

На правах рукописи

ФИЛИМОНОВ
Никита Александрович

**ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ ПОДХОД
И ПРИНЦИП МНОГОРЕЖИМНОСТИ
В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЕНИЯ ЛАГРАНЖЕВЫМИ
ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

05.13.01 - *Системный анализ, управление
и обработка информации*

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2006

Работа выполнена на кафедре «Специальная робототехника и мехатроника» Московского Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор
МЕДВЕДЕВ Владимир Степанович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор
ЗЕНКЕВИЧ Станислав Леонидович

кандидат технических наук, доцент
ТЯГУНОВ Олег Аркадьевич

Ведущая организация:

НИИ Механики МГУ им. М.В.Ломоносова

Защита состоится « » _____ 2006 г. в « » час. « » мин.
на заседании диссертационного совета Д 212.141.02 Московского
Государственного Технического Университета имени Н.Э.Баумана по
адресу:

105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
Государственного Технического Университета имени Н.Э. Баумана.

Автореферат разослан « » _____ 2006 г.

Отзывы, заверенные печатью организации, просим направлять по
адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, МГТУ им. Н.Э. Бау-
мана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.02

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

В.А. ИВАНОВ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Широкий класс управляемых механических и электромеханических систем описывается математическими моделями лагранжевой механики, причем их движение имеет сложную нелинейную структуру с большим числом степеней свободы. Поэтому при исследовании данных систем закономерно обращение к методам и математическому аппарату аналитической механики, причем другие подходы оказываются бесперспективными. Именно такая линия исследований положена в основу диссертации и определяет ее **актуальность**.

Тема диссертации - энергетический подход и принцип многорежимности в задачах управления лагранжевыми динамическими системами.

Энергетический подход является теоретической базой робастного управления лагранжевыми системами, объединяющей формализм лагранжевой механики, энергетические соображения и второй метода Ляпунова.

Принцип многорежимного регулирования заключается в разбиении процесса регулирования на ряд режимов и декомпозиции задачи регулирования на более простые подзадачи, решаемые для выделенных режимов. Принцип направлен на повышение эффективности и функциональной гибкости автоматических систем. Он позволяет объединять энергетический подход с другими методами теории автоматического регулирования.

Выбор темы органично связан с исследованиями в области мехатроники, проводимыми на кафедре «Специальная робототехника и мехатроника» МГТУ им. Н.Э. Баумана под руководством профессора В.С. Медведева.

Цель работы и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка теоретических основ энергетического подхода и развитие концепции многорежимного регулирования для класса лагранжевых динамических систем. В прикладной части работы рассматриваются задачи управления многозвенным манипулятором и мостовым краном.

Методы исследования базируются на принципах и формализме лагранжевой механики, положениях теории автоматического управления, теории устойчивости движений, аппарате теории аналитических функций, теории матриц, теоретическом базисе робототехники и нейруправления.

Научная новизна. В диссертации получен ряд оригинальных результатов, имеющих научную ценность для теории управления лагранжевыми системами. К ним следует отнести теоретические основы энергетического подхода, концепцию многорежимного регулирования, результаты исследований задачи стабилизации лагранжевых систем по части переменных и процессов релейного сепаратного регулирования в лагранжевых системах.

Практическая ценность. Результаты теоретических исследований, разработанные методы и алгоритмы управления могут найти применение в робототехнике, авиа-ракетно-космической технике, системах автоматизации подъемно-транспортных машин, автоматике магистрального транспорта. Практическая полезность результатов подтверждается актами о внедрении в Проектно-изыскательном институте транспортного строительства ОАО "Проекттрансстрой" и ООО «Центр исследований экстремальных ситуаций». Результаты диссертации используются в учебном процессе МГУПИ и РГСУ при подготовке инженеров соответственно по специальностям 210100 – «Управление и информатика в технических системах» и 220200 – «Автоматизированные системы обработки информации и управления».

В диссертации автор защищает:

- 1) идею и теоретическое обоснование энергетического подхода, способы построения на его основе робастных законов управления лагранжевыми системами;
- 2) стратегию многорежимного регулирования для лагранжевых систем, расширяющую область применения энергетического подхода;
- 3) модальный анализ процессов стабилизации лагранжевых систем по части переменных, реализуемых на основе энергетического подхода;
- 4) метод робастного сепаратного регулирования локальных подсистем лагранжевой системы по схеме линейного быстрогодействия;
- 5) стратегии управления мостовым краном, обеспечивающие гашение колебаний перемещаемого груза.

