d_{35}d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{pmatrix} \quad (7)$$

Индексы 1,2,3 относятся к кристаллическим параметрам и их 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:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{21}d_{31} \\ d_{12}d_{22}d_{32} \\ d_{13}d_{23}d_{33} \\ d_{14}d_{24}d_{34} \\ d_{15}d_{25}d_{35} \\ d_{16}d_{26}d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} \quad (8)$$

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:

$$\begin{pmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} d_{11}d_{21}d_{31} \\ d_{12}d_{22}d_{32} \\ d_{13}d_{23}d_{33} \\ d_{14}d_{24}d_{34} \\ d_{15}d_{25}d_{35} \\ d_{16}d_{26}d_{36} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1 \\ E_2 \\ E_3 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \gamma_{11}\gamma_{12}\gamma_{13}\gamma_{14}\gamma_{15}\gamma_{16} \\ \gamma_{21}\gamma_{22}\gamma_{23}\gamma_{24}\gamma_{25}\gamma_{26} \\ \gamma_{31}\gamma_{32}\gamma_{33}\gamma_{34}\gamma_{35}\gamma_{36} \\ \gamma_{41}\gamma_{42}\gamma_{43}\gamma_{44}\gamma_{45}\gamma_{46} \\ \gamma_{51}\gamma_{52}\gamma_{53}\gamma_{54}\gamma_{55}\gamma_{56} \\ \gamma_{61}\gamma_{62}\gamma_{63}\gamma_{64}\gamma_{65}\gamma_{66} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} E_1^2 \\ E_2^2 \\ E_3^2 \\ E_2E_3 \\ E_3E_1 \\ E_1E_2 \end{pmatrix} \quad (9)$$

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. 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 120^0C. 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 ^{0}C дальнейшие фазовые переходы происходят от орторомбического к тригональному кристаллическому классу. Смена кристаллической группы симметрии, связанная с фазовым переходом, становится причиной появления новых коэффициентов в тензоре материала. Материалы с пригодным для использования коэффициентом продольной деформации охватывают минералы, монокристаллические вещества и полимеры. Обычно пьезоэлектрический эффект наиболее ярко выражен в монокристаллических веществах. Для материалов годных к использованию в микросистемах пьезоэлектрический коэффициент обычно лежит в диапазоне $1\div100\times10^{-12}$ м/В.

При максимальной напряжённости поля $E=10^7$ В/м относительная продольная деформация лежит в диапазоне $\varepsilon_r = 10^{-3}\div10^{-5}$. 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.

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

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, а значит эффективность может быть намного больше коэффициента связи.

Проектирование систем автоматического управления пьезосканерами связано с расчётом потенциального уровня надёжности возможных вариантов их реализации. Построение современных систем управления на базе микропроцессорной техники, для которой характерна многофункциональность модулей, определяет актуальность развития методов оценки надёжности, учитывающих взаимозависимость событий потери пьезомодулями способности выполнять различные функции.

Полученные в этом направлении результаты, в основном, касаются пьезомодулей (узлов), отказ которых приводит либо к потере способности выполнения всех его функций одновременно, либо только одной функции. Ниже предложены методы оценки надёжности ПС из многофункциональных пьезомодулей с произвольным видом пересекаемости нанотехнологического оборудования, задействованного при выполнении различных функций.

Задача формируется следующим образом. Пусть ПС, выполняющий функцию $F = \{f_1, f_2, \ldots, f_n\}$, состоит из m многофункциональных пьезомодулей (МФПМ), каждый из которых в исходном состоянии выполняет множество функций $\{f_1, f_2, \ldots, f_n\}$. Для каждого нанотехнологического оборудования обозначим через Φ_1 совокупность пьезомодулей, задействованную при выполнении функции f_1. В общем случае множества $\Phi_1, \Phi_2, \ldots, \Phi_n$ могут пересекаться, что приводит к взаимозависимости событий потери способности нанотехнологического оборудования выполнять различные функции. По виду пересекаемости множеств $\Phi_1, \Phi_2, \ldots, \Phi_n$ выделим следующие структуры МФПМ [7]:

$$(\exists i)(\exists j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j \neq \acute{O}]; \tag{10}$$

$$(\forall i)(\forall j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j = \acute{O}]; \tag{11}$$

$$(\forall i)(\forall j)[(i \neq j) \rightarrow \Phi_i \cap \Phi_j = \Omega], \tag{12}$$

где $i, j \in N$, $N = \{1, 2, 3, \ldots, n\}$.

