

ТЕХНОЛОГИЯ ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

УДК 621.941

В. А. ВАСИН, канд. техн. наук, Е. Н. ИВАШОВ, д-р техн. наук, С. В. СТЕПАНЧИКОВ, канд. техн. наук
Московский государственный институт электроники и математики (технический университет)
E-mail: info@miem.edu.ru

Способы виброзащиты объектов электронного машино- и приборостроения

Рассмотрены способы снижения вибраций аналитико-технологического и технологического оборудования. Предложена система виброзащиты объектов электронного машино- и приборостроения, реализуемая на четырех уровнях — на фундаменте здания, в оборудовании, функциональных устройствах оборудования, на объекто- и подложкодержателях. Для каждого из уровней приведены конструктивные и технологические решения устройств снижения вибрации.

Ways to reduce vibration of analytic-processing and manufacturing equipment are considered. Vibroprotection system of the objects of electronic machine and tooling industry is offered. The system is realized on the four levels, i.e. on the house footing, in equipment, equipment functional units, on the object and substrate holders. Engineering solutions for the means of vibration reduction are suggested for every level of vibroprotection system.

Ключевые слова: электронная техника, растровый электронный микроскоп, вибрация, виброзащита

Key words: electronic engineering, scanning electron microscope, vibration, vibroprotection

По мере развития современных технологий в производстве приборов электронной техники особенно важное значение приобретают вопросы виброзащиты объектов электронного машино- и приборостроения [1].

Пространственное разрешение прецизионного аналитико-технологического и технологического оборудования значительно зависит от вибраций его основания. Так, в растровой электронной микроскопии влияние вибраций на разрешение обусловлено сравнительно высокой частотой вибраций механических систем и устройств при низкой скорости сканирования. В растровой тунNELьной микроскопии влияние вибраций имеет исключительно важное значение ввиду экспоненциальной зависимости тунNELьного тока от ширины промежутка между иглой и объектом.

Для снижения вибраций в объектах электронного машино- и приборостроения разработана четырехуровневая система виброзащиты (см. таблицу).

Первый уровень системы предусматривает виброзащиту фундамента здания предприятия от

воздействия наземного транспорта, подземных толчков и др., второй — виброзащиту аналитико-технологического и технологического оборудования от воздействий обслуживающего персонала, вентиляционных систем, компрессоров, вакуумных механических насосов и других технологических воздействий смежного оборудования.

Третий уровень системы обеспечивает виброзащиту функциональных устройств аналитико-

технологического и технологического оборудования от воздействия электромеханических и пневматических приводов, вводов движения в вакуум, соединительных элементов и др., четвертый уровень — виброзащиту объекто- и подложкодержателей от воздействия элементов механических передач, захватных устройств, пьезоприводов, магнитострикционных приводов и др.

Второй, третий и четвертый уровни виброзащиты целесооб-

Уровень виброзащиты	Объект виброзащиты	Основной источник вибраций	Рабочая частота, Гц	Возможный способ реализации
I	Фундамент здания предприятия	Наземный транспорт, подземные толчки и др.	1—5	Отдельный массивный фундамент, отсекающий ров
II	Аналитико-технологическое и технологическое оборудование	Обслуживающий персонал, вентиляционные системы, компрессоры, вакуумные механические насосы и др.	5—20	Системы виброзащиты оборудования на основе <i>l</i> -координат
III	Функциональные системы и устройства аналитико-технологического и технологического оборудования	Электромеханические и пневматические приводы, вводы движения в вакуум, соединительные элементы и др.	20—50	Системы виброзащиты функциональных систем и устройств оборудования на основе <i>l</i> -координат
IV	Объекто- и подложкодержатели	Элементы механических передач, захватные устройства, пьезоприводы, магнитострикционные приводы и др.	>50	Системы виброзащиты объекто- и подложкодержателей на основе <i>l</i> -координат

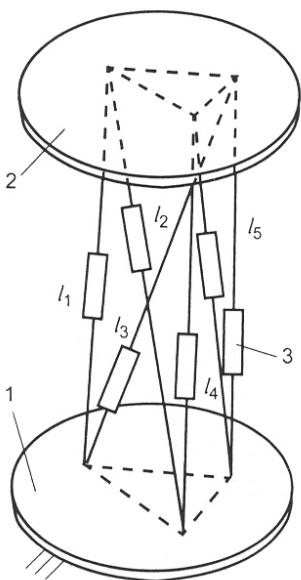


Рис. 1. l -координатное устройство виброзащиты: 1 — неподвижная база; 2 — выходное звено; 3 — гаситель колебаний

разно осуществлять на основе l -координатных виброзащитных систем.