Достоверность полученных результатов. Обеспечивается применением аналитических методов исследования и компьютерным моделированием тестовых примеров.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертации докладывались на конференциях и семинарах в России и дальнем зарубежье: Междунар. конф. «Информационные технологии в естественных науках, экономике и образовании» (Саратов, 2002); Пятый и Шестой междунар. симп. «Интеллектуальные системы» (Москва, 2002, 2004); XXXIV и XXXV науч.-техн. конф. студ., асп. и мол. ученых. (Санкт-Петербург, 2002); XII междунар. науч.-тех. семинар «Современные технологии в задачах управления, автоматики и обработки информации» (Москва, 2003); Первая Всерос. науч.-тех. конф. с междунар. участием «Мехатроника, автоматизация, управление» (Москва, 2004); 15th Internat. Conf. «Systems for Automation of Engineering and Research (SAER)» (Bulgaria, Sofia, 2002).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы (131 наименований). Объем работы - 177 страниц, включая 27 рисунков.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение

Обосновывается выбор темы диссертационного исследования, состояние ее разработки и анализируются относящиеся к ней литературные источники.

По мнению А.А. Красовского «кризис современной теории управления в последней четверти XX века очевиден». В свете этого к числу важнейших направлений современной прикладной теории управления он относит физическую теорию управления, опирающуюся на физические законы.

В диссертации изучаются процессы управления лагранжевыми динамическими системами. Понятно, что физическая теория управления для данного класса систем должна строиться на законах лагранжевой механики. Такой подход, в основу которого положены энергетические соображения, развивается в диссертации и назван автором *энергетическим*.

Кратко суть энергетического подхода можно выразить как *управление энергетической структурой лагранжевой системы*. Конструирование регулирующих обратных связей предлагается подчинять физическим соображениям: их действие должно быть *эквивалентно* перестройке потенциальной энергии замкнутой системы и ее диссипативных свойств, обеспечивающей достижение цели регулирования.

Обсуждаемая в диссертации концепция многорежимного регулирования позволяет расширить область применения энергетического подхода.

Глава 1. Энергетический подход в задачах управления лагранжевыми системами

Изучаемые управляемые динамические системы описываются уравнениями Лагранжа второго рода

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}} - \frac{\partial L}{\partial q} = Q. \quad (1)$$

Здесь L - функция Лагранжа; q - вектор обобщенных координат, а Q - вектор приложенных к системе обобщенные силы:

$$q = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad Q = \text{col}(Q_1, Q_2, \dots, Q_n);$$

n - число степеней свободы системы.

Считаем систему склерономной. Тогда функция Лагранжа имеет вид

$$L(q, \dot{q}) = K(q, \dot{q}) - U_0(q), \quad (2)$$

где K - кинетическая энергия системы, а U_0 - ее потенциальная энергия.

Введем полную энергию системы:

$$E = K(q, \dot{q}) + U_0(q),$$

K - ее кинетическая энергия, а U_0 - потенциальная энергия.

Кинетическая энергия является квадратичной формой:

$$K = \frac{1}{2} \langle \dot{q}, \mathcal{A}(q) \dot{q} \rangle. \quad (3)$$

Здесь *матрица инерции* системы $\mathcal{A}(q) = [a_{ij}(q)]_{n \times n}$ - симметрическая положительно определенная функциональная матрица размера $n \times n$. Скобки $\langle , \rangle$ обозначают скалярное произведение векторов.

Потенциальная энергия порождает вектор обобщенных сил

$$\mathcal{Q}^{(0)} = - \frac{\partial}{\partial q} U_0(q).$$

Полагаем, что функция $\mathcal{Q}^{(0)}(q)$ непрерывна, ограничена и удовлетворяет условию Липшица ($\forall q, q', q''$):

$$\|\mathcal{Q}^{(0)}(q)\| \leq G_1, \quad \|\mathcal{Q}^{(0)}(q') - \mathcal{Q}^{(0)}(q'')\| \leq G_2 \|q' - q''\|.$$

Здесь G_1, G_2 - некоторые положительные константы. В этих выражениях и далее подразумеваются евклидовы векторные и матричные нормы.