Структура МФПМ (10) характеризуется независимостью событий потери нанотехнологическим оборудованием способности выполнять различные функции; структура МФПМ (11) соответствует произвольному виду пересекаемости множеств $\Phi_1, \Phi_2, \ldots, \Phi_n$; структура (12) является частной по отношению к (11). В МФПМ вида (11) выделяются некоторые общие пьезомодули Ω, отказ которых приводит к полному отказу нанотехнологического оборудования, и пьезомодули $\Phi_i \backslash \Omega$ ($i = 1, 2, \ldots, n$), отказ которых связан с потерей способности нанотехнологического оборудования к выполнению только одной функции f_i. Множества $\Phi_i \backslash \Omega$ не пересекаются.

Условием работоспособности ПС является способность выполнения функции $F = \{f_1, f_2, \ldots, f_n\}$. При этом каждая функция $f_i \in F$ должна выполняться хотя бы одним МФПМ, а время ожидания обслуживания запросов на выполнение функций $f_i \in F$ должно быть не больше заданного предельно допустимого значения. Надёжность ПС определим по вероятности безотказной работы.

Оценка вероятности безотказной работы ПС. Рассмотрим ПС, для которых условие работоспособности заключается в возможности выполнения каждой функции $f_i \in F$ хотя бы в одном МФПМ. Оценку вероятности безотказной работы проведем на основе известного комбинаторно-вероятностного метода включения-исключения [8], позволяющего получить как точную, так и приближенную с требуемой погрешностью оценку.

Для МФПМ вида (11) вероятность безотказной работы ПС P оценивается как

$$P=\sum_{i\in N}P(f_i)-\sum_{\substack{i,j\in N\\ i\neq j}}P(f_i\vee f_j)+\sum_{\substack{i,j,l\in N\\ i\neq j\neq l}}P(f_i\vee f_j\vee f_l)-\ldots+(-1)^d\sum_{\substack{i,j,\ldots,a\in N\\ i\neq j\neq\ldots\neq a}}P(f_i\vee f_j\vee\ldots\vee f_a)-\ldots+(-1)^nP\left(\bigvee_{i=1}^{n}f_i\right) \quad (13)$$

где $P(f_i\vee f_j\vee\ldots\vee f_a)$ – вероятность того, что в ПС может быть выполнена хотя бы одна функция из множества функций $\{f_i,f_j,\ldots,f_a\}$

$$P(f_i\vee f_j\vee\ldots\vee f_a)=1-\left[1-p(f_i\vee f_j\vee\ldots\vee f_a)\right]^m.$$

Вероятность сохранения ПС способности выполнения хотя бы одной функции из множества

$$p(f_i\vee f_j\vee\ldots\vee f_a)=\sum_{i\in N}p(f_i)-\sum_{\substack{i,j\in N\\ i\neq j}}p(f_i\wedge f_j)+$$

$$\sum_{\substack{i,j,l\in N\\ i\neq j\neq l}}p(f_i\wedge f_j\wedge f_l)-\ldots+(-1)^d\sum_{\substack{i,j,\ldots,a\in N\\ i\neq j\neq\ldots\neq a}}p(f_i\wedge f_j\wedge\ldots.\wedge f_a), \quad (14)$$

где $N_1=\{i,j,\ldots,a\}$, $p(f_i\wedge f_j\wedge\ldots\wedge f_a)$ – вероятность исправности в нанотехнологическом оборудовании пьезомодуля, задействованного при выполнении функций $f_i,f_j,\ldots,f_a$.

Значение $p(f_i\wedge f_j\wedge\ldots\wedge f_a)$ определяется как вероятность исправности пьезомодулей $\Phi_1\cup\Phi_2\cup\ldots\cup\Phi_a$.

При экспоненциальном распределении времени до отказа

$$p(f_i\wedge f_j\wedge\ldots\wedge f_a)=\exp\left(-\wedge(\Phi_1\cup\Phi_2\cup\ldots\cup\Phi)t\right),$$

где $\Lambda(\Phi_1\cup\Phi_2\cup\ldots\cup\Phi_a)$ – суммарная интенсивность отказов МФПМ, задействованных при выполнении функций $f_i,f_j,\ldots,f_a$; t – время работы.