Уравнение движения тела в l -координатах описывается только в линейных величинах, в качестве которых взяты длины шести отрезков, соединяющих тело с непосредственной базой таким образом, что при заданных значениях $l_1—l_6$ образуется геометрически неизменяемая структура (рис. 1), которая характеризует положение и движение тела в пространстве непосредственно в абсолютных неподвижных координатах, в то время как в существующих устройствах текущее положение каждого последующего звена определяется относительно положения предыдущего звена, т. е. в относительных координатах [2].

Рассмотрим построение систем виброзащиты на основе l -координат.

При рассмотрении пространственного колебания твердого тела массой m вводятся две системы координат: неподвижная $O\xi\eta\gamma$ и подвижная O_1xyz . В окрестности заданного положения твердого тела параметры l_i ($i = 1, \dots, 6$) полностью определяют его положение.

Силы, действующие на точки твердого тела в неподвижной системе координат,

$$F_i = \frac{F_i}{l_i} (\xi_i^0 - \xi_i, \eta_i^0 - \eta_i, \gamma_i);$$

$$F_i = K_i(l_i - l_i^0) + b_i l_i,$$

где ξ_i^0 и η_i^0 — начальные координаты соответствующих точек твердого тела; l_i^0 — начальные линейные параметры положения тела; ξ_i, η_i, γ_i — текущие координаты; K_i ($i = 1, \dots, 6$), b_i ($i = 1, \dots, 6$) — коэффициенты жесткости и сопротивления соответственно.

Уравнение движения центра масс твердого тела имеет вид

$$\begin{cases} m\ddot{\xi}_0 = \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{l_i} (\xi_i^0 - \xi_i); \\ m\ddot{\eta}_0 = \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{l_i} (\eta_i^0 - \eta_i); \\ m\ddot{\gamma}_0 = \sum_{i=1}^6 \frac{F_i}{l_i} \gamma_i - mg, \end{cases} \quad (1)$$

где ξ_0, η_0, γ_0 — координаты центра масс.

Динамические уравнения Эйлера:

$$\frac{dL_x}{dt} + \omega_y L_z - \omega_z L_y = M_x^l;$$

$$\frac{dL_y}{dt} + \omega_z L_x - \omega_x L_z = M_y^l; \quad (2)$$

$$\frac{dL_z}{dt} + \omega_x L_y - \omega_y L_x = M_z^l,$$

где $L_x = I_x \omega_x$, $L_y = I_y \omega_y$, $L_z = I_z \omega_z$ — главные моменты количества движения исполнительного устройства относительно осей O_1, x ; O_1, y ; O_1, z ; I_x, I_y, I_z , $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — главные моменты инерции проекции абсолютной угловой скорости относительно осей O_1, x ; O_1, y ; O_1, z ; M_x^l ,

M_y^l , M_z^l — главные моменты внешних сил относительно осей O_1, x ; O_1, y ; O_1, z .

Системы уравнений (1) и (2) с соответствующими преобразованиями могут быть объединены в систему дифференциальных уравнений 12-го порядка, которая описывает колебательные движения исполнительного устройства. Положение устойчивого равновесия принято за начало отсчета обобщенных координат и нулевой уровень потенциальной энергии. Отклонение системы от положения равновесия при таком выборе начала отсчета будет определяться значениями обобщенных координат Z_i ($i = 1, \dots, 6$):

$$Z_1 = \xi_0 - \xi_0^n; \quad Z_2 = \eta_0 - \eta_0^n;$$

$$Z_3 = \gamma_0 - \gamma_0^n; \quad Z_4 = \phi - \phi_0;$$

$$Z_5 = \Psi - \Psi_0; \quad Z_6 = \theta - \theta_0,$$

где $\xi_0^n, \eta_0^n, \gamma_0^n$ — координаты центра масс исполнительного устройства в положении устойчивого равновесия; $\phi_0, \Psi_0, \theta_0, \phi, \Psi, \theta$ — углы Эйлера в начальный и текущий моменты времени.

После линеаризации системы дифференциальных уравнений 12-го порядка получаем систему линейных дифференциальных уравнений

$$A\ddot{Z} + D\dot{Z} + BZ + E = 0, \quad (3)$$

где $Z = (Z_1, Z_2, Z_3, Z_4, Z_5, Z_6)^T$; A — матрица масс и моментов инерции; D — матрица диссипации; B — матрица жесткости; E — матрица возмущающих сил и моментов.

Для определения собственных частот колебаний консервативной системы положено $b_i = 0$, $i = 1, \dots, 6$. Система уравнений (3) приобретает вид $A\ddot{Z} + BZ = 0$.

Для определения собственных частот колебаний и коэффициентов демпфирования неконсервативной системы рассматривается система дифференциальных уравнений

$$A\ddot{Z} + D\dot{Z} + BZ = 0.$$

Данные о частоте собственных колебаний позволяют избегать опасных резонансных колебаний в системе и обосновывать пределы применимости той или иной конструкции гасителя колебаний и оценить целесообразность его использования в *l*-координатных системах виброзащиты аналитико-технологического и технологического оборудования электронного машино- и приборостроения.

