

Математическая модель автоматизации процессов определения и обеспечения функционально-параметрической совместимости компонентов производственно-технологических модулей (ПТМ) с вязкоупругими звеньями в динамическом управлении

С.Б. Набиев, e-mail: websarvar@gmail.com

Ташкентский государственный технический университет имени Ислама Каримова

***Аннотация.** Аннотация. Настоящая работа посвящается разработке математической модели, позволяющей автоматизировать процессы определения и обеспечения полной функционально-параметрической совместимости компонентов ПТМ с вязкоупругими звеньями в динамическом управлении.*

Ключевые слова: Ключевые слова: автоматизация, динамическое управление, функционально-параметрическая совместимость.

Введение

Автоматизированные производственно-технологические системы (ПТС) играют особо важную роль в развитии машиностроительного производства. Одним основным принципом создания и организации автоматизированных ПТС является принцип обеспечения высокого уровня совместимости их компонентов, в связи с этим в настоящей работе рассматриваются вопросы автоматизации процессов определения и обеспечения функционально-параметрической совместимости взаимодействующих компонентов ПТС, в частности производственно-технологических модулей машиностроительного производства.

1. Основная часть

Основными принципами создания и организации автоматизированных ПТС являются: принцип совмещения высокой производительности и универсальности; принцип модульности; принцип иерархической соподчиненности и принцип обеспечения высокого уровня совместимости [1].

Обеспечение высокого уровня совместимости ПТС, являясь одним из принципов их создания играет важное значение в повышении

производительности, надежности и эффективности их функционирования.

Можно различать функционально-параметрическую, технологическую, информационную, организационно-структурную, эксплуатационную и энергетическую совместимость ПТС.

Вопросам определения и обеспечения функционально-параметрической совместимости компонентов ПТС, в том числе ПТМ, посвящены многие работы [1, 2, 3].

В работах [2, 4] решается задача обеспечения функционально-параметрической взаимозвязки основных технологических оборудований (ОТО) и промышленных роботов (ПР) путем установления возможности совмещения основных координатных перемещений звеньев ПР с направлением ввода заготовок (деталей) в зону загрузки (обработки) ОТО.

В работе [3] разработан метод определения и обеспечения компонентов ПТМ, основанный на аналитический подход для механической модели манипулятора, т.е. в предположении, что все звенья манипулятора считаются жесткими.

Известно, что в последнее время в конструкциях ПР и манипуляторов широко используются композиционные и другие материалы, имеющие свойствами вязкоупругости и обеспечивающие высокой надежности их функционирования.

С этой точки зрения настоящая работа посвящается решению задачи автоматизации процессов определения и обеспечения функционально-параметрической совместимости компонентов ПТМ с вязкоупругими звеньями.

Рассмотрим кинематическую схему вспомогательного оборудования, представляющую собой прямолинейные стержни P_1, P_2, \dots, P_n , соединенные цилиндрическими шарнирами L_1, L_2, \dots, L_{n+1} . При этом L_1 крепится к неподвижному основанию, т.е. к неподвижной системе координат $O_0 x_0 y_0 z_0$, а шарнир L_{n+1} соединяет рабочего органа (захватного устройства) вспомогательного оборудования.

Для описания движения системы в качестве обобщенных координат выбираются $q^{(1)}, q^{(2)}, \dots, q^{(n+1)}$.

Рассмотрим функции f_1, f_2, \dots, f_n и матрицу $F = (F_{ij})$, для которых имеют место

$$q_i = f_i(\alpha_i) + x_i, \quad F_{ij} = \frac{\partial f_i(\alpha_i)}{\partial \alpha_i} \quad (1)$$

Тогда динамику упругого манипулятора можно задавать следующими соотношениями:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dt}[A(q) \cdot \dot{q}] - (A(q) \cdot \dot{q}, \dot{q}) &= Q(q, \dot{q}, t) - C(\alpha)x \\ M &= -F'(\alpha)C(\alpha)x, \quad (x = q - f(\alpha)), \\ M &= F'(\alpha) \left\{ \frac{d}{dt}[A(q) \cdot \dot{q}] - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} [A(q) \cdot \dot{q}, \dot{q}] - Q(q, \dot{q}, t) \right\} \\ C(\alpha) &= \varepsilon^{-2} K(\alpha), \quad x = \varepsilon^2 X, \quad \varepsilon \ll 1 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где A, C – симметричные положительно-определенные матрицы;

$Q(q, \dot{q}, t) = (Q_1, Q_2, \dots, Q_n)$ – вектор внешних обобщенных сил;

K, X – матрица и вектор с элементами порядка единицы, соответственно [5].