Для МФПМ вида (12) вероятность безотказной работы ПС вычисляется

$$P=\sum_{k=1}^{m}C_m^kp_\Omega^k(1-p_\Omega)^{m-k}\prod_{i=1}^{n}\left[1-(1-p_i)^k\right], \quad (15)$$

где p_Ω – вероятность безотказной работы пьезомодулей, составляющих множество Ω; p_i – вероятность безотказной работы пьезомодулей, относящихся к множеству $\Phi_i\backslash\Omega$.

Если потеря пьезомодулем различных функций равновероятна ($p_i = p_j = p$), то

$$P = \sum_{k=1}^{m} C_m^k p_\Omega^k \left(1 - p_\Omega\right)^{m-k} \left[1 - \left(1 - p_i\right)^k\right]^n.$$

Для МФПМ вида (10) вероятность безотказной работы ПС P вычислим как

$$P = \prod_{i=1}^{n} \left[1 - \left(1 - p_i\right)^m\right].$$

Рассмотрим вероятность безотказной работы конструкции с учётом ограничения времени обслуживания.

Пусть задано w_0 – предельно допустимое среднее время ожидания обслуживания запросов на выполнение функций $f_i \in F$, $i \in N$. Каждый пьезомодуль представим простейшей системой массового обслуживания типа M/M/1 [9]. Число пьезомодулей m_0, при котором запросы обслуживаются за допустимое среднее время, определим как

$$m_0 = \rho\left(1 + \frac{v}{w_0}\right),$$

где $\rho = v\lambda$;
λ – суммарная интенсивность запросов на выполнение функций $f_i \in F$;
v – среднее время их выполнения.

Будем считать, что ПС исправен, если способность выполнения каждого вида функций $f_i \in F$ сохраняется хотя бы в m_0 МФПМ. При этом вероятность работоспособности ПС определяется по формуле (13) с той разницей, что $P(f_i \vee f_j \vee \ldots \vee f_a)$ – вероятность того, что хотя бы одна функция из множества $\{f_i, f_j, \ldots, f_a\}$ может быть выполнена не менее чем m_0 пьезомодулями [10]:

$$P\left(f_i \vee f_j \vee \ldots \vee f_a\right) = \sum_{g=m_0}^{m} C_m^g p\left(f_i \vee f_j \vee \ldots \vee f_a\right)^R \times \left[1 - p\left(f_i \vee f_j \vee \ldots \vee f_a\right)\right]^{m-g},$$

где вероятность $p(f_i \vee f_j \vee \ldots \vee f_a)$ вычисляемая по формуле (14).

Определение значения m_0 при направлении всего потока запросов m_0 МФПМ приводит к нижней (пессимистической) оценке вероятности работоспособности ПС.

Для МФПМ вида (12) вероятность безотказной работы ПС

$$P = \sum_{k=m_0}^{m} C_m^k p_\Omega^k \left(1 - p_\Omega\right)^{m-k} \prod_{i=1}^{n} \left[\sum_{s=m_0}^{m} C_t^s \left(1 - p_i\right)^{k-s}\right], \qquad (16)$$

для МФПМ вида (10) вероятность безотказной работы ПС

$$P = \prod_{i=1}^{n} \left[\sum_{s=m_0}^{m} C_m^s p_t^s \left(1 - p_i\right)^{m-s} \right].$$

Оценим вероятность безотказной работы ПС с функциональной неоднородностью МФПМ.

Рассматриваемые до сих пор ПС комплектовались из одинаковых МФПМ. Теперь перейдём к ПС, содержащим z типов МФПМ, различаемых по составу выполняемых функций. Будем считать, что множества функций, выполняемых МФПМ различного типа, не пересекаются. В этом случае множество выполняемых в ПС функций и множество МФПМ можно разбить на z непересекающихся подмножеств, что позволяет оценить вероятность безотказной работы ПС, как

$$P = \prod_{i=1}^{z} P_i,$$

где P_i – вероятность безотказной работы подсистемы ПС, включающей МФПМ i-го типа (по функциональной комплектации).

Значение P_i вычисляется по формулам, приведенным выше для ПС из функционально однородных пьезомодулей.

Оценка вероятности безотказной работы по методу включения-исключения для ПС из пьезомодулей общего вида (11) сопряжена с достаточно сложными расчётами. Более просто получить приближенную оценку при представлении структуры пьезомодулей вида (11) структурой пьезомодулей вида (12).