Исследование вопросов устойчивости в главе основывается на следующей теореме.

Теорема 1. Для полной производной полной энергии по времени справедливо равенство

$$\dot{E} = \langle \mathcal{Q}, \dot{q} \rangle. \blacksquare$$

Задача регулирования. Регулируется положение лагранжевой системы в конфигурационном пространстве, q^* - ее целевое положение. Обобщенные силы Q_i ($i = \overline{1, n}$) являются управляющими переменными.

Функциональная схема САР показана на рис. 1. Здесь $\Delta q = q - q^*$.

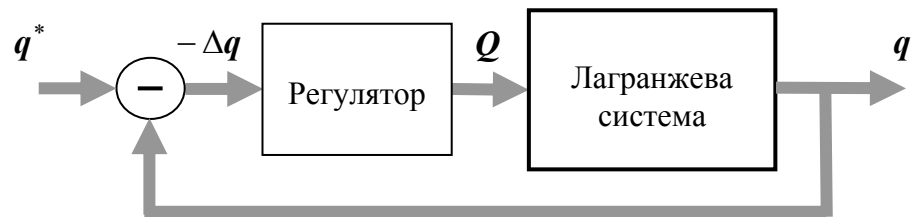


Рис. 1

Энергетический подход. Будем формировать вектор обобщенных сил в виде суммы двух составляющих

$$\mathcal{Q} = \mathcal{Q}^{(1)}(q) + \mathcal{Q}^{(2)}(\dot{q}), \quad (4)$$

т.е. первое слагаемое зависит лишь от обобщенных координат, а второе - от обобщенных скоростей. Считаем эти зависимости кусочно-непрерывными.

Допустим сила $\mathcal{Q}^{(1)}$ является потенциальной:

$$\mathcal{Q}^{(1)} = - \frac{\partial}{\partial q} U_1(q). \quad (5)$$

Включим потенциал U_1 в полную энергию системы:

$$E' = E + U_1.$$

Таким образом,

$$E' = K + U,$$

где U - обобщенный потенциал:

$$U = U_0 + U_1.$$

Справедливо соотношение

$$\dot{E}' = \langle \mathbf{Q}^{(2)}, \dot{\mathbf{q}} \rangle.$$

Пусть $\mathbf{Q}^{(2)}(0) = 0$. Положим, что суммарная мощность сил $Q_i^{(2)} (i = \overline{1, n})$ -

$$\mathcal{D}(\dot{\mathbf{q}}) = \langle \dot{\mathbf{q}}, \mathbf{Q}^{(2)}(\dot{\mathbf{q}}) \rangle \quad (6)$$

является отрицательно определенной функцией:

$$\mathcal{D}(\dot{\mathbf{q}}) < 0 \Leftrightarrow \dot{\mathbf{q}} \neq 0. \quad (7)$$

Но тогда $Q_i^{(2)}$ - диссипативные силы, и замкнутая система - диссипативная.

Сущность энергетического подхода заключается в способе конструирования управляющих обратных связей: оно формально подчиняется законам лагранжевой механики и реализует управление потенциальной и диссипативной структурой энергетических процессов в системе.

С этой целью управляющие обобщенные силы разбиваются на две составляющие: восстанавливающую $\mathbf{Q}^{(1)}(\mathbf{q})$ и диссипативную: $\mathbf{Q}^{(2)}(\dot{\mathbf{q}})$ (см. (4)). Первая формирует «потенциальную яму» (рис. 2) в конфигурационном пространстве лагранжевой системы над целевым положением равновесия $\mathbf{q} = \mathbf{q}^*$, принуждая систему двигаться к этому положению. Вторая рассеивает энергию системы, обеспечивая затухание переходных процессов. В итоге целенаправленное поведение замкнутой лагранжевой системы обусловлено комбинированным действием двух управляемых факторов: обобщенного потенциала $U(\mathbf{q})$ и мощности диссипативных сил $\mathcal{D}(\dot{\mathbf{q}})$.