Теперь рассмотрим задачу определения и обеспечения функционально-параметрической совместимости, когда управление задается кинематическими параметрами, т.е. заданы законы изменения углов $\alpha = \alpha^0(t)$ и перемещений $\xi = \xi^0(t)$ в шарнирах и звеньях, соответственно.

Тогда для компонентов ПТМ с вязкоупругими звеньями имеет место

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt}[A(q^0 + \varepsilon^2 X) \cdot (\dot{q}^0 + \varepsilon^2 \dot{X})] - \frac{1}{2} \frac{\partial}{\partial q} [A(q^0 + \varepsilon^2 X)(\dot{q}^0 + \varepsilon^2 \dot{X})] \\ (q^0 + \varepsilon^2 X) = Q((q^0 + \varepsilon^2 X), t) - K(\alpha^0)X \\ \alpha = \alpha^0(t), \quad q^0(t) = f(\alpha^0(t)) \end{aligned} \quad (3)$$

здесь $q^0(t)$ – закон движения захватного устройства в случае механической модели.

Решение (3) можно представить в виде [5]

$$X(t) = R_1(t) + R_2(\tau), \quad \tau = t/\varepsilon \quad (4)$$

где слагаемые $R_1(t)$ описывает смещения, возникающие при манипуляционных операциях, а $R_2(\tau)$ описывает упругие колебания, имеющие временной порядок ε^{-1} .

Следует отметить, что **ОТО**, в зависимости от вида выполняемых в нем операций имеет различные зоны загрузки(обработки), которые по своей конфигурации разделяются на 12 основных типов [6], каждый из которых имеет соответствующую поверхность покрытия $W(x, y, z)$ и направляющую плоскость $P(x, y, z)$ [120, 137]. Задавая тип и форму, геометрические и конструктивные параметры зоны загрузки(обработки) **ОТО** можно определить параметры и вид аналитической зависимости соответствующей поверхности покрытия и направляющей плоскости.

Определим функцию функционально-параметрической совместимости i -го звена вспомогательного оборудования с **ОТО** в следующем виде

$$\Delta^{(i)}(t, \tau) = \Delta_{12}^{(i)}(t, \tau) \Delta_{12}^{(i)}(t, \tau) \Delta_{12}^{(i)}(t, \tau), \quad 0 < t < T_0, \quad \tau = t / \varepsilon$$

где

$$\Delta_{12}^{(i)}(t, \tau) = \frac{\partial W(x, y, z)}{\partial x} \cdot \frac{\partial P(x, y, z)}{\partial y} - \frac{\partial W(x, y, z)}{\partial y} \cdot \frac{\partial P(x, y, z)}{\partial x} \Bigg| R^{(i)} = R_{01}^{(i)}(t) + R_{02}^{(i)}(\tau)$$

$$\Delta_{23}^{(i)}(t, \tau) = \frac{\partial W(x, y, z)}{\partial y} \cdot \frac{\partial P(x, y, z)}{\partial z} - \frac{\partial W(x, y, z)}{\partial z} \cdot \frac{\partial P(x, y, z)}{\partial y} \Bigg| R^{(i)} = R_{01}^{(i)}(t) + R_{02}^{(i)}(\tau)$$

$$\Delta_{31}^{(i)}(t, \tau) = \frac{\partial W(x, y, z)}{\partial z} \cdot \frac{\partial P(x, y, z)}{\partial x} - \frac{\partial W(x, y, z)}{\partial x} \cdot \frac{\partial P(x, y, z)}{\partial z} \Bigg| R^{(i)} = R_{01}^{(i)}(t) + R_{02}^{(i)}(\tau)$$

где $R_{01}^{(i)}(t) = (x_{01}^{(i)}(t), y_{01}^{(i)}(t), z_{01}^{(i)}(t))$ описывает смещения, возникающие при манипуляционных операциях i -го звена относительно системы координат $O_0x_0y_0z_0$, связанной с неподвижным основанием вспомогательного оборудования, а $R_{02}^{(i)}(\tau) = (x_{02}^{(i)}(\tau), y_{02}^{(i)}(\tau), z_{02}^{(i)}(\tau))$ ($\tau = t / \varepsilon$) описывает упругие колебания i -го звена относительно

системы координат $O_0 x_0 y_0 z_0$, связанной с неподвижным основанием вспомогательного оборудования.