При нижней (пессимистической) оценке вероятности безотказной работы будем считать, что для преобразования нанотехнологического оборудования к структуре МФПМ Ω относятся пьезомодули $\Phi_i \setminus \left(\bigcap_{j=1}^{n} \Phi_j \right) \bigcup \left(\bigcup_{k=1}^{i-1} \Phi_k \right)$, то есть отказ любого пьезомодуля, задействованного при выполнении более одной функции, вызывает отказ всего нанотехнологического оборудования.

При верхней (оптимистической) оценке вероятности безотказной работы для преобразованния нанотехнологического оборудования к структуре МФПМ Ω, отказ которой вызывает отказ всего нанотехнологического оборудования, относятся пьезомодули $\bigcup_{i=1}^{m} \Phi_i$.

Задачи пьезомодуля, используемого при реализации нескольких (но не всех) функций, распределяются между непересекающимися множествами $\Phi_i \setminus \Omega$. Например, возможно распределение, при котором в пьезомодуль $\Phi_i \setminus \Omega$ включается $\Phi_i \setminus \left(\bigcap_{j=1}^{n} \Phi_j \right) \bigcup \left(\bigcup_{k=1}^{i-1} \Phi_k \right)$. Следует отметить, что чем более равномерно (по суммарной интенсивности отказов) распределение пьезомодулей по множеству $\Phi_i \setminus \Omega$, тем более оптимистична верхняя оценка.

Относительная погрешность предлагаемой оценки:

$$\delta = 0,5\frac{P_B - P_H}{P_H},$$

где P_B и P_H – вероятности безотказной работы ПС, вычисляемые по формуле (15) или (16) при представлении структуры МФПМ, соответственно, для верхней и нижней оценки.

Оцениваемая погрешность предлагаемого метода зависит от равномерности распределения пьезомодулей по множеству $\Phi_i \backslash \Omega$, причём она минимальна при наиболее неравномерном распределении.

Если полученная точность расчётов недостаточна, то возможно её уточнение на основе метода включения-исключения, который при некоторой громоздкости вычислений позволяет получить

