



УДК 681.513.6

В. В. Путов, В. Н. Шелудько, Т. Л. Русяева, Т. Т. Нгуен  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический  
университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

## Адаптивное управление упруго-жестким многостепенным нелинейным электромеханическим объектом

*Рассмотрены вопросы построения и исследования адаптивной системы управления упруго-жестким многостепенным нелинейным электромеханическим объектом. Математическая модель объекта представлена двумя связанными системами уравнений Лагранжа, одна из которых описывает многомассовые упругие подобъекты в виде цепных моделей материальных тел, соединенных невесомыми упругими связями, а другая – «жесткий скелет» многостепенного электромеханического объекта, получаемого при замене недеформированных упругих связей жесткими связями. Адаптивная система управления строится в виде двух подсистем, обеспечивающих подавление упругих деформаций и управление траекторным движением «жесткого скелета» многостепенного электромеханического объекта в условиях его функционально-параметрической неопределенности и неполных измерений. Исследования эффективности построенной адаптивной системы проведены на примере нелинейной компьютерной модели трехстепенного манипулятора робота типовой конструкции с двухмассовыми упругими следящими электроприводами степеней подвижности манипулятора.*

**Упруго-жесткий многостепенный нелинейный электромеханический объект, параметрическая и функционально-параметрическая неопределенность, адаптивная система управления, наблюдатель состояния, подавление упругих деформаций, исполнительные электроприводы степеней подвижности объекта, управление взаимосвязанным движением жесткого объекта, компьютерное исследование, трехстепенной манипуляционный робот**

Создание высокоточных и маневренных объектов наземной, воздушной, морской и космической техники гражданского и военного назначения выдвигают задачи разработки высокоэффективных систем управления многостепенными взаимосвязанными нелинейными электромеханическими объектами с протяженной геометрией и упругими деформациями. К таким объектам относятся механические конструкции обрабатывающих станков, роботов-манипуляторов промышленного и экстремального применения, наземных мобильных установок военного назначения, быстрходных надводных судов, высокоманевренных летательных аппаратов и других устройств. В условиях, когда возможности современного конструирования и применения новейших материалов с целью достижения высокой точности и высокой производительности таких объектов исчерпываются, дальнейшее их повышение может быть до-

стигнуто только созданием адекватных таким задачам эффективных систем управления их движением, разрабатываемых в рамках бесперебойного адаптивного подхода.

В качестве подходов к построению бесперебойных адаптивных систем управления (по состоянию) нелинейными динамическими объектами применяются методы, базирующиеся на так называемой схеме скоростного градиента, предложенной и развитой в [1], [2] и др. Однако их применение допускает такой уровень неопределенности правых частей дифференциальных уравнений, описывающих их, когда они известны с точностью до постоянных или изменяющихся во времени неизвестных параметров, тогда как нелинейности правых частей считаются известными и должны полностью воспроизводиться при построении структур адаптивных законов и алгоритмов их настройки.

В [3] изложен подход к построению беспоисковых адаптивных систем, названный методом мажорирующих функций. Отличие этого метода от указанных ранее известных подходов состоит в том, что для его применения не требуется знания не только конкретных параметров объекта, но и описывающих его нелинейных функций, за исключением некоторых легко проверяемых оценочных мажорирующих соотношений, характерных для целых классов нелинейных объектов, например таких, как многостепенные нелинейные механические и электромеханические объекты.

**1. Математическая модель упруго-жесткого многостепенного нелинейного электромеханического объекта.** Во многих случаях общей динамической моделью многостепенного электромеханического объекта может служить пространственная взаимосвязанная система материальных точек или протяженных тел, соединенных невесомыми упругими связями и находящиеся под действием упругих (восстанавливающих) сил, сил тяжести, возникающих при траекторном движении объекта гироскопических и кориолисовых сил, а также управляющих сил, формируемых исполнительными электроприводами степеней подвижности объекта. При замене в положении равновесия масс недеформированных упругих связей абсолютно жесткими связями, полученную жесткую конструкцию будем называть «жестким скелетом» упруго-жесткой конструкции многостепенного электромеханического объекта.

Пусть жесткий многостепенный нелинейный электромеханический объект («жесткий скелет») описывается системой, состоящей из  $n$  дифференциальных уравнений второго порядка ( $n$  – число степеней подвижности электромеханического объекта), объединенных в векторно-матричное дифференциальное уравнение вида

$$M(\mathbf{q})\ddot{\mathbf{q}} + V(\dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q})\dot{\mathbf{q}} + G(\mathbf{q}) = \mathbf{u}, \quad (1)$$

где  $M(\mathbf{q})$ ,  $V(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  – функциональные  $(n \times n)$ -матрицы инерции и центробежных и кориолисовых сил;  $\mathbf{q} \in R^n$  – вектор обобщенных координат;  $\mathbf{u} \in R^n$  – вектор управляющих сил (моментов);  $G(\mathbf{q})$  – функциональная  $(n \times 1)$ -матрица гравитационных сил.

На основе анализа строения уравнений Лагранжа в явной форме вида (1) можно построить следующие детализированные дифференциальные уравнения движения степеней подвижности указанных объектов, записанные в нормальной форме относительно лагранжевого вектора состояния  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$

$$\ddot{q}_i = a_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + b_i(\mathbf{q}, t)u_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + \sum_{j=1, j \neq i}^n [f_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) + s_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)], \quad (2)$$

где

$$\left. \begin{aligned} a_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) &= a_{i1}(\mathbf{q}, t)q_i + a_{i2}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_i + \\ &+ a_{i3}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_i^2; \\ f_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) &= f_{ij_1}(\mathbf{q}, t)q_j + f_{ij_2}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_j + \\ &+ f_{ij_3}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_i\dot{q}_j + f_{ij_4}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_j^2; \\ s_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) &= b_{ij}(\mathbf{q}, t)u_j(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t); \\ i, j &= \overline{1, m} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

– глобально ограниченные скалярные нелинейные функции, непрерывно дифференцируемые по аргументам  $q_i$  и по времени  $t$ ;  $\mathbf{u} = [u_1, \dots, u_n]^T$ , где

$$u_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, I_{яi}, t) = u_{ни}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, I_{яi}) + u_{ai}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + u_{0i}(t), \quad (4)$$

$u_{ни}$  – неадаптивное (линейное) с постоянными настройками;  $u_{ai}$  – искомое адаптивное управление в  $i$ -й степени подвижности;  $u_{0i}(t)$  – программное управление;  $\mathbf{q} = [q_1 \dots q_n]^T$ ;  $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1 \dots \dot{q}_n]^T$  –  $n$ -мерные векторы обобщенных (лагранжевых) координат и скоростей;  $i = \overline{1, n}$ ;  $n$  – число степеней подвижности;  $I_{яi}$  – токи электроприводов. Отметим, что система (2), (3) может быть записана в нормальной форме (Коши) относительно так называемого лагранжевого вектора состояния  $(\mathbf{q}^T, \dot{\mathbf{q}}^T)^T$ .

Дифференциальная система (2)–(4) исчерпывает математическое описание динамики класса жестких взаимосвязанных нелинейных электромеханических объектов со многими степенями подвижности, и каждое уравнение характеризуется:

- а) собственной нелинейной нестационарной динамикой (функции  $a_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ ,  $b_i(\mathbf{q}, t)$ );
- б) перекрестными нелинейными связями по обобщенным координатам и скоростям  $\dot{q}_j, q_j$  (функции  $f_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ );
- в) перекрестными нелинейными связями по управлениям  $u_j(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$  (функции  $s_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ ).

Управления  $u_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, I_{яi}, t)$  формируются исполнительными электроприводами постоянного или переменного тока, присоединенными к механизмам степеней подвижности многостепенного нелинейного механического объекта (1) или (2), (3).

Неадаптивные управления  $u_{ni}(q_i, \dot{q}_i)$ ;  $i = \overline{1, n}$  решают задачи формирования локальной динамики следящих систем, характеризуемых некоторыми постоянными усредненными параметрами, и могут быть рассчитаны методами модального, следящего за эталонной моделью, подчиненного и т. п. управлений. Здесь они считаются известными. Будем полагать, что все коэффициенты выражений (3)  $a_{i1}(\mathbf{q}, t)$ ,  $a_{i2}(\mathbf{q}, t)$ ,  $a_{i3}(\mathbf{q}, t)$ ,  $f_{ij_1}(\mathbf{q}, t)$ ,  $f_{ij_2}(\mathbf{q}, t)$ ,  $f_{ij_3}(\mathbf{q}, t)$ ,  $f_{ij_4}(\mathbf{q}, t)$ ,  $b_{ij}(\mathbf{q}, t)$ ,  $i, j = \overline{1, n}$  – неизвестные нелинейные функции, всюду (глобально) ограниченные по  $\mathbf{q}$ ,  $t$ , и в дальнейшем сосредоточим внимание на построении адаптивных управлений  $u_{ai}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$ .

В условиях, когда механические трансмиссии и протяженные конструкции звеньев степеней подвижности многостепенного электромеханического объекта подвержены упругим деформациям, математическое описание жесткого объекта (1) или (2), (3) должно быть дополнено дифференциальными уравнениями, описывающими многорезонансные упругие деформации (колебания) степеней подвижности объекта.

Следуя [3], будем рассматривать многорезонансные упругие подобъекты, отнесенные к каждой  $i$ -й степени подвижности, в виде неразветвленных цепных моделей, составленных из сосредоточенных инерционных масс (или моментов инерции)  $m_{ik}$  и невесомых упругих связей, характеризуемых коэффициентами упругости  $p_{ik}$ , где  $i$ , по-прежнему, номер  $i$ -й степени подвижности, а  $k = \overline{1, n_{yi} - 1}$ , где  $n_{yi} - 1$  – число упругих связей (число резонансов) в  $i$ -й степени подвижности, соединяющих в цепную модель  $n_{yi}$  сосредоточенных масс  $m_{ik}$ ,  $k = \overline{1, n_{yi}}$ , где  $n_{yi}$  – число сосредоточенных масс, участвующих в общем колебательном движении  $i$ -й упругой многомассовой цепи, причем первая масса цепи  $m_{i1}$  связана с ротором  $i$ -го исполнительного электропривода, а последняя масса цепи  $m_{in_{yi}}$  относится к  $i$ -й степени подвижности «жесткого скелета». В качестве переменных состояния, характеризующих динамику многомассовых упругих цепных подобъектов степеней подвижности многостепенного электромеханического объекта, введем

$$\omega_{yi} = \dot{q}_{yi}, \text{ или } \omega_{yik} = \dot{q}_{yik}, k = \overline{1, n_{yi}}; i = \overline{1, n}, \quad (5)$$

где  $\mathbf{n}_i$  – мерный вектор скоростей  $\omega_{yik}$  перемещений  $q_{yik}$  масс  $m_{ik}$ , соединенных упругими связями  $p_{ik}$ , и введем

$$\mathbf{m}_{yi}, m_{yik} = p_{ik}(q_{yik} - q_{yik+1}), k = \overline{1, n_{yi} - 1}; \quad (6)$$

$$i = \overline{1, n}; m_{yi0} = m_{yin_{yi}} = 0,$$

где  $\mathbf{n}_{yi} - 1$  – мерный вектор восстанавливающих (упругих) сил (или упругих моментов) (не путать обозначения точечных масс  $m_{ik}$  с обозначениями упругих моментов  $m_{yik}$ ).

Тогда дифференциальные уравнения движения неразветвленного многомассового упругого подобъекта, отнесенного к  $i$ -й степени подвижности упруго-жесткого электромеханического объекта, будут следующими:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\omega}_{yi1} &= \ddot{q}_{yi1} = \frac{1}{m_{i1}} [-m_{yi1} + b_i u_i(t)]; \\ \dot{\omega}_{yik} &= \ddot{q}_{yik} = \frac{1}{m_{ik}} (m_{yik-1} - m_{yik}); \\ k &= 2, \dots, n_{yi}; i = 1, \dots, n; \\ \dot{m}_{yik} &= p_{ik} (\omega_{yik} - \omega_{yik+1}); \\ k &= 1, \dots, n_{yi} - 1; i = 1, \dots, n \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

и будут иметь общий порядок, отнесенный к  $i$ -й степени подвижности, равный  $2n_{yi} - 1$ .

Отметим, что группа уравнений для упругих моментов в (7) получена дифференцированием по времени линейных форм вида (6) от обобщенных координат. Отметим также, что, учитывая наличие редукторов, все расчетные массы и моменты инерции  $m_{ik}$  цепных моделей приведены к одному какому-либо движению (первой  $m_{i1}$  или последней  $m_{in_{yi}}$  массы).

Представление уравнений, описывающих упругие колебания, в виде (7) удобно для учета зазоров в упругих связях, являющихся типичными нелинейностями упругих электромеханических объектов.

Будем полагать, что в общем случае все массы  $m_{ik}$  разделены зазорами  $2\delta_{ik}$ , описываемыми, как правило, идеализациями в виде переключающих функций нелинейных упругих сил (моментов):

$$f_{yik} = \begin{cases} m_{yik} - p_{ik}\delta_{ik}, & \text{если } m_{yik} \geq p_{ik}\delta_{ik}; \\ 0, & \text{если } |m_{yik}| < p_{ik}\delta_{ik}; \\ m_{yik} + p_{ik}\delta_{ik}, & \text{если } m_{yik} \leq -p_{ik}\delta_{ik}; \end{cases}$$

$$m_{yik} = p_{ik}(q_{yik} - q_{yik+1}); \quad k = \overline{1, n_{yi}-1}; \quad i = \overline{1, n}. \quad (8)$$

Подставляя в первую группу уравнений для скоростей в (7) вместо переменных  $m_{yik-1}, m_{yik}$  переключающие функции  $f_{yik-1}, f_{yik}$ , получим математическую модель (7), (8) цепного многомассового упругого подбъекта с учетом зазоров.

Отметим, что управления  $u_i = u_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_{yi}, \dot{\mathbf{q}}_{yi}, I_{яi}, t)$ ,  $i = \overline{1, n}$ , должны быть перенесены из уравнений (2), (3) на входы упругих подбъектов, так как они формируют электромагнитные моменты исполнительных электроприводов, роторы которых присоединены к первым массам (моментам инерции)  $m_{i1}$  упругих цепных подбъектов или сами являются ими, а «входными воздействиями» «жесткого скелета», описываемого уравнениями (2), (3), становятся упругие силы (моменты)  $m_{in_{yi}}, i = \overline{1, n}$ .

Завершая построение математической модели упруго-жесткого многостепенного электромеханического объекта, составим дифференциальные уравнения для электромагнитных моментов электроприводов. Стандартное построение штатных (первичных) систем автоматического управления движением  $i$ -й степени подвижности механического объекта с исполнительным электроприводом постоянного или переменного тока реализуется, как правило, в рамках широко распространенного в технике метода подчиненного управления, а построение более сложных систем управления осуществляется с учетом системы подчиненного управления как неотъемлемой части объекта управления.

Системы подчиненного управления электромагнитными моментами  $M_{яi}$  электроприводов постоянного тока с постоянным возбуждением построим как трехконтурные при наличии датчиков тока (ДТ)  $I_{яi}$ , скорости (ДС)  $\omega_{yi1}$  и положения (ДП)  $q_{yi1}$  первой массы  $m_{i1}$ , а также уравнения  $i$ -й подчиненной системы управления имеют следующий вид:

$$\dot{M}_{яi} = L_{яi}^{-1} [k_{mi}(k_{yi}u_T - k_{ei}\omega_{yi1}) - R_{яi}M_{яi}];$$

$$u_T = \beta_{Ti}(u_{Ci} - k_{Ti}k_{mi}^{-1}M_{яi});$$

$$u_{Ci} = \beta_{Ci}(u_{Pi} - k_{Ci}\omega_{yi1}); \quad (9)$$

$$u_{Pi} = \beta_{Pi}(u_i - k_{Pi}q_{yi1});$$

$$u_i = u_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_{yi}, \dot{\mathbf{q}}_{yi}, I_{яi}, t).$$

Здесь  $M_{яi}, I_{яi}$  – электромагнитный момент и ток якоря электропривода;  $L_{яi}, R_{яi}$  – индуктивность и активное сопротивление якорной цепи;  $k_{ei}, k_{mi}$  – конструктивные коэффициенты;  $k_{yi}$  – коэффициент передачи усилителя мощности источника питания;  $k_{Ti}, k_{Ci}, k_{Pi}$  – коэффициенты передачи датчиков обратных связей по переменным  $I_{яi}, \omega_{yi1}, q_{yi1}; u_T, u_{Ci}, u_{Pi}$  – выходные напряжения контурных регуляторов тока (РТ), скорости (РС) и положения (РП);  $\beta_{Ti}, \beta_{Ci}, \beta_{Pi}$  – передаточные функции контурных регуляторов;  $u_i$  – составное управление, являющееся функцией переменных состояния упруго-жесткого объекта или их оценок, вырабатываемых наблюдателями.

Объединяя дифференциальные системы уравнений (2), (3), описывающие динамику взаимосвязанного многостепенного нелинейного электромеханического объекта как жесткого целого, с дифференциальными системами уравнений (7), (8), и учитывая обозначения (5), (6), описывающие упругие деформации механизмов, отнесенных к степеням подвижности электромеханического объекта, и дифференциальными уравнениями электроприводов степеней подвижности с подчиненным управлением (9), получим расчетную математическую модель упруго-жесткого многостепенного электромеханического объекта (2)–(9).

Составное управление  $u_i, i = \overline{1, n}$ , упруго-жестким объектом есть функция переменных состояния упругих подбъектов  $\mathbf{q}_{yi}, \dot{\mathbf{q}}_{yi}, i = \overline{1, n}$ , и «жесткого скелета»  $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$ , тока электропривода  $I_{яi}$  и времени  $t$  и имеет следующий вид:

$$u_i = u_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{q}_{yi}, \dot{\mathbf{q}}_{yi}, I_{яi}, t) = u_{0yi}(t) + u_{н.yi}(\mathbf{q}_{yi}, \dot{\mathbf{q}}_{yi}, I_{яi}) + u_{a.yi}(\mathbf{q}_{yi}, \dot{\mathbf{q}}_{yi}) + u_{a.лок.i}(\mathbf{q}_i, \dot{\mathbf{q}}_i) + u_{a.разв.i}(\mathbf{q}_j, \dot{\mathbf{q}}_j), \quad i = \overline{1, n},$$

где  $u_{0yi}$  – программные управления упругими подбъектами степеней подвижности;  $u_{н.yi}$  – неадаптивные (подчиненные и модальные) управления упругими подбъектами;  $u_{a.yi}$  – адаптивные

управления упругими подобъектами;  $u_{a,локi}$  – локальные и  $u_{a,разв.i}$  – развязывающие адаптивные управления «жестким скелетом», построением которых займемся далее.

**2. Адаптивные системы управления упругими подобъектами упруго-жесткого многостепенного нелинейного электромеханического объекта.** Построим адаптивную систему управления  $i$ -м многомассовым упругим подобъектом, описываемым уравнениями (5)–(9) [3]. Введем для нелинейного и нестационарного, в общем случае, упругого подобъекта некоторое линеаризованное в каком-либо рабочем режиме описание с постоянными усредненными параметрами вида

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_{yi} \\ \dot{\mathbf{m}}_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & M_{0i} \\ \Omega_{0i} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_{yi} \\ \mathbf{m}_{yi} \end{bmatrix} + \mathbf{b}_{0i}(u_{0yi} + u_{н,yi} + u_{a,yi}), \quad (10)$$

где  $u_{0yi}$  – программное,  $u_{н,yi}$  – неадаптивное и  $u_{a,yi}$  – адаптивное управления  $i$ -м упругим подобъектом;  $\Omega_{0i}, M_{0i}$  – постоянные матрицы, имеющие те же структуры, что и уравнения (7) (те же ненулевые элементы);  $\mathbf{b}_{0i} = \left( \frac{1}{m_{0i1}}, 0, \dots, 0 \right)^T$ ,  $m_{0i1}$  – усредненное значение

неизвестной первой массы  $m_{i1}(t)$ , жестко соединенной с исполнительным электроприводом. Заявленная система адаптивного управления будет содержать следующие блоки-подсистемы.

*Эталонная модель* полного порядка  $m$  имеет следующий вид:

$$\dot{\mathbf{x}}_{Mi} = \mathbf{A}_{Mi}\mathbf{x}_{Mi} + \mathbf{b}_{Mi}u_{0yi}(t); \quad \mathbf{A}_{Mi} = \begin{pmatrix} 0 & \mathbf{E}_{m_i-1} \\ -\mathbf{a}_i^T \end{pmatrix}, \quad (11)$$

где  $m_i = 2n_{yi} - 1$  – размерность упругого объекта;  $u_{0yi}$  – программное управление  $i$ -м упругим подобъектом;  $\mathbf{E}_{m_i-1}$  –  $(m_i - 1)$ -мерная единичная матрица;  $\mathbf{0}$  –  $(m_i - 1)$ -мерный нулевой вектор;  $\mathbf{a}_i^T = (\alpha_{0i}, \alpha_{1i}, \dots, \alpha_{m_i-1})$  –  $m_i$ -мерная строка вещественных коэффициентов Гурвица характеристического многочлена матрицы  $\mathbf{A}_{Mi}$  с любым наперед заданным распределением корней;  $\mathbf{b}_{Mi} = (0, 0, \dots, 0, k_{Mi})^T$ ;  $k_{Mi}$  – коэффициент, определяемый из требуемого установившегося режима управления «жестким» движением центра масс  $i$ -го упругого объекта.

*Идентификатор состояния (наблюдатель)*  $i$ -го упругого объекта (5)–(9), построенный по параметрам усредненного объекта (10) и восстанавливающий оценки скоростей и упругих сил (моментов) по измерению любой обобщенной скорости  $\omega_{yik}$  упругого подобъекта, имеет следующий вид:

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{\omega}}_{yi} \\ \dot{\hat{\mathbf{m}}}_{yi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & M_{0i} \\ \Omega_{0i} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{\omega}_{yi} \\ \hat{\mathbf{m}}_{yi} \end{bmatrix} + \mathbf{b}_{0i}u_{yi}(t) + \mathbf{I}_i \mathbf{c}_i^T (\omega_{yi} - \hat{\omega}_{yi}); \quad u_{yi} = u_{0yi} + u_{н,yi} + u_{a,yi}, \quad (12)$$

где  $(\hat{\omega}_{yi}^T, \hat{\mathbf{m}}_{yi}^T)^T$  – вектор оценок переменных состояния  $i$ -го упругого подобъекта;  $\mathbf{I}_i = (l_1, l_2, \dots, l_{m_i})^T$  – вектор коэффициентов усиления обратных связей наблюдателя (12) по ошибке наблюдения  $\omega_{yik} - \hat{\omega}_{yik}$  измеренной переменной  $\omega_{yik}$ ;  $\mathbf{c}_i^T = (0, 0, \dots, k_{c_{i,k}}, 0, \dots, 0)$  – матрица-строка уравнения измерения,  $k_{c_{i,k}}$  – коэффициент передачи датчика скорости  $\omega_{yik}$ ;  $u_{н,yi}$  – неадаптивное линейное (в данном случае модальное) управление.

*Неадаптивная (линейная) составляющая управления*  $i$ -м упругим подобъектом имеет следующий вид:

$$u_{н,yi}(t) = \mathbf{k}_i^T (\hat{\omega}_{yi}^T, \hat{\mathbf{m}}_{yi}^T)^T = \mathbf{k}_{1i}^T \hat{\omega} + \mathbf{k}_{2i}^T \hat{\mathbf{m}}_{yi}, \quad (13)$$

где все линейные обратные связи (кроме, может быть, измеренной скорости  $\omega_{yik}$ ) формируются из оценок, вырабатываемых наблюдателем;  $\mathbf{k}_i^T = (k_{1i}, k_{2i}, \dots, k_{m_i}) = (\mathbf{k}_{1i}^T, \mathbf{k}_{2i}^T)$  – вектор-строка коэффициентов усиления линейного (модального) управления  $i$ -м упругим подобъектом.

*Адаптивная составляющая управления*  $u_{a,yi}$  имеет следующий вид:

$$u_{a,yi}(t) = \mathbf{k}_{A_i}^T(t) \text{diag} \{ f_{p_{ik}} \}_1^{m_i} (\hat{\omega}_{yi}^T, \hat{\mathbf{m}}_{yi}^T)^T + k_{bi}(t) [u_{0yi}(t) + u_{н,yi}(t)], \quad (14)$$

где  $\mathbf{k}_{A_i}^T(t) = \left[ \mathbf{k}_{A_{1i}}^T(t), \mathbf{k}_{A_{2i}}^T(t) \right]$  –  $m_i$ -мерная строка настраиваемых коэффициентов,  $m_i = 2n_{yi} - 1$ ;  $k_{bi}(t)$  – настраиваемый входной коэффициент адаптивного закона (14)  $\text{diag} \{ f_{p_{ik}} \}_1^{m_i} = \text{diag} \{ 1, 1, \dots, 1, \hat{m}_{yi1}^p, \hat{m}_{yi2}^p, \dots, \hat{m}_{yim_i}^p \}$ ,  $m_i = 2n_{yi} - 1$  – мер-

ная диагональная матрица, составленная из мажорирующих функций роста вида

$$\begin{aligned} f_{p_{ik}}(\widehat{\omega}_{yik}) &= 1, \quad k = \overline{1, \mathbf{n}_{yi}}; \\ f_{p_{ik}}(\widehat{m}_{yik}) &= \widehat{m}_{yik}^p; \quad k = \overline{1, \mathbf{n}_{yi} - 1}, \end{aligned} \quad (15)$$

$p = 0, 1, 3, \dots$ ; – целые показатели степеней;  $i = \overline{1, n}$ .

Уравнения параметрической настройки адаптивного закона (14) выражаются дифференциальными уравнениями вида

$$\begin{aligned} \dot{\mathbf{k}}_{A1i}^T(t) &= -\text{diag}\{\gamma_{ik}\}_1^{\mathbf{n}_{yi}} \delta(\widehat{\mathbf{e}}_{yi}) \widehat{\omega}_{yi} - \\ &\quad - \text{diag}\{\beta_{ik}\}_1^{\mathbf{n}_{yi}} \mathbf{k}_{A1i}^T(t); \\ \dot{\mathbf{k}}_{A2i}^T(t) &= -\text{diag}\{\gamma_{jk}\}_1^{\mathbf{n}_{yi}-1} \text{diag}\{f_{p_{ik}}\}_1^{\mathbf{n}_{yi}-1} \delta(\widehat{\mathbf{e}}_{yi}) \widehat{\omega}_{yi} - \\ &\quad - \text{diag}\{\beta_{jk}\}_1^{\mathbf{n}_{yi}-1} \mathbf{k}_{A2i}^T(t); \\ \dot{k}_{b_i}(t) &= -\gamma_{ib_i} \delta(\widehat{\mathbf{e}}_{yi}) ((u_{0\ yi}(t) + u_{n,yi}(t)) - \beta_{b_i} k_{b_i}(t)), \end{aligned} \quad (16)$$

где  $\gamma_{ik}$ ,  $\beta_{ik}$ ,  $k = \overline{1, \mathbf{n}_{yi}}$ ;  $\gamma_{jk}$ ,  $\beta_{jk}$ ,  $k = \overline{1, \mathbf{n}_{yi} - 1}$ ;  $\gamma_{b_i}$ ,  $\beta_{b_i}$  – положительные коэффициенты усиления алгоритмов настройки; цепи настраиваемых коэффициентов  $\mathbf{k}_{A1i}^T(t)$ ,  $k_{b_i}(t)$  несут в основном функции подавления параметрических рассогласований, а цепи настраиваемых коэффициентов  $\mathbf{k}_{A2i}^T(t)$  с мажорирующими функциями рассчитаны на подавление существенного влияния нелинейностей (зазоров) в упругих связях;

$$\delta(\widehat{\mathbf{e}}_{yi}) = k_{Mi} \mathbf{p}_i^T \widehat{\mathbf{e}}_{yi}; \quad \widehat{\mathbf{e}}_{yi} = (\widehat{\omega}_{yi}^T, \widehat{\mathbf{m}}_{yi}^T)^T - \mathbf{x}_{Mi}, \quad (17)$$

где  $\widehat{\mathbf{e}}_{yi} - m_i$  – мерный вектор ошибок – разностей между переменными состояния наблюдаемого и эталонного движений;  $\mathbf{p}_i^T$  –  $m$ -мерная строка положительных весовых коэффициентов линейной комбинации ошибок (17);  $k_{Mi}$  – последний элемент столбца  $\mathbf{b}_{Mi}$  эталонной модели (11).

*Замечание.* Отметим, что построенная адаптивная система управления  $i$ -м упругим подобъектом, отнесенным к  $i$ -й степени подвижности упруго-жесткого многостепенного электромеханического объекта,  $i = \overline{1, n}$ , зависит только от оценок переменных состояния  $\widehat{\omega}_{yi}$ ,  $\widehat{\mathbf{m}}_{yi}$  и не зависит от переменных состояния  $\mathbf{q}_i$ ,  $\dot{\mathbf{q}}_i$  «жесткого скелета» упруго-жесткого объекта, т. е. представ-

ляет локальную адаптивную систему управления  $i$ -м упругим подобъектом и не несет функции развязывания динамик «жесткого скелета» и упругого подобъекта.

Иначе говоря, построение адаптивных систем управления упругими подобъектами не рассчитано на целенаправленное подавление возмущающего влияния динамики «жесткого скелета» на динамическое поведение упругих подобъектов.

**3. Взаимосвязанная адаптивная система управления «жестким скелетом» многостепенного электромеханического объекта.** Полагая, что построенные в предыдущем пункте локальные адаптивные системы управления выполняют задачи слежения за эталонными моделями (11) упругих подобъектов с одновременным эффективным подавлением в них многочастотных упругих колебаний, будем считать, что тем самым движение упруго-жесткого объекта приближается к движению его «жесткого скелета». Поэтому при построении адаптивной системы «жестким скелетом» будем исходить, следуя [3], из системы дифференциальных уравнений вида (2), (3), описывающих движение многостепенного электромеханического объекта как целого.

Взаимосвязанная адаптивная система управления «жестким скелетом» многостепенного электромеханического объекта в общем случае должна состоять из совокупности локальных и развязывающих адаптивных систем управления.

Локальные адаптивные системы управления степенями подвижности «жесткого скелета» электромеханического объекта (2), (3) состоят из следующих совокупностей:

а) локальных эталонных моделей

$$\begin{aligned} \ddot{x}_{Mi} &= -a_{Mi} x_{Mi} - r_{Mi} \dot{x}_{Mi} + b_{Mi} u_{0\ i}(t); \\ a_{Mi}, r_{Mi}, b_{Mi} &> 0 \text{ (const)}, \quad i = \overline{1, n}; \end{aligned} \quad (18)$$

б) локальных адаптивных законов

$$\begin{aligned} u_{\text{а.лок.}i}(q_i, \dot{q}_i) &= k_{i1}(t) q_i + k_{i2}(t) \dot{q}_i + \\ &\quad + k_{i3}(t) \dot{q}_i^2 + k_{i4}(t) u_{0\ i}(t), \quad i = \overline{1, n}; \end{aligned} \quad (19)$$

в) алгоритмов настройки параметров локальных адаптивных законов

$$\left. \begin{aligned} \dot{k}_{i1}(t) &= -\gamma_{i1} d_i q_i - \alpha_{i1} k_{i1}(t); \\ \dot{k}_{i2}(t) &= -\gamma_{i2} d_i \dot{q}_i - \alpha_{i2} k_{i2}(t); \\ \dot{k}_{i3}(t) &= -\gamma_{i3} d_i \dot{q}_i^2 - \alpha_{i3} k_{i3}(t); \\ \dot{k}_{i4}(t) &= -\gamma_{i4} d_i u_{0\ i}(t) - \alpha_{i4} k_{i4}(t); \\ d_i &= b_{Mi} [p_{i1}(q_i - q_{Mi}) + p_{i2}(\dot{q}_i - \dot{q}_{Mi})], \quad i = \overline{1, n}, \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

где  $\gamma_{i*}, \alpha_{i*}$  ( $* = \overline{1, 4}$ );  $d_i, p_{i1}, p_{i2}$ ;  $i = \overline{1, n}$  – постоянные строго положительные коэффициенты усиления алгоритмов настройки (20).

*Замечания:* 1. Следует отличать эталонные модели (18) от эталонных моделей (11), хотя программные управления у них общие:

$$u_{0i}(t) = u_{0yi}(t), i = \overline{1, n}. \quad (21)$$

2. Локальные адаптивные законы (19) и алгоритмы настройки параметров (20) построены по методу мажорирующих функций и в качестве мажорирующих функций выбраны известные функции роста  $\dot{q}_i$ , содержащиеся в уравнениях собственной динамики степеней подвижности, получаемых приравниванием к нулю функций перекрестных связей  $f_{ij} = 0, S_{ij} = 0$  в уравнениях (2), (3) (в члене  $a_{i3}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_i^2$ ).

*Развязывающие адаптивные системы управления степенями подвижности «жесткого скелета» многостепенного электромеханического объекта* (2), (3) состоят из совокупностей эталонных моделей (18) и развязывающих адаптивных законов

$$u_{\text{а.разв.}i}(q_j, \dot{q}_j) = \sum_{j=1, j \neq i}^n \left[ k_{ij5}(t)q_j + k_{ij6}(t)\dot{q}_j + k_{ij7}(t)\dot{q}_j^2 + k_{ij8}(t)\dot{q}_i\dot{q}_j + k_{ij9}(t)u_j^0(t) \right]; i, j = \overline{1, n}, \quad (22)$$

с алгоритмами настройки параметров, выражаемыми уравнениями

$$\left. \begin{aligned} \dot{k}_{ij5}(t) &= -\gamma_{ij5}d_i q_j - \alpha_{ij5}k_{ij5}(t); \\ \dot{k}_{ij6}(t) &= -\gamma_{ij6}d_i \dot{q}_j - \alpha_{ij6}k_{ij6}(t); \\ \dot{k}_{ij7}(t) &= -\gamma_{ij7}d_i \dot{q}_j^2 - \alpha_{ij7}k_{ij7}(t); \\ \dot{k}_{ij8}(t) &= -\gamma_{ij8}d_i \dot{q}_i \dot{q}_j - \alpha_{ij8}k_{ij8}(t); \\ \dot{k}_{ij9}(t) &= -\gamma_{ij9}d_i u_j^0(t) - \alpha_{ij9}k_{ij9}(t), i, j = \overline{1, n}, \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

где  $d_i$  – как в выражении (20);  $\gamma_{ij*}, \alpha_{ij*}$ ,  $* = \overline{5, 9}$  – строго положительные постоянные коэффициенты усиления алгоритмов,  $i, j = \overline{1, n}$ .

*Замечание.* Развязывающие адаптивные законы (22) и алгоритмы настройки их параметров (23) построены по методу мажорирующих функций. В качестве мажорирующих функций приняты из-

вестные функции роста  $\dot{q}_i, \dot{q}_j$ , содержащихся в функциях перекрестных нелинейных связей (в членах  $f_{ij3}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_i\dot{q}_j$  и  $f_{ij4}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_j^2$  уравнений (2), (3)).

*Взаимосвязанная адаптивная система управления «жестким скелетом» многостепенного электромеханического объекта* (2), (3) состоит из совокупностей эталонных моделей (18) и объединения совокупностей локальных (19) и развязывающих (22) адаптивных законов с алгоритмами настройки (20) и (23).

**4. Исследование построенных адаптивных систем управления упруго-жестким многостепенным электромеханическим объектом.** При построении адаптивных систем управления многомассовыми упругими подобъектами и взаимосвязанной адаптивной системы управления «жестким скелетом» упруго-жесткого многостепенного электромеханического объекта были приняты некоторые допущения, касающиеся как построения математической модели упруго-жесткого объекта, так и построения адаптивных систем управления, базирующегося на принятых математических моделях.

Исследования построенных адаптивных систем проводились на примере трехстепенного манипулятора робота широко распространенной типовой конструкции, прототипом которого послужил робот «MOTOMAN (RRR)», внешний вид которого показан на рис. 1.

Расчетная схема манипуляционного робота показана на рис. 2, на котором обозначены центры масс  $m_i$  и длины плеч  $l_i$  звеньев манипулятора, указаны начала и направления отсчета принятых обобщенных координат  $q_i, i = 1, 2, 3$ .

Следует подчеркнуть, что компьютерные исследования проводились на исходной нелинейной математической модели (1) «жесткого скелета» манипулятора, составленной согласно расчетной схеме, показанной на рис. 2. Матрицы  $M(\mathbf{q}), V(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  и  $G(\mathbf{q})$  имеют следующее строение:

$$\begin{aligned} M &= \begin{bmatrix} M_{11} & 0 & 0 \\ 0 & M_{22} & M_{23} \\ 0 & M_{32} & M_{33} \end{bmatrix}; \\ V &= \begin{bmatrix} V_{11} & V_{12} & V_{13} \\ V_{21} & V_{22} & V_{23} \\ V_{31} & V_{32} & 0 \end{bmatrix}; \\ G &= [0, G_2, G_3]^T, \end{aligned} \quad (24)$$



Рис. 1

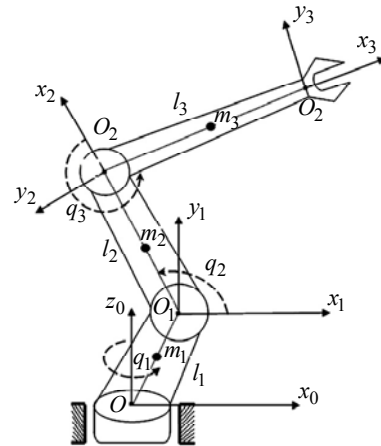


Рис. 2

где

$$\begin{aligned}
 M_{11} &= \left(\frac{m_1}{12} + \frac{m_2}{4} + \frac{m_3}{4}\right) l_1^2 + \left(\frac{m_2}{6} + \frac{m_3}{2}\right) l_2^2 + \frac{m_3}{6} l_3^2 + \\
 &+ \left(\frac{m_2}{6} + \frac{m_3}{2}\right) l_2^2 \cos(2q_2) + \frac{m_3}{6} l_3^2 \cos(2q_2 + 2q_3) + \\
 &+ \frac{m_3}{2} l_1 l_3 \cos(q_2 + q_3) + \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) l_1 l_2 \cos q_2 + \\
 &+ \frac{m_3}{2} l_2 l_3 \cos q_3 + \frac{m_3}{2} l_2 l_3 \cos(2q_2 + q_3); \\
 M_{22} &= \left(\frac{m_2}{3} + m_3\right) l_2^2 + \frac{m_3}{3} l_3^2 + m_3 l_2 l_3 \cos q_3; \\
 M_{23} = M_{32} &= \frac{m_3}{3} l_3^2 + \frac{m_3}{2} l_2 l_3 \cos q_3; \quad M_{33} = \frac{m_3}{3} l_3^2; \\
 V_{11} &= -\left[\frac{m_3}{6} l_3^2 \sin(2q_2 + 2q_3) + \left(\frac{m_2}{6} + \frac{m_3}{2}\right) l_2^2 \times \right. \\
 &\times \sin 2q_2 + \frac{m_3}{4} l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) + \left.\left(\frac{m_2}{4} + \frac{m_3}{2}\right) l_1 l_2 \times \right. \\
 &\times \sin q_2 + \left.\frac{m_3}{2} l_2 l_3 \sin(2q_2 + q_3)\right] \dot{q}_2 - \\
 &- \left\{\frac{m_3}{12} l_3 [2l_3 \sin(2q_2 + 2q_3) + \right. \\
 &+ 3l_1 \sin(q_2 + q_3) + 3l_2 \sin q_3 + 3l_2 \sin(2q_2 + q_3)] \dot{q}_3; \\
 V_{12} = V_{21} &= -\left[\frac{m_3}{6} l_3^2 \sin(2q_2 + 2q_3) + \left(\frac{m_2}{6} + \frac{m_3}{2}\right) l_2^2 \times \right. \\
 &\times \sin 2q_2 + \frac{m_3}{4} l_1 l_3 \sin(q_2 + q_3) + \left.\left(\frac{m_2}{4} + \frac{m_3}{2}\right) l_1 l_2 \times \right. \\
 &\times \sin q_2 + \left.\frac{m_3}{2} l_2 l_3 \sin(2q_2 + q_3)\right] \dot{q}_1;
 \end{aligned}
 \tag{25}$$

$$\begin{aligned}
 V_{13} = V_{31} &= -\left\{\frac{m_3}{12} l_3 [2l_3 \sin(2q_2 + 2q_3) + \right. \\
 &+ 3l_1 \sin(q_2 + q_3) + 3l_2 \sin q_3 + 3l_2 \sin(2q_2 + q_3)] \dot{q}_1; \\
 V_{22} &= -\left(\frac{m_3}{2} l_2 l_3 \sin q_3\right) \dot{q}_3; \\
 V_{23} &= -\left(\frac{m_3}{2} l_2 l_3 \sin q_3\right) (\dot{q}_2 + \dot{q}_3); \\
 V_{32} &= \left(\frac{m_3}{2} l_2 l_3 \sin q_3\right) \dot{q}_2; \\
 G_2 &= \left(\frac{m_2}{2} + m_3\right) l_2 g \cos q_2 + \frac{m_3}{2} l_3 g \cos(q_2 + q_3); \\
 G_3 &= \frac{m_3}{2} l_3 g \cos(q_2 + q_3),
 \end{aligned}
 \tag{26}$$

где  $g$  – ускорение свободного падения.

В качестве упругих подобъектов были приняты двухмассовые (однорезонансные) упругие подобъекты с номинальными параметрами  $J_{y11}$ ,  $J_{y12}$ ,  $p_{y11}$ , подобранными так, чтобы реализовывались парциальные частоты  $f_1 = 9$  Гц,  $f_2 = 6.5$  Гц,  $f_3 = 17.3$  Гц, которые можно определить экспериментально, измеряя частотные характеристики электроприводов манипулятора; вводились зазоры  $\delta_i$ ,  $i = 1, 2, 3$ ; значения  $R_{яi}$ ,  $L_{яi}$  подставлялись такие, чтобы значения постоянных времен  $\tau_i = L_{яi}, R_{яi}^{-1}$  изменялись в диапазоне 0.005...0.1 с.

Числовые параметры сочленений (рис. 2):  $l_1 = 0.4$  м;  $l_2 = 1$  м;  $l_3 = 1.2$  м;  $m_1 = 50$  кг;  $m_2 = 30$  кг; масса звена со схватом изменялась в диапазоне  $m_3 = 35 \dots 100$  кг.



Адаптивные системы управления упругими подобъектами и «жестким скелетом» строились согласно методикам, изложенным в п. 2 (11)–(17) и п. 3 (18)–(23). Значения коэффициентов усиления алгоритмов настройки (16), (20), (23) обосновывались моделированием.

**Результаты компьютерных исследований и выводы.** В процессе компьютерного исследования обосновывалась правомерность и эффективность следующих предположений и допущений, принятых при построении полученных в пп. 2, 3 адаптивных систем управления динамикой упруго-жесткого многостепенного электромеханического объекта:

1. Построенные адаптивные системы управления подобъектами (11)–(17) и «жестким скелетом» (18)–(23) функционируют каждая в рамках своей группы переменных состояния или их оценок, т. е., по существу, являются локальными каждая для своего подобъекта управления, упругого или жесткого, тогда как динамика самих подобъектов управления – связанная, т. е. зависит от перекрестных переменных состояния. При этом можно теоретически показать экспоненциальную диссипативность каждой из построенных адаптивных систем, привлекая функции Ляпунова, удовлетворяющие оценкам, характерным для квадратичных форм, и соответствующую теорему Н. Н. Красовского [4]. Однако в обеспечении экспоненциальной диссипативности адаптивных процессов в условиях сильного динамического взаимовлияния движений упругого и жесткого подобъектов можно было убедиться только экспериментально с помощью проведенного компьютерного моделирования.

2. Применение стационарных наблюдателей с целью получения оценок неизмеряемых (виртуальных) переменных состояния упругих подобъектов для реализации построенных адаптивных систем управления, несмотря на их заманчивую простоту, может оказаться несостоятельным в силу нелинейности и изменения параметров упругих подобъектов, хотя требования управляемости и наблюдаемости цепных моделей упругих подобъектов выполняются и сохраняются в довольно широком диапазоне, а работоспособность стационарных наблюдателей в этом рабочем диапазоне установлена только проведенным компьютерным моделированием.

3. Важен вопрос правомерности пренебрежения электромагнитной инерцией процессов в исполнительных электроприводах при построении адаптивных систем управления упругими объектами, так как пренебрежение электромагнитной динамикой (9) даже в случае электропривода постоянного тока (принимая  $L_{я} = 0$ ) размерность упругих подобъек-

тов снижается на единицу. Поэтому такое упрощение может быть обосновано только компьютерным исследованием уязвимости адаптивных систем управления упругими подобъектами к сингулярным возмущениям.

4. При построении взаимосвязанной адаптивной системы управления «жестким скелетом» многостепенного нелинейного электромеханического объекта, состоящей в общем случае из локальных  $u_{a,лок.i}$  вида (18)–(20) и развязывающих  $u_{a,разв.i}$  вида (22)–(23) адаптивных систем управления,  $i = \overline{1, n}$ , можно исключить локальные адаптивные управления  $u_{a,лок.i}$  в предположении, что задачу локального адаптивного управления степенями подвижности эффективно решают адаптивные системы управления упругими подобъектами  $u_{a,yi}$ ,  $i = \overline{1, n}$ , вида (11)–(17). Правомерность такого предположения также может быть обоснована только компьютерным моделированием.

5. И, наконец, одну из важных проблем беспорядочных (аналитических) адаптивных систем представляет обеспечение высокого качества сходимости (малой колебательности и высокого быстродействия) процессов адаптивного управления, зависящих от многих факторов, таких как выбор целевого функционала, закона основного контура, значений коэффициентов усиления алгоритмов настройки, решений уравнения Ляпунова и др. Методы исследования устойчивости по Ляпунову адаптивных систем дают не более чем достаточные условия экспоненциальной сходимости, позволяющие оценить быстродействие, но не указывают пути целенаправленного формирования заданного качества, и хотя здесь уже появляются некоторые предложения, тем не менее основным инструментом отладки адаптивных систем остается компьютерное моделирование.

*Замечание.* Важно отметить, что кропотливая работа по составлению точной нелинейной математической модели «жесткого скелета» упруго-жесткого многостепенного нелинейного электромеханического объекта, потребовавшая вывода громоздких формульных выражений (25), (26) для нелинейных коэффициентов – функций функциональных матриц  $M(\mathbf{q})$ ,  $V(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$  и  $G(\mathbf{q})$  уравнений Лагранжа вида (24) для случая трехстепенного манипулятора, была востребована только на этапе проведения компьютерных исследований, и в то же время, что следует подчеркнуть, точная нелинейная модель (1), (24)–(26) не привлекалась к построению адаптивных систем управления (18)–(23).

В заключение отметим, что в рамках проведенных авторами компьютерных исследований на примере трехстепенного манипуляционного ро-

бота все обсуждаемые в статье вопросы получили положительное разрешение.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андриевский Б. Р., Стоцкий А. А., Фрадков А. Л. Алгоритмы скоростного градиента в задачах управления и адаптации. Обзор // Автоматика и телемеханика. 1988. № 12. С. 3–39.

2. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990. 296 с.

3. Путов В. В. Развитие беспоисковых адаптивных методов и их приложения к задачам управления сложными механическими объектами // Авиакосмическое приборостроение. 2003. № 5. С. 3–8.

4. Красовский Н. Н. Некоторые задачи теории устойчивости движения. М.: Физматгиз, 1959. 212 с.

V. V. Putov, V. N. Sheludko, T. L. Rusyaeva, T. T. Nguyen  
Saint Petersburg Electrotechnical University «LETI»

### ADAPTIVE CONTROL OF AN ELASTICALLY RIGID MULTI-DEGREE NONLINEAR ELECTROMECHANICAL OBJECT

*Deals with the construction and research of an adaptive control system for an elastically rigid multi-degree nonlinear electromechanical object. The mathematical model of the object is represented by two related systems of Lagrangian equations, one of which describes the multimass elastic subobjects in the form of chain models of material bodies connected by weightless elastic bonds, and the other is the «rigid skeleton» of a multi-degree electromechanical object obtained by replacing undeformed elastic bonds by rigid bonds. An adaptive control system is constructed in the form of two subsystems that provide suppression of elastic deformations. Trajectory control of the «rigid skeleton» of a multi-stage electromechanical object under conditions of its functional-parametric uncertainty and incomplete measurements of the efficiency study of the constructed adaptive system using the example of a non-linear computer model of a three-stage robot manipulator of a typical design with two-mass elastic servo motors of the degrees of mobility are manipulated.*

**Elastic-rigid multi-degree non-linear electromechanical object, parametric and function-parametric uncertainty, adaptive control system, state observer, suppression of elastic deformations, executive electric drives of the mobility degrees of the object, control of the interconnected motion of a rigid object, computer research, three-stage manipulation robot**

УДК 621.3.078.3

Б. В. Бруслиновский, Н. А. Доброскок, В. С. Лавриновский  
Филиал ЦНИИ СЭТ ФГУП «Крыловский государственный научный центр»

А. В. Морозов, О. В. Мохова, Р. И. Галиуллин  
Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)

### Исследование влияния явления гистерезиса на качество работы генератора постоянного тока в импульсном режиме

*Рассматривается вопрос повышения качества работы импульсного источника тока большой мощности на основе электромеханических преобразователей энергии, представляющего собой трехмашинный агрегат из механически связанных разгонного асинхронного двигателя, приводного синхронного двигателя и генератора постоянного тока с независимым возбуждением. На выходе генератора формируется импульсная последовательность тока из разнополярных трапецидальных импульсов с заданными значениями параметров. Адаптирована математическая модель гистерезиса, предложенная Такаксом, для случая генератора постоянного тока с независимым возбуждением. В качестве системы управления используется релейная система управления, реализованная с помощью автономного инвертора напряжения. С целью улучшения точности воспроизведения заданного сигнала в систему управления генератором введены корректирующие устройства, а в его конструкцию добавлена дополнительная обмотка возбуждения.*

**Импульсный источник тока, генератор постоянного тока с независимым возбуждением, гистерезис**

Исследуются процессы, происходящие в импульсном источнике питания (ИИП) большой

мощности на основе электромеханических преобразователей энергии. В частности, рассматри-