$R^{(i)}(t, \tau) = (x^{(i)}(t, \tau), y^{(i)}(t, \tau), z^{(i)}(t, \tau))$ – вектор, определяющий пространственное положение некоторой точки i -го звена относительно системы координат $O_0 x_0 y_0 z_0$, связанной с неподвижным основанием вспомогательного оборудования.

Таким образом, мы имеем функцию функционально-параметрической совместимости i -го звена вспомогательного оборудования с вязкоупругими звеньями с **ОТО** $\Delta^{(i)}(t, \tau)$.

Определение функционально-параметрической совместимости вспомогательного оборудования с **ОТО** реализуется путем проверки условия $\Delta^{(i)}(t, \tau) \neq 0$ при $0 < t < T_0, \tau = t / \varepsilon$.

Следует отметить, что функция $\Delta^{(i)}(t, \tau)$ является обобщением функции, полученной в работах [3, 7]. Действительно, в частном случае, когда рассматривается механическая модель вспомогательного оборудования, его звенья считаются жесткими и, очевидно, что $R_{02}^{(i)}(\tau) = 0$, т.е. $\Delta^{(i)}(t, \tau) = \Delta^{(i)}(t)$.

Разработанная модель обобщает результаты, полученные в работах [3, 7], а принцип разработки алгоритмов автоматизации процессов определения и обеспечения функционально-параметрической совместимости вязкоупругих компонентов **ПТМ** остается прежним. Отличием является то, что при этапе вычисления значения функции функционально-параметрической совместимости $\Delta^{(i)}(t, \tau)$ добавляются слагаемые $R_{02}^{(i)}(\tau) = (x_{02}^{(i)}(\tau), y_{02}^{(i)}(\tau), z_{02}^{(i)}(\tau))$ ($\tau = t / \varepsilon$)

К исследованиям определения и обеспечения функционально-параметрической совместимости компонентов производственно-технологических модулей с жесткими механическими моделями посвящены многие работы [2, 3, 4, 7]. Среди них существуют такие работы, которые отличаются друг от друга по предложенным и примененным подходам и методам при решении данной проблемы.

В некоторых этих работах [2, 4] данная проблема решается с точки зрения обеспечения взаимоувязки всех компонентов производственно-технологических модулей, применяя метода сопоставления соответствующих координатных перемещений вспомогательного

оборудования с направлениями загрузки обрабатываемых изделий к зоне обработки основного технологического оборудования.

Некоторые работы [3, 7] отличаются от вышеупомянутых тем, что у них определение и обеспечение функционально-параметрической совместимости осуществляется с применением аналитических методов для механической модели вспомогательного оборудования (**ПР**, манипулятора, приспособление для загрузки и выгрузки (**ПЗВ**) **ОТО**).

Известно, что в настоящее время большим преимуществом обладают вспомогательные оборудования, имеющие упругие конструкции и обеспечивающие высокую точность выполняемых операций в процессе функционирования сложных технических систем, в том числе производственно-технологических модулей.

При различных производственных и технологических условиях, а также при различных формах и конструкциях зон обработки основного технологического оборудования применение вышеупомянутых вспомогательных оборудования с упругими исполнительными органами играет важную роль в повышении производительности и надежности функционирования производственно-технологических модулей в целом.

С этой точки зрения, следует отметить, что реализация этих задач зависит от высокого уровня совместимости всех компонентов модулей с упругими моделями (вышеуказанных работах рассматривались жесткие модели) в случаях, и кинематического, и динамического управления этими компонентами.

Моделированию динамики манипуляторов с вязкоупругими звеньями посвящены некоторые работы [5, 8], в которых приведены результаты, относящиеся к составлению уравнений движения исполнительных органов компонентов с вязкоупругими звеньями без учета производственно-технологических требований, существующих в условиях производственно-технологических модулей. Поэтому управление этими компонентами с обеспечением их функционально-параметрической совместимости с учетом вышеупомянутых требований является необходимым для эффективного функционирования **ПТМ**.