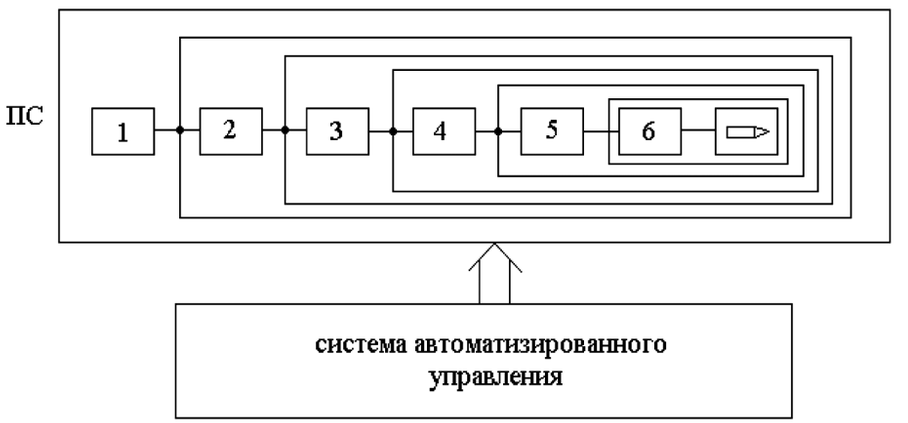

Рис. 3. Структурная схема ПС с последовательным расположением пьезомодулей

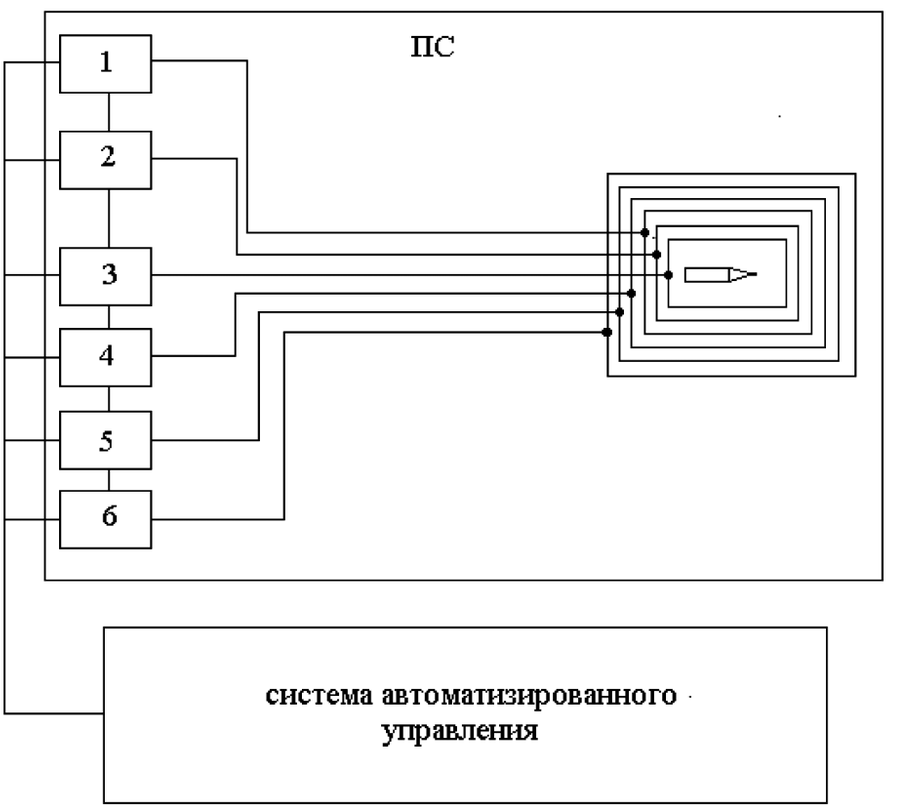

Рис. 4. Структурная схема ПС с параллельным расположением пьезомодулей

любое требуемое приближение. Приближенная оценка по методу включения-исключения осуществляется на основе формулы (13) с учётом того, что при ограничении точности вычислений до члена со знаком плюс получаем верхнюю оценку, а со знаком минус – нижнюю [10].

Последовательное и параллельное расположение пьезомодулей.

Надёжность систем из МФПМ зависит от системы автоматического управления этими пьезомодулями, а также надёжности работы самих пьезомодулей, в которых реализуется преобразование электрической энергии в механическую.

Все ПС можно разделить на конструкции с последовательным, параллельным и последовательно-параллельным соединением пьезомодулей. При последовательном соединении пьезомодулей (рис. 3.) погрешность позиционирования ПС пьезосканера представляет собой векторную сумму погрешностей по всем степеням подвижности. При параллельном соединении пьезомодулей (рис. 4.), как это имеет место, например, в пьезосканерах на основе *l*-координат, погрешность положения одного пьезомодуля независима от положения других. В этом большое преимущество таких ПС с позиции точности положения рабочего органа.

Литература

1. **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.

2. **Быков В.А., Лазарев М.И., Саунин С.А.** Сканирующая зондовая микроскопия для науки и промышленности. // Электроника: наука, технология, бизнес, № 5, с. 7 – 14 (1997).

3. **Быков В.А.** Сканирующая зондовая микроскопия атомного разрешения и моделирования процессов нанотехнологии // Вторая Международная научно-техническая конференция “Микроэлектроника и информатика”: Тезисы докладов. – Москва-Зеленоград, 23-24 ноября 1995 г. – С. 131.

4. **Быков В.А.** Технологии и оборудование для экспериментальных работ в области нанофизики и наноэлектроники// Научная сессия МИФИ – 2010. Сборник научных трудов. – 2010, Т.2. – С.119.

5. **Рабек Я.** Экспериментальные методы в фотохимии и фотофизике. В 2-х томах. Т. 1. Пер. с англ. – М.: Мир, 1985. – 608 с.

6. **Сушхара К., Мори И., Тобзе Т., Ито Т., Табста М., Синодзаки Т.** Пьезоэлектрический столик с двумя поступательными и одной вращательной степенями свободы для субмикронных литографических систем // Приборы для научных исследований, 1989.

7. Информационные технологии в проектировании объектов электронного машиностроения: Монография. В 5-ти кн. Кн. 4. В.А. Васин, Е.Н. Ивашов, А.Ю. Павлов, С.В. Степанчиков. Информационная технология в проектировании сканеров зондовых микроскопов. – М.: Издательство НИИ ПМТ, 2011. – 253 с.

8. **Раинкшкс К., Ушаков И.А.** Оценка надежности систем с использованием графов. – М.: Радио и связь, 1988.

9. **Клейнрок Л.** Теория массового обслуживания. – М.: Машиностроение, 1979.

10. **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.