На рис. 2 приведена схема виброизолирующей системы вакуумного блока контрольно-диагностической установки. Система состоит из основания 1 и демпфирующего тела 2, связанных между собой виброзоляторами 3 по структуре *l*-координат.

При возникновении колебаний вакуумного блока шесть виброзоляторов гасят колебания по всем шести степеням свободы.

С целью повышения вибустойчивости обрабатываемых полупроводниковых пластин и исключения загрязнения последних микрочастицами их скола разработан виброустойчивый объектодержатель, который снабжен прижимом фиксатором объекта, соединенным с неподвижным основанием посредством упругих элементов, установленных по структуре *l*-координат¹.

Наличие упругих элементов в конструкции позволяет также компенсировать тепловые деформации, возникающие из-за отсутствия теплоотвода газовой конвекцией в условиях вакуума.

Выход за границы субмикронной технологии возможен только при наличии устройств, обеспечивающих нанесение и контроль элементов на подложке с размерами порядка 100 нм и менее. Задачи визуализации нанорельефов решаются с помощью растровых тунNELьных микроскопов,

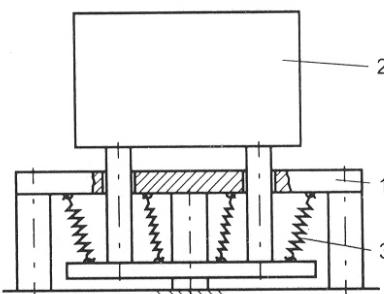


Рис. 2. Виброизолирующая система вакуумного блока аналитико-технологической установки



Рис. 3. Спектр вибраций при отсутствии системы виброзащиты

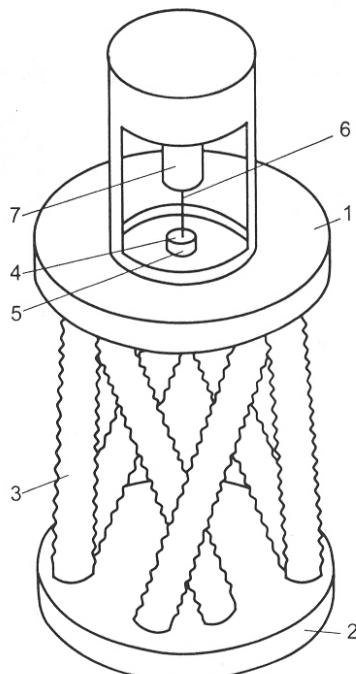


Рис. 4. Растворный тунNELьный микроскоп с системой виброзащиты, построенной по структуре *l*-координат:
1 — виброзолирующее основание; 2 — неподвижное основание; 3 — амортизаторы;
4 — исследуемый объект; 5 — предметный столик; 6 — игла; 7 — иглодержатель

которые обладают уникальными возможностями по разрешению поверхностных структур вплоть до атомарных масштабов. Возможность создания в растровых тунNELьных микроскопах полей до 10^8 В/см и плотностей токов до 10^{10} А/см² позволяет применять их для созданияnanoструктур на поверхности подложек.

Гофрировка многих поверхностей на атомарном уровне наблюдается при работе растрового тунNELьного микроскопа в режиме фиксированного тока и обычно характеризуется амплитудой порядка 10 пм, так, что должна быть обеспечена виброзащита не хуже 1 пм.

Растровый тунNELьный микроскоп должен быть изолирован от двух видов возмущений: вибрации и ударов. Вибрации обычно представляют непрерывный периодический процесс. На рис. 3 приведен типичный спектр вибраций пола [3]. Вибрация пола — низкочастотная и составляет 1—5 Гц. Вибрации на частоте 5—50 Гц возникают в вакуумных насосах, вентиляционных трубах, двигателях, трансформаторах и др.

С целью снижения вибрации растрового тунNELьного микроскопа разработана система виброзащиты, построенная по структуре *l*-координат (рис. 4).

Эффективность каждого уровня системы виброзащиты обеспечивается эффективностью той элементной базы объектов электронного машино- и приборостроения, на которой она реализована.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Производство тонкопленочных структур в электронном машиностроении: Учебник. В 2 т. / А. Т. Александрова, Е. Н. Ивашов, С. В. Степанчиков и др. М.: Машиностроение, 2006. Т. 1. 462 с.
- Ивашов Е. Н. Устройства на основе *l*-координат в оборудовании электронной техники: Учебное пособие. М.: МИЭМ, 1995. 35 с.
- Кук И., Сильверман П. Растровая тунNELьная микроскопия // Приборы для научных исследований. М.: Мир, 1989.

¹ А. с. 1639088 (СССР).