Поэтому основной целью настоящей работы является моделирование процессов автоматизации определения и обеспечения функционально-параметрической совместимости вспомогательного оборудования с вязкоупругими звеньями с **ОТО** в динамическом управлении.

Известно, что динамическое управление вспомогательными компонентами **ПТМ** осуществляется путем нахождения законов движения исполнительных органов этих компонентов при заданных законах изменения моментов приводов $M = M_0(\alpha, t)$. При этом можно

предположить, что этот случай включает как программное управление $M = M_0(t)$; и так называемое управление с обратной связью $M = M_0(\alpha, t)$, где $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$ – вектор угловых значений в шарнирах звеньев вспомогательного оборудования.

Таким образом, требуется найти движение исполнительных органов нагруженного вспомогательного оборудования с учетом вышеупомянутых требований функционально-параметрической совместимости, т.е. $q(t)$ и $q(t) = (q_1(t), q_2(t), \dots, q_n(t))$ – обобщенные координаты пространственного положения груза.

Пусть $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ и $g = (g_1, g_2, \dots, g_n)$ – вектор-функции и $F = \{F_{ij}\}$ и $G = \{G_{ij}\}$ – матрицы, для которых имеют место

$$\begin{aligned} q &= f(\alpha), \quad (q_i = f_i(\alpha)), \\ F &= \{F_{ij}\}, \quad F_{ij}(\alpha) = \partial f_i(\alpha) / \partial \alpha_j, \\ g(q) &= g(f(\alpha)) = \alpha, \quad g = f^{-1}(\alpha), \\ G &= \{G_{ij}\} = \{\partial g_i(\alpha) / \partial \alpha_j\}, \quad G = F^{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

Теперь рассмотрим кинематическую схему оборудования с упругими звеньями, представляющая прямолинейные стержни P_1, P_2, \dots, P_n , соединенные цилиндрическими шарнирами L_1, L_2, \dots, L_{n+1} . При этом L_1 крепится к неподвижному основанию, т.е. к неподвижной системе координат $O_0 x_0 y_0 z_0$, связанной с основанием вспомогательного оборудования, а шарнир L_{n+1} соединяет рабочего органа (захватного устройства) вспомогательного оборудования.

Примем

$$q = f(\alpha) + s, \quad s = (s_1, s_2, \dots, s_n) \quad (6)$$

где s_i – значения малых упругих смещений груза относительно i -ой системы координат $O_i x_i y_i z_i$, связанной с i -ым звеном вспомогательного оборудования [9].

Уравнение Лагранжа представляется в следующем виде

$$M_0(\alpha, t) = -\varepsilon^2 F'(\alpha(t)) \Phi(\alpha(t)) s \quad (7)$$

где

$$s = \varepsilon^2 S,$$

$\Phi(\alpha(t)), X$ – матрица и вектор порядка единицы.

Отсюда получаем

$$s = -\varepsilon^2 [F'(\alpha(t))\Phi(\alpha(t))]^{-1} M_0(\alpha, t), \quad q = f(\alpha) + s \quad (8)$$

$$\alpha(t) = g(q(t)) + G(q(t))\Phi^{-1}(g(q(t)) + G'(q(t))) M_0(g(q(t)), t) \quad (9)$$

Учитывая (6)-(9), уравнение движения исполнительного органа вспомогательного оборудования с упругими звеньями можно представить в виде

$$L = Q(q, \dot{q}, t) + G'(q(t)) M_0(g(q(t)), t) + \varepsilon^2 \Theta(q(t), t) \Phi^{-1}(g(q(t)) G'(q(t))) M_0(g(q(t)), t) \quad (10)$$

где

$$\Theta(q(t), t) = \left\{ \partial G_{ij}'(q(t)) M_0(g(q(t), t) / \partial q_j(t) \right\}, \quad i, j = \overline{1, n}$$

Учитывая $q = f(\alpha)$, $G = F^{-1}(\alpha)$, $M_0 = M_0(\alpha, t)$ уравнение (10) можно написать в следующем виде

$$L = Q(\alpha, \dot{\alpha}, t) + (F^{-1})'(f(\alpha)) M_0(\alpha, t) + \varepsilon^2 \Theta(f(\alpha), t) \Phi^{-1}(\alpha) G'(f(\alpha)) M_0(\alpha, t) \quad (11)$$

Уравнения (11) решаются относительно $\alpha = (\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_n)$, которые являются эквивалентными как, и для механической, так и для упругой модели из-за того, что углы в шарнирах для обеих моделей одинаковы.