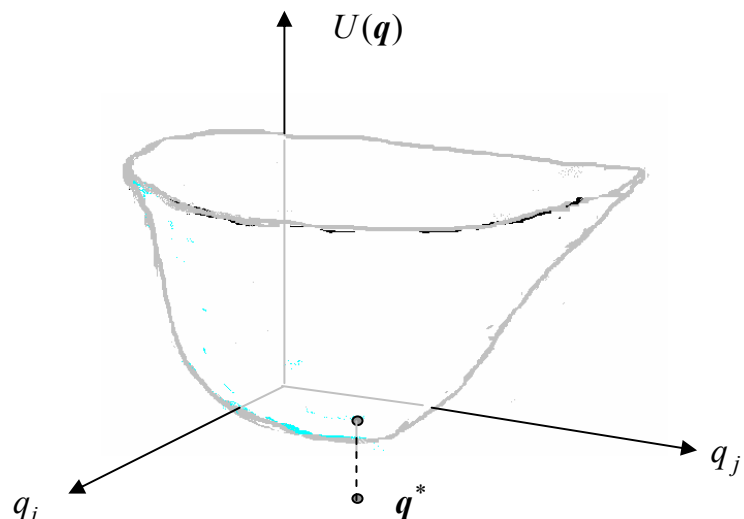


Рис. 2

При исследовании вопросов устойчивости в рамках энергетического подхода применяется второй метод Ляпунова, причем в качестве функции Ляпунова используется полная энергия замкнутой лагранжевой системы.

Далее $q = \bar{q}$ - *положение равновесия* замкнутой системы (1), (4).

Теорема 2. Допустим обобщенный потенциал $U(q)$ является унимодальной функцией и достигает минимума в точке $q = \bar{q}$, причем в этой точке она дифференцируема. Тогда система (1), (4), (5) имеет единственное положение равновесия $q = \bar{q}$. ■

Теоремы 3–6 обосновывают идею управления энергетическими характеристиками замкнутой лагранжевой системы: структурой обобщенного потенциала и диссипативными факторами.

Если сила $Q^{(1)}$ имеет линейную структуру:

$$Q^{(1)} = -C(q - q^*), \quad (8)$$

то она является потенциальной в случае, когда C - симметрическая $n \times n$ -матрица, причем порождающий ее потенциал равен

$$U_1 = \frac{1}{2} \langle (q - q^*), C(q - q^*) \rangle.$$

Теорема 3. Пусть C - обратимая матрица. Тогда замкнутая система имеет положение равновесия $\bar{q}$, причем оно удовлетворяет неравенству

$$\|\bar{q} - q^*\| \leq \varepsilon, \quad \varepsilon = \|C^{-1}\| G_1.$$

В случае

$$\|C^{-1}\| < 1/G_2 \quad (9)$$

это положение равновесия единственно. ■

Теорема 4. Пусть функция $U(q)$ удовлетворяет условиям теоремы 2, а функция (6) является отрицательно определенной. Тогда система (1), (4), (5) имеет единственное положение равновесия $q = \bar{q}$, являющееся точкой минимума потенциальной функции $U(q)$, причем оно асимптотически устойчиво в целом. ■

В частном случае зависимость $Q^{(2)}(\dot{q})$ может быть линейной:

$$Q^{(2)} = -D\dot{q}, \quad (10)$$

где D - квадратная вещественная матрица размера $n \times n$.

Теорема 5. Пусть функция $U(q)$ удовлетворяет условиям теоремы 2, а составляющая $Q^{(2)}$ обобщенной силы (4) имеет линейную структуру (10), причем матрица D является симметрической положительно определенной матрицей. Тогда система (1), (4), (5), (10), имеет единственное положение равновесия $\bar{q}$, являющееся точкой минимума потенциальной функции $U(q)$, и оно асимптотически устойчиво в целом. ■

Наконец, рассмотрим случай, когда обе составляющие обобщенной силы имеют линейную структуру: соответственно (8) и (10).

Теорема 6. Пусть C и D являются симметричными положительно определенными матрицами, причем матрица C удовлетворяет условию (9). Тогда положение равновесия системы $\bar{q}$ асимптотически устойчиво в целом. ■

Характер действия сил (8), (10) позволяет трактовать матрицы C и D как соответственно *матричный коэффициент жесткости* и *демпфирования*.

В рамках энергетического подхода устойчивость процессов регулирования обеспечивается вне зависимости от параметров управляемой системы. Следовательно, имеет место важное свойство *робастности регулирования*.

Многомерный ПД-регулятор. Описывается формулами (4), (8), (10):

$$Q = -C(q - q^*) - D\dot{q}. \quad (11)$$

В случае положительно определенных матриц C и D обеспечивает асимптотическую устойчивость в целом положению равновесия $\bar{q}$ в замкнутой САР. Согласно теореме 3 при большой жесткости обратной связи:

$$\|C^{-1}\| \ll 1/G_1,$$

статическая ошибка регулирования $\varepsilon_\infty = \|\bar{q} - q^*\|$ будет мала.

Нелинейные законы регулирования. В задачах регулирования «в большом» необходимо учитывать ограничения на управляющие воздействия:

$$|Q_i| \leq \bar{Q}_i \quad (i = \overline{1, n}).$$

Предложен метод конструирования ограниченных восстанавливающих и диссипативных сил, которые вблизи положения равновесия имеют линейную структуру (8) и (10).

Установим раздельно ограничения для восстанавливающей и диссипативной составляющих управляющих сил:

$$|Q_i^{(1)}(q_i)| \leq \bar{Q}_i^{(1)}, \quad |Q_i^{(2)}(\dot{q}_i)| \leq \bar{Q}_i^{(2)}, \quad \bar{Q}_i = \bar{Q}_i^{(1)} + \bar{Q}_i^{(2)} \quad (i = \overline{1, n}).$$

Метод основан на *сингулярном разложении* симметрических положительно определенных матриц C и D :

$$C = \sum_{j=1}^n \sigma_j g_j g_j^T, \quad D = \sum_{j=1}^n \tau_j h_j h_j^T,$$

где $g_j = \text{col}(g_{1j}, g_{2j}, \dots, g_{nj}) \in \mathbb{R}^n$ и $h_j = \text{col}(h_{1j}, h_{2j}, \dots, h_{nj}) \in \mathbb{R}^n$ - собственные вектора матриц, а $\sigma_j, \tau_j > 0$ - скаляры.

Заданным требованиям отвечают силы

$$Q^{(1)}(q) = - \sum_{j=1}^n \sigma_j g_j \text{sat}(\langle g_j, q - q^* \rangle), \quad Q^{(2)}(\dot{q}) = - \sum_{j=1}^n \tau_j h_j \text{sat}(\langle h_j, \dot{q} \rangle),$$

причем

$$U_1(q) = \sum_{j=1}^n \sigma_j \int_0^{\langle g_j, q - q^* \rangle} \text{sat}(\xi) d\xi.$$

Здесь $\text{sat}(x)$ - функция насыщения. Тогда

$$\bar{Q}_i^{(1)} = \sum_{j=1}^n \sigma_j |g_{ij}|, \quad \bar{Q}_i^{(2)} = \sum_{j=1}^n \tau_j |h_{ij}|.$$

Локальные обратные связи. В простейшем варианте решения задачи регулирования каждая степень свободы лагранжевой системы охватывается локальной обратной связью:

$$Q_i^{(1)} = -\bar{Q}_i^{(1)} \text{sat}\left(\frac{q_i - q_i^*}{a_i}\right) \quad (a_i > 0), \quad Q_i^{(2)} = -\bar{Q}_i^{(2)} \text{sat}(\dot{q}_i / b_i) \quad (b_i > 0). \quad (12)$$

В линейной зоне закона регулирования (4), (12) будет действовать зависимость (11) с диагональными матрицами

$$C = \text{diag}(\bar{Q}_1^{(1)}/a_1, \bar{Q}_2^{(1)}/a_2, \dots, \bar{Q}_n^{(1)}/a_n), \quad D = \text{diag}(\bar{Q}_1^{(2)}/b_1, \bar{Q}_2^{(2)}/b_2, \dots, \bar{Q}_n^{(2)}/b_n).$$

Замечание. Наиболее близки по идейному замыслу к предлагаемому в диссертации подходу работы Е.С. Пятницкого и В.И. Матюхина, посвященные проблеме робастного управления механическими системами лагранжевого типа. Пятницким сформулирована задача управления «черным ящиком механической природы», как задача построения *универсальных законов управления*, обеспечивающих стабилизацию движения системы в достаточно широких условиях информационной неопределенности о динамических параметрах системы и внешней среды. В качестве такого закона им предложен закон релейного регулирования по каждой из обобщенных координат. Такое решение приводит к скользящему режиму по каждой из координат и, как следствие, - к их динамической развязке. Приведенная схема управления механической системой названа Пятницким *принципом декомпозиции*.

Принцип многорежимного регулирования. Многорежимность означает выделение ряда режимов функционирования САР и декомпозицию общей цели регулирования на ряд промежуточных подцелей, связанных с отдельными режимами. В итоге расширяется класс применяемых стратегий управления за счет комбинирования одnoreжимных стратегий. Целесообразно выделять режимы регулирования «в большом» и «в малом»: для первого существенны нелинейные факторы, а для второго справедливо линейное приближение и применимы линейные методы регулирования. Для задач регулирования в «большом» предлагается использовать энергетический подход.

Рис. 3 иллюстрирует один из вариантов многорежимного регулирования.

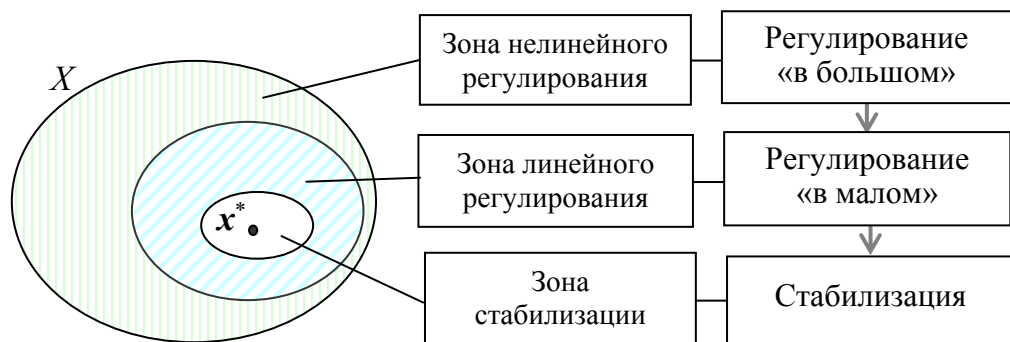


Рис. 3

Процессы регулирования с учетом динамики привода. В главе рассматривается вопрос об учете динамика привода в задачах регулирования, решаемых на базе энергетического подхода. Каналы управления представлены апериодическими звеньями и описываются векторным дифференциальным уравнением

$$T\dot{Q} + Q = u,$$

где $u = \text{col}(u_1, u_2, \dots, u_n)$, u_i - управляющие переменные, $T = \text{diag}(T_1, T_2, \dots, T_n)$, $T_i > 0$ - постоянные времени приводов.

Рассматривается действие многомерного ПД-регулятора

$$u = -C(q - q^*) - D\dot{q},$$

где C и D - симметрические положительно определенные матрицы.

Результаты исследований подытоживают следующие **выводы**:

1. ПД-регулирование оказывается работоспособным при любой степени инерционности каналов управления: стабилизация всегда обеспечивается надлежащей настройкой регулирующих обратных связей.
2. Робастность САР по отношению к инерционности каналов управления тем выше, чем больше диссипативная составляющая управляющих сил.

Спектральный анализ малых колебаний. Анализ малых колебаний лагранжевых систем основан на линейном приближении и представляет интерес для задач регулирования «в малом». Исследуются спектральные свойства малых колебаний. Выведены матричные критерии устойчивости положения равновесия. Полученные результаты могут быть использованы в задачах модальной стабилизации лагранжевых систем.

Глава 2. Стабилизация лагранжевых систем по части переменных

Задачи стабилизации систем по отношению к части переменных составляют самостоятельный раз-

дел теории устойчивости, основы которого заложены в работах В.В. Румянцева. Такие задачи возникают в разных прикладных областях. К ним, в частности, можно свести проблему устойчивости механических систем с упругими звеньями: В.И. Матюхин предлагает ее понимать как задачу построения законов управления, грубых по отношению к деформациям механической системы. В главе данный класс задач стабилизации рассматривается применительно к лагранжевым системам.

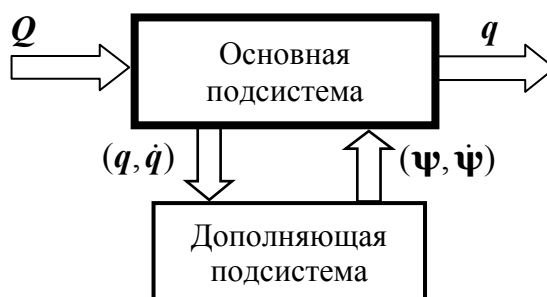


Рис. 4

Система декомпозируется на основную подсистему, обобщенные координаты которой должны стабилизироваться, и дополняющую (рис. 4).

Далее $\mathbf{q}$, $\mathbf{\Psi}$ - соответственно вектор обобщенных координат основной и дополняющей подсистем:

$$\mathbf{q} = \text{col}(q_1, q_2, \dots, q_n), \quad \mathbf{\Psi} = \text{col}(\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_m);$$

а $\mathbf{Q}$, $\mathbf{\Psi}$ - отвечающие им векторы обобщенных сил.

Предполагается, что ненулевые обобщенные силы $\Psi_j (j=\overline{1, m})$ определяются состоянием дополняющей подсистемы и являются диссипативными:

$$\langle \dot{\mathbf{\Psi}}, \mathbf{\Psi}(\mathbf{\Psi}, \dot{\mathbf{\Psi}}) \rangle \leq 0.$$

Изучаются процессы стабилизации на базе энергетического подхода по закону (11), $\mathbf{C}$ и $\mathbf{D}$ - симметрические положительно определенные матрицы.

Теорема 7. Переходные процессы в основной подсистеме затухают:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{q}(t) = \bar{\mathbf{q}} = \text{const}.$$

В установившемся режиме полная энергия сохраняется. ■

Таким образом, гарантируется стабилизация основной подсистемы.

Линейное приближение. В линейном приближении исследуется модальная структура процессов регулирования. Возмущенное движение системы представим изменением уставки $\Delta \mathbf{q}^*$ и отклонениями выделенных подсистем от равновесных положений: $\Delta \mathbf{q} = \mathbf{q} - \bar{\mathbf{q}}$, $\Delta \mathbf{\Psi} = \mathbf{\Psi} - \bar{\mathbf{\Psi}}$.

Запишем линеаризованные уравнения движения в операторной форме:

$$L_{11}(D)\Delta \mathbf{q}(t) + L_{12}(D)\Delta \mathbf{\Psi}(t) = \Delta \mathbf{Q}(t),$$

$$L_{21}(D)\Delta \mathbf{q}(t) + L_{22}(D)\Delta \mathbf{\Psi}(t) = 0,$$

$$\Delta \mathbf{Q}(t) = -\mathcal{R}(D)(\Delta \mathbf{q}(t) - \Delta \mathbf{q}^*(t)).$$

Здесь $D = \frac{d}{dt}$ - оператор дифференцирования, $L_{ij}(D)$ и $\mathcal{R}(D)$ - дифференциальные операторы с постоянными матричными коэффициентами вида

$$L_{ij}(D) = A_{ij}D^2 + B_{ij}D + C_{ij} \quad (i, j = \overline{1, 2}), \quad \mathcal{R}(D) = DD + C.$$

Введем многочленные матрицы:

$$\tilde{L}_{11}(s) = L_{11}(s) + \mathcal{R}(s), \quad L(s) = \begin{bmatrix} \tilde{L}_{11}(s) & L_{12}(s) \\ L_{21}(s) & L_{22}(s) \end{bmatrix}.$$

Заметим, что $\mathcal{R}(s)$ - передаточная матрица регулятора.

Характеристический многочлен замкнутой системы равен

$$\Delta(s) = \det L(s).$$

Рассмотрим также многочлены

$$\tilde{\Delta}_{11}(s) = \det \tilde{L}_{11}(s), \quad \Delta_{22}(s) = \det L_{22}(s).$$

Введем обозначения:

- Λ - спектр замкнутой системы, т.е. множество корней многочлена $\Delta(s)$;
- $\tilde{\Lambda}_{11}$, Λ_{22} - множества корней многочленов $\tilde{\Delta}_{11}(s)$ и $\Delta_{22}(s)$.

Следующая теорема показывает, что при увеличении коэффициентов усиления регулирующих обратных связей возникает эффект *дихотомии* спектра - расщепление его на *левую* (Left) и *правую* (Right) *части* (рис. 5).

Теорема 8. При надлежащей настройке ПД-