

УДК 681.5

В. В. Путов, В. В. Лебедев, А. В. Путов

Адаптивные системы управления многостепенными жесткими нелинейными механическими объектами, построенные по их упрощенным моделям с мажорирующими функциями

Рассматриваются вопросы построения адаптивных систем управления с параметрической настройкой для многостепенных взаимосвязанных нелинейных механических объектов, описываемых в форме дифференциальных уравнений Лагранжа, разрешенных относительно обобщенных ускорений. При синтезе адаптивных систем допускается параметрическая и функциональная неопределенность математических моделей объектов, а в адаптивных законах управления и алгоритмах настройки их параметров неизвестные нелинейные функции бесконечного роста в описании объектов заменяются мажорирующими степенными функциями.

Многостепенные нелинейные механические объекты, дифференциальные уравнения Лагранжа, локальные, развязывающие и взаимосвязанные адаптивные системы, диссипативность решений адаптивных систем, метод мажорирующих функций в построении беспоисковых адаптивных систем

В настоящее время задачи управления многостепенными нелинейными механическими объектами с априорно неопределенным и (или) сложным описанием, быстро и в широких пределах изменяющимися внутренними параметрами и внешними условиями функционирования зачастую решаются в рамках беспоисковых адаптивных подходов, принципиально рассчитанных на функционирование систем в реальном времени. Одним из обобщающих методов построения беспоисковых адаптивных систем является метод скоростного градиента, предложенный и развитый в работах [1], [2]. Известны также адаптивные алгоритмы глобально устойчивого управления механическими объектами, описываемыми дифференциальными уравнениями в форме Лагранжа [3]. Однако принципиальным препятствием к широкому практическому применению упомянутых адаптивных алгоритмов является то, что они рассчитаны на знание нелинейных математических моделей объектов с точностью до постоянных параметров, но построить точную модель достаточно сложного нелинейного объекта с точностью до конечного числа неизвестных постоянных параметров, как правило, невозможно, да и такая постановка вступает в противоречие с самим адаптивным подходом, в принципе допускающим больший уровень неопределенности уравнений

объекта, чем традиционно рассматриваемая в задачах адаптивного управления параметрическая неопределенность. Одним из методов построения адаптивных систем, допускающим неопределенность не только параметров, но и вида нелинейных функций, описывающих объект, т. е. обладающих функционально-параметрической неопределенностью, является метод мажорирующих функций, разработанный в [4] и кратко изложенный, в частности, в [5], на связь которого с методом скоростного градиента указано в [6].

Рассмотрим применение метода мажорирующих функций к синтезу адаптивных систем управления многостепенными нелинейными механическими объектами, допускающими функционально-параметрическую неопределенность описывающих их дифференциальных уравнений.

Обобщенная структура многостепенного нелинейного механического объекта. Постановка задач управления.

Обобщенное математическое описание объектов. Построим обобщенное математическое описание выделенного класса многостепенных нелинейных механических объектов в виде дифференциальных уравнений Лагранжа, разрешенных относительно вторых производных обобщенных координат [7] с точностью до неизвестных глобально ограниченных нелинейных нестационарных

нарных функций, выписывая точно только функции, имеющие порядок роста относительно переменных состояния объекта, равный или выше первого [5]:

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

где

$$\left. \begin{aligned} a_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) &= a_{i1}(\mathbf{q}, t)q_i + a_{i2}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_i + a_{i3}(\mathbf{q}, t)\dot{q}_i^2; \\ f_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) &= f_{ij}^1(\mathbf{q}, t)q_j + f_{ij}^2(\mathbf{q}, t)\dot{q}_j + \\ &\quad + f_{ij}^3(\mathbf{q}, t)\dot{q}_i\dot{q}_j + f_{ij}^4(\mathbf{q}, t)\dot{q}_j^2; \\ s_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) &= b_{ij}(\mathbf{q}, t)u_j(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t); \quad i, j = \overline{1, m} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

– всюду (глобально) ограниченные скалярные нелинейные функции, непрерывно дифференцируемые по $\mathbf{q}$ и кусочно непрерывные по времени t ;

$$u_i(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t) = u_i^H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + u_i^A(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}) + u_i^0(t),$$

где u_i^H – неадаптивное (линейное) с постоянными настройками, $u_i^0(t)$ – программное, u_i^A – искомого адаптивного управления (моменты) в i -й степени подвижности; $\mathbf{q} = [q_1 \dots q_m]^T$; $\dot{\mathbf{q}} = [\dot{q}_1 \dots \dot{q}_m]^T$ – m -мерные векторы обобщенных (лагранжевых) координат и скоростей, $i, j = \overline{1, m}$, m – число степеней подвижности.

Дифференциальная система (1), (2) исчерпывает математическое описание динамики класса взаимосвязанных нелинейных механических 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 связями по обобщенным координатам и скоростям $\dot{q}_j, q_j$ (функции $f_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$);

в) перекрестными связями по управлениям $u_j(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$ (функции $s_{ij}(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}, t)$). Указанные глобально ограниченные функции являются композициями тригонометрических функций переменных состояния с постоянными или изменяющимися во времени коэффициентами, и считается, что они явно не выписаны, т. е. неизвестны, а яв-

но выписанные нелинейности имеют рост не выше второй степени, сами являются линейными или степенными функциями переменных состояния, причем степенные функции содержат только попарные произведения $\dot{q}_i, \dot{q}_j$ и вторые степени $\dot{q}_i^2$ обобщенных скоростей и не содержат попарных произведений $q_i, \dot{q}_j$ обобщенных координат и скоростей или вторых степеней $\dot{q}_i^2$ обобщенных скоростей.

Можно отметить, что обобщенное математическое описание (1), (2) охватывает чрезвычайно широкий класс объектов, таких, как роботы различного назначения; бортовые и наземные антенные установки и гироскопические системы; зенитно-ракетные и артиллерийские стационарные и подвижные комплексы, многофункциональные комплексы для наземных испытаний силовых агрегатов и систем управления авиационной и космической техники, а также многие другие группы объектов. Необходимо отметить, что эти уравнения охватывают также нелинейные нестационарные модели жестких летательных аппаратов, рассматриваемых как твердые тела (самолеты) или системы связанных твердых тел (вертолеты); правые данных уравнений, учитывая аэродинамические силы и моменты, могут содержать, в частности, степенные нелинейности относительно обобщенных координат и скоростей, в том числе и выше второй степени.

В дальнейшем будем полагать, что неадаптивные управления $u_i^H(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$; $i = \overline{1, m}$, решают задачи формирования локальной динамики следящих систем, характеризующихся некоторыми постоянными усредненными параметрами и рассчитаны известными методами модального, линейного по эталонной модели, подчиненного и т. п. управлений, и далее сосредоточим внимание на построении адаптивных управлений $u_i^A(\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}})$.

Постановка задач управления. Будем рассматривать следующие задачи построения адаптивного управления многостепенными нелинейными механическими объектами:

а) задачей *локального* адаптивного управления (или адаптации собственной динамики) будем называть задачу динамического поддержания желаемых показателей локальной динамики степени подвижности в условиях нелинейных и не-

стационарных параметрических рассогласований собственной динамики, активно подавляемой локальным адаптивным управлением за счет адаптивной настройки параметров закона управления, и координатных возмущений от перекрестных связей с другими степенями подвижности, вытесняемых (пассивно подавляемых) локальным адаптивным управлением за счет повышения быстродействия (степени устойчивости) локальной динамики и создания нечувствительности к внешним возмущениям. Локальное адаптивное управление является функцией только переменных состояния, характеризующих собственную динамику степени подвижности, а именно

$$u_{\text{лок } i}^a = u_{\text{лок } i}^a(q_i, \dot{q}_i); \quad (3)$$

б) задачей адаптивного развязывания (или *развязывающего* адаптивного управления) будем называть задачу активного подавления (парирования) координатных возмущений от нелинейных нестационарных перекрестных связей с другими степенями подвижности за счет адаптивной настройки параметров закона адаптивного развязывания. Развязывающее адаптивное управление для i -й степени подвижности является функцией переменных состояния других j -х, $j \neq i$, степеней подвижности, оказывающих на нее влияние, а именно

$$u_{\text{разв } i}^a = u_{\text{разв } i}^a(q_j, \dot{q}_j); \quad i, j = \overline{1, m}; i \neq j; \quad (4)$$

в) задачей *взаимосвязанного* (глобального) адаптивного управления будем называть объединение задач локального и развязывающего адаптивных управлений. Взаимосвязанное адаптивное управление имеет вид

$$u_i^a = u_{\text{лок } i}^a(q_i, \dot{q}_i) + u_{\text{разв } i}^a(q_j, \dot{q}_j); \quad i, j = \overline{1, m}. \quad (5)$$

Выбор класса мажорирующих функций роста. Учитывая строение взаимосвязанного механического объекта (1), (2), видим, что максимальное значение числа p – степени роста – в разложениях правых частей (1), (2) не превышает $p=1$ по всем аргументам $\mathbf{q}, \dot{\mathbf{q}}$, так как правые части объекта (1), (2) содержат степенные функции переменных состояния не выше второй степени. Таким образом, для объекта (1), (2) функции роста $f_{pr}^\theta(x_r)$ в обозначениях, принятых в [5], имеют следующий вид:

$$f_{0r}^\theta = 1; \quad f_{ir}^\theta = x_r; \quad r = \overline{1, 2m}, \quad (6)$$

где $x_r = q_i$ при $r = i, r = \overline{1, m}$; $x_r = \dot{q}_i$, при $r = m + i, r = \overline{m+1, 2m}$.

Эти функции удовлетворяют условию ранжирования по первому индексу [5]. В качестве мажорирующих функций $f_{pr}^\theta(x_r)$, имеющих сравнимый с ними или перекрывающий их рост, могут быть выбраны также степенные функции переменных состояния не ниже первой степени, удовлетворяющие условию ранжирования и имеющие вид

$$f_{0r} = 1; \quad f_{pr} = x_r^p; \quad p \geq 1; \quad r = \overline{1, 2m}. \quad (7)$$

Очевидно, что функции (6) удовлетворяют и условию мажорирования функций (6). Коэффициенты b_i, b_{ij} объекта (1), (2) – глобально ограниченные функции и удовлетворяют требованию глобальной ограниченности, наложенному на функциональную матрицу входов нелинейного объекта [5].

Адаптивные структуры прямого управления взаимосвязанными нелинейными механическими объектами с алгоритмами параметрической настройки и мажорирующими функциями. Построение адаптивных структур с мажорирующими функциями приведем, следуя общим предписаниям, изложенным в [4], [5], т. е. сначала построим полные структуры с мажорирующими функциями всех степеней, а затем – их упрощенные варианты, содержащие мажорирующие функции только старших степеней, и эти построения проведем для локальной, развязывающей и объединенной (взаимосвязанной) задач адаптивного управления.

Полная локальная адаптивная структура управления механическим объектом. Задача локального адаптивного управления классом нелинейных механических объектов (1), (2) решается в рамках структуры, состоящей:

а) из совокупности локальных эталонных моделей

$$\ddot{x}_{Mi} = -a_{Mi}x_{Mi} - r_{Mi}\dot{x}_{Mi} + b_{Mi}u_i^0(t);$$

$$a_{Mi}, r_{Mi}, b_{Mi} > 0 \text{ (const)}; \quad (8)$$

б) совокупности локальных адаптивных законов

$$u_{\text{лок } i}^a(q_i, \dot{q}_i) = k_{i1}(t)q_i + k_{i2}(t)\dot{q}_i + k_{i3}(t)q_i^2 + k_{i4}(t)u_i^0(t); \quad (9)$$

в) совокупности алгоритмов настройки параметров

$$\left. \begin{aligned} \dot{k}_{i1}(t) &= -\gamma_{i1}d_i q_i - \alpha_{i1}k_{i1}(t); \\ \dot{k}_{i2}(t) &= -\gamma_{i2}d_i \dot{q}_i - \alpha_{i2}k_{i2}(t); \\ \dot{k}_{i3}(t) &= -\gamma_{i3}d_i \dot{q}_i^2 - \alpha_{i3}k_{i3}(t); \\ \dot{k}_{i4}(t) &= -\gamma_{i4}d_i u^0(t) - \alpha_{i4}k_{i4}(t); \\ d_i &= b_{Mi}[p_{i1}(q_i - q_{Mi}) + p_{i2}(\dot{q}_i - \dot{q}_{Mi})]; i = \overline{1, m}. \end{aligned} \right\} (10)$$

Здесь $\gamma_{i*}, d_{i*}, \gamma_{i*}, * = \overline{1, 4}; p_{i1}, p_{i2}; i = \overline{1, m}$ – постоянные строго положительные коэффициенты усиления алгоритмов настройки, выбираемые проектировщиком из условия требуемой эффективности локального адаптивного управления.

Упрощенные локальные адаптивные структуры управления механическим объектом. Предлагаются два вида упрощенных структур:

а) структура с мажорирующими функциями только старшей степени, наибольшей и одинаковой по каждой переменной состояния, которая содержит совокупность эталонных моделей (8) и совокупность законов управления вида (ср. с выражением (9))

$$u_{\text{лок } i}^a(q_i, \dot{q}_i) = k_{i3}(t)\dot{q}_i^2 + k_{i5}(t)q_i^2 + k_{i4}(t)u_i^0(t); i = \overline{1, m}, (11)$$

с алгоритмами настройки (ср. с выражением (10))

$$\left. \begin{aligned} \dot{k}_{i3}(t) &= -\gamma_{i3}d_i \dot{q}_i^2 - \alpha_{i3}k_{i3}(t); \\ \dot{k}_{i4}(t) &= -\gamma_{i4}d_i u^0(t) - \alpha_{i4}k_{i4}(t); \\ \dot{k}_{i5}(t) &= -\gamma_{i5}d_i \dot{q}_i^2 - \alpha_{i5}k_{i5}(t), \end{aligned} \right\} (12)$$

где d_i как в выражении (10); $\gamma_{i5}, \alpha_{i5} > 5 (\text{const})$;

б) структура с мажорирующими функциями только старших степеней, своей и наибольшей по каждой из переменных, которая содержит совокупность эталонных моделей (8) и законов управления вида (ср. с выражениями (9), (11))

$$u_{\text{лок } i}^a(q_i, \dot{q}_i) = k_{i1}(t)q_i + k_{i3}(t)q_i^2 + k_{i4}(t)u_i^0(t); i = \overline{1, m}, (13)$$

с алгоритмами настройки параметров $k_{i1}(t), k_{i3}(t), k_{i4}(t)$ по дифференциальным уравнениям (10).

Полная развязывающая адаптивная структура управления взаимосвязанным механическим объектом. Задача адаптивного развязывания для класса взаимосвязанных нелинейных механических объектов (1), (2) решается в рамках структу-

ры, состоящей из совокупности эталонных моделей (8) и совокупности развязывающих адаптивных законов управления вида

$$u_{\text{разв } i}^a(q_i, \dot{q}_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^m [k_{ij6}(t)q_j + k_{ij7}(t)\dot{q}_j + k_{ij8}(t)\dot{q}_j^2 + k_{ij9}(t)\dot{q}_i\dot{q}_j + k_{ij10}(t)u_j^0(t)]; i, j = \overline{1, m}, (14)$$

с алгоритмами настройки параметров, выражаемыми дифференциальными уравнениями вида

$$\left. \begin{aligned} \dot{k}_{ij6}(t) &= -\gamma_{ij6}d_i q_j - \alpha_{ij6}k_{ij6}(t); \\ \dot{k}_{ij7}(t) &= -\gamma_{ij7}d_i \dot{q}_j - \alpha_{ij7}k_{ij7}(t); \\ \dot{k}_{ij8}(t) &= -\gamma_{ij8}d_i \dot{q}_j^2 - \alpha_{ij8}k_{ij8}(t); \\ \dot{k}_{ij9}(t) &= -\gamma_{ij9}d_i \dot{q}_i\dot{q}_j - \alpha_{ij9}k_{ij9}(t); \\ \dot{k}_{ij10}(t) &= -\gamma_{ij10}d_i u_j^0(t) - \alpha_{ij10}k_{ij10}(t); i, j = \overline{1, m}, \end{aligned} \right\} (15)$$

где d_i как в выражении (10); $\gamma_{ij*}, \alpha_{ij*}; * = \overline{6, 10}$ – строго положительные постоянные коэффициенты усиления алгоритмов настройки, выбираемые проектировщиком из условия требуемой эффективности процессов адаптивного развязывания.

Упрощенные развязывающие адаптивные структуры управления механическим объектом. Здесь также рассмотрим два вида упрощенных структур:

а) структура с мажорирующими функциями одной старшей степени по всем переменным содержит совокупность эталонных моделей (8) и совокупность законов развязывающего адаптивного управления вида (ср. с выражением (14))

$$u_{\text{разв } i}^a(q_i, \dot{q}_i) = \sum_{j=1, j \neq i}^m [k_{ij8}(t)\dot{q}_j^2 + k_{ij11}(t)q_j^2 + k_{ij10}(t)u_j^0(t)]; i, j = \overline{1, m}; (16)$$

с алгоритмами настройки параметров

$$\dot{k}_{ij11}(t) = -\gamma_{ij11}d_i q_j^2 - \alpha_{ij11}k_{ij11}(t); i, j = \overline{1, m}, (17)$$

где d_i как в выражении (10); $\gamma_{ij11}, \alpha_{ij11} > 0 (\text{const})$; $k_{ij8}(t), k_{ij10}(t)$ настраиваются по дифференциальным уравнениям (15);

б) структура с мажорирующими функциями старших степеней, своей по каждой переменной состояния, совпадает с выражениями (16), (17), так как объект содержит функции роста одинаковых степеней по каждой переменной.

Полная структура взаимосвязанного (глобального) адаптивного управления многостепенным механическим объектом. В соответствии с формулировкой задачи взаимосвязанного адаптивного управления механическим объектом полная структура взаимосвязанного адаптивного управления содержит совокупность эталонных моделей (8) и совокупность объединенных в соответствии с выражениями (5), (9), (14) законов адаптивного управления в виде

$$u_i^a(q_i, \dot{q}_i) = k_{i1}(t)q_i + k_{i2}(t)\dot{q}_i + k_{i3}(t)q_i^2 + k_{i4}(t)u_i^0(t) + \sum_{j=1, j \neq i}^m [k_{ij6}(t)q_j + k_{ij7}(t)\dot{q}_j + k_{ij8}(t)\dot{q}_j^2 + k_{ij9}(t)\dot{q}_i\dot{q}_j + k_{ij10}(t)u_j^0(t)] \quad (18)$$

с алгоритмами настройки, выражаемыми дифференциальными уравнениями (10), (15).

Упрощенные структуры взаимосвязанного (глобального) адаптивного управления механическим объектом:

а) упрощенные структуры при использовании мажорирующих функций одинаковой степени роста по каждой переменной получают объединением совокупностей эталонных моделей (8), упрощенных локальных (11) и упрощенных развязывающих (16) адаптивных законов с алгоритмами настройки (12), (17);

б) упрощенные структуры при использовании мажорирующих функций старших степеней, своей и наибольшей для каждой переменной состояния, получают объединением совокупности эталонных моделей (8), упрощенных локальных (13) и упрощенных развязывающих (16) адаптивных законов с алгоритмами настройки (10), (17).

На основании вышесказанного можно сделать некоторые выводы.

Разработаны адаптивные структуры управления классом многостепенных нелинейных механических объектов, которые опираются на общие структуры прямых адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами с эталонными моделями и алгоритмами настройки с мажорирующими функциями, построение которых излагается в [4], [5].

Общая задача построения взаимосвязанного адаптивного управления классом многостепенных нелинейных механических объектов декомпозирована на две частные задачи: построения

локального и развязывающего адаптивного управления, что повлекло за собой соответствующую декомпозицию законов адаптивного управления на локальные и развязывающие. Это вызвано тем, что глобальные структуры, решающие задачу взаимосвязанного управления и являющиеся объединением локальной и развязывающей структур, довольно громоздки, и целесообразность их применения в полном виде может быть подвергнута сомнению в следующих случаях:

а) если собственная нелинейная нестационарная динамика объекта (1), (2) характеризуется сильной неустойчивостью, в то время как взаимосвязи слабо сказываются, тогда целесообразно выделить задачу локального адаптивного управления и ограничиться ее решением;

б) если собственная динамика объекта стабильна, а сильными являются нелинейные нестационарные взаимосвязи, тогда целесообразно выделить задачу развязывающего адаптивного управления и ограничиться ее решением;

в) если оба фактора – нелинейная и нестационарная собственная динамика и сильные взаимосвязи – вносят значительный вклад в неустойчивость, но при постановке задач управления решающим является требование обеспечения устойчивости системы во всех режимах работы и исполнительные приводы обладают значительными запасами ресурсов, тогда целесообразно решение этой задачи опять же в рамках локального адаптивного управления как наиболее просто реализуемого;

г) взаимосвязанное адаптивное управление должно применяться в тех случаях, когда оба фактора – неустойчивость собственной динамики и влияние взаимосвязей – существенны и предъявляются высокие требования к динамической точности отработки объектом множества пространственных траекторий в его рабочем пространстве и во всех режимах работы.

В заключение подчеркнем, что для конкретных применений адаптивных систем управления многостепенными нелинейными механическими объектами, построенных на базе мажорирующих функций по их обобщенному математическому описанию (1), (2), нет необходимости выяснять, как правило, довольно громоздкое строение глобально ограниченных скалярных нелинейных функций (2). Для построения предлагаемых адап-

тивных систем достаточно ввести только требуемое количество обобщенных координат q_i и скоростей $\dot{q}_i, i = 1, \dots, m$, где m – количество степеней подвижности объекта, и записать адаптивный закон управления и алгоритмы настройки его параметров в соответствии с уравнениями (8)–(18) и выбранным видом полной или упрощенной локальной, развязывающей или взаимосвязанной адаптивной структуры. При этом полученные конкретные адаптивные структуры уже не подлежат

дальнейшему упрощению в рамках алгоритмов с мажорирующими функциями независимо от конкретного строения нелинейных дифференциальных уравнений математического описания тех или иных конкретных механических объектов.

Результаты работы получены в рамках выполнения проекта по Федеральной целевой программе «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Фрадков А. Л. Адаптивное управление в сложных системах: беспоисковые методы. М.: Наука, 1990.
2. Стоцкий А. А., Фрадков А. Л. Алгоритмы скоростного градиента в задачах адаптивного управления механическими системами // Техническая кибернетика. 1993. № 2. С. 58–66.
3. Slotine J. J. E., Li W. On the Adaptive Control of Robot Manipulators // The Intern. J. of Robotics Research. 1987. Vol. 6, № 3. С. 49–58.
4. Путов В. В. Методы построения адаптивных систем управления нелинейными нестационарными динамическими объектами с функционально-параметрической неопределенностью: Дис. ... д-ра техн. наук / СПбГЭТУ "ЛЭТИ". СПб., 1993.
5. Путов В. В., Шелудько В. Н. Новый подход в построении беспоисковых адаптивных систем управления нелинейными динамическими объектами с неопределенным описанием // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». Вып. 4. С. 37–50.
6. Обобщение метода мажорирующих функций в задачах адаптивного управления нелинейными динамическими объектами / В. В. Путов, И. Г. Полушин, В. В. Лебедев, А. В. Путов // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2013. Вып. 8. С. 85–94.
7. Лурье А. И. Аналитическая механика. М.: Физматгиз, 1961.

V. V. Putov, V. V. Lebedev, A. V. Putov

ADAPTIVE CONTROL SYSTEMS MULTISTAGE NONLINEAR RIGID MECHANICAL OBJECTS, BUILT ON THEIR SIMPLIFIED MODELS WITH MAJORIZING FUNCTIONS

The problems of adaptive control systems with parameter setting for the multistage interconnected nonlinear mechanical objects described in the form of differential equations of Lagrange solved for the generalized accelerations. In the synthesis of adaptive systems allowed parametric and functional uncertainty in mathematical models of objects, and adaptive control laws and algorithms for adjusting parameters unknown nonlinear function of infinite growth in the description of objects are replaced by power functions majorizing.

Multistage nonlinear mechanical objects, the differential equations of Lagrange, local, decoupling and related adaptive systems, adaptive systems are dissipative solutions, the method of majorizing functions in building adaptive systems bespoiskovyh