Таким образом $\alpha(t) = \Psi(\ddot{Q}, M_0, \Theta, \Phi^{-1}, G', f, \varepsilon^2, t)$, Ψ – вектор функция, определяемая с учетом видов перемещений в звеньях вспомогательного оборудования.

Метод построения систем координат, связанных с рабочими звеньями вспомогательного оборудования, приведено в работе [9].

Согласно результатам этой работы, переход с одной системы координат в другую без обеспечения функционально-параметрической совместимости i -го звена вспомогательного оборудования с ОТО задается следующей формулой

$$R_{i-1}\alpha(t) = T_i(\alpha(t)) R_i \quad (12)$$

где R_i – радиус-вектор, определяющий пространственное положение некоторой точки i -го звена относительно системы координат, связанной с этим звеном;

$T_i(\alpha(t))$ – матрица перехода из системы координат, связанной с i -ым звеном, в систему координат, связанную с $(i-1)$ -ым.

Тогда можно определить пространственное положение некоторой точки i -го звена P_i относительно системы координат, связанной с неподвижным основанием вспомогательного оборудования $O_0 x_0 y_0 z_0$ следующим образом

$$R_i^0(t) = \Gamma_i(\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_i(t)) R_i(t),$$

где $\Gamma_i(\alpha_1(t), \alpha_2(t), \dots, \alpha_i(t)) = T_1(\alpha_1) \cdot T_2(\alpha_2) \cdot \dots \cdot T_i(\alpha_i)$,

$$R_i^0(t) = (x_i^0(t), y_i^0(t), z_i^0(t)), \quad R_i(t) = (x_i(t), y_i(t), z_i(t))$$

Следует отметить, что основное технологическое оборудование, в зависимости от вида выполняемых в нем операций имеет различные зоны загрузки (обработки), которые по своей конфигурации разделяются на 12 основных типов [6], каждый из которых имеет соответствующую поверхность покрытия $W(x, y, z)$ и направляющую плоскость $P(x, y, z)$ [3]. Задавая тип и форму, геометрические и конструктивные параметры зоны загрузки(обработки) ОТО можно определить параметры и вид аналитической зависимости соответствующей поверхности покрытия и направляющей плоскости.

Определим функцию функционально-параметрической совместимости i -го звена вспомогательного оборудования с основным технологическим оборудованием в следующем виде

$$\Delta^{(i)}(t, \tau) = \Delta_{12}^{(i)}(t, \tau) \Delta_{12}^{(i)}(t, \tau) \Delta_{12}^{(i)}(t, \tau), \quad 0 < t < T_0, \quad \tau = t / \varepsilon,$$

где

$$\Delta_{12}^{(i)}(t, \tau) = \left. \begin{aligned} & \partial W(x, y, z) / \partial x \cdot \partial P(x, y, z) / \partial y - \\ & - \partial W(x, y, z) / \partial y \cdot \partial P(x, y, z) / \partial x \end{aligned} \right| R = R_0 \Psi(\bar{Q}, M_0, \Theta, \Phi^{-1}, G', f, \varepsilon^2, t)$$

$$\Delta_{23}^{(i)}(t, \tau) = \left. \begin{aligned} & \partial W(x, y, z) / \partial y \cdot \partial P(x, y, z) / \partial z - \\ & - \partial W(x, y, z) / \partial z \cdot \partial P(x, y, z) / \partial y \end{aligned} \right| R = R_0 \Psi(\bar{Q}, M_0, \Theta, \Phi^{-1}, G', f, \varepsilon^2, t)$$

$$\Delta_{31}^{(i)}(t, \tau) = \left. \begin{aligned} & \partial \mathbf{W}(x, y, z) / \partial z \cdot \partial \mathbf{P}(x, y, z) / \partial x - \\ & - \partial \mathbf{W}(x, y, z) / \partial x \cdot \partial \mathbf{P}(x, y, z) / \partial z \end{aligned} \right|_{R = R_0 \Psi(\bar{Q}, M_0, \Theta, \Phi^{-1}, G', f, \varepsilon^2, t)}$$

где $R = (x, y, z)$ – вектор, определяемый относительно системы координат $O_0 x_0 y_0 z_0$, связанной с неподвижным основанием вспомогательного оборудования.

В итоге мы имеем функции функционально-параметрической совместимости $\Delta^{(i)}(t, \tau)$, ($i = 1, 2, \dots, n$) для всех звеньев вспомогательного оборудования P_1, P_2, \dots, P_n .

Определение функционально-параметрической совместимости i -го звена P_i вспомогательного оборудования с ОТО осуществляется проверкой условия

$$\Delta^{(i)}(t, \tau) \neq 0, \quad 0 < t < T_0, \quad \tau = t / \varepsilon \quad (13)$$

Полная функционально-параметрическая совместимость вспомогательного оборудования с ОТО определяется проверкой условий (13) для всех $i = 1, 2, \dots, n$, т.е. проверкой системы условий

$$\Delta^{(i)}(t, \tau), \quad 0 < t < T_0, \quad \tau = t / \varepsilon \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Разработанная математическая модель позволяет автоматизировать процессов определения полной функционально-параметрической совместимости не только вспомогательного оборудования и ОТО, а также вспомогательного оборудования и накопительных систем (НС) и тем самым всех компонентов в динамическом управлении ПТМ с учетом производственно-технологических ограничений и может быть применён в принятии производственно-технологических и организационно-структурных решений на этапе проектирования ПТМ и ПТС в целом.

Заключение

В последние годы в человеческом развитии наблюдается тенденция оперативного обновления старого с новым, в частности старой технологии с новой, путем использования методов автоматизации высокого уровня. Реализация такого обновления зависит от оперативного определения и обеспечения их совместимости. С этой точки зрения в настоящей работе рассматриваются вопросы

автоматизации процессов определения и обеспечения функционально-параметрической совместимости компонентов производственно-технологических систем, в частности производственно технологических модулей.

Список литературы

1. Александрова, А.Т. Гибкие производственные системы электронной техники: Учеб. пособие для ПТУ / А.Т. Александрова, Е.С. Ермаков. – М.: Высшая школа, 1989. – 319 с.
2. Шамсиев, З.З. Формализация функционально-параметрической увязки компонентов технологических объектов управления гибких производственных модулей в моделировании и процессов их автоматизированного синтеза / З.З. Шамсиев // Тезисы докладов участников республиканской научно-технической конференции «Проблемные вопросы развития и повышения эффективности внедрения автоматических комплексов с разной степенью гибкости». Часть 2. – Ташкент, 1989. – С. 18-20.
3. Мадрахимов, З.Т. Обеспечение функционально-параметрической совместимости компонентов технологических объектов управления дискретных производств / З.Т. Мадрахимов // Докл. АН РУз. – Т., 1992. – № 8-9. – С. 28-30.
4. Пулатов, Ш.Й. Структурные и алгоритмические модели синтеза технологических объектов управления ГПС (на примере механообработки). Афтореф. канд. дис. – Ташкент, 1988. – 19 с.
5. Черноушко, Ф.А. Динамика управляемых движений упругого манипулятора / Ф.А. Черноушко. – М., Известие АН СССР. Техническая кибернетика, 1981, №5.
6. Автоматизированные технологические комплексы «оборудование-робот» (Методические рекомендации). – М.: ВНИИТЭМР, 1985. – 91 с.
7. Мадрахимов, З.Т. Модель функционально-параметрической увязки компонентов ГПИМ / З.Т. Мадрахимов // Вопросы кибернетики. – Ташкент: РИСО АН УзССР. – 1990. – Вып. 142. – С. 72-74.
8. Мадрахимов, З.Т. Моделирование динамики компонентов производственно-технологических модулей с вязкоупругими звеньями / З.Т. Мадрахимов, У.И. Акбаров // Узбекский журнал «Проблемы информатики и энергетики». – Т., 1998. – №3. – С.31-34.
9. Робототехника и гибкие автоматизированные производства. В 9-ти кн. Кн.3: Управление робототехническими системами и гибкими автоматизированными производствами / Ж.П. Ахромеев [и др.] ; Под ред. И.М.Макарова. – М.: Высшая школа, 1986. – 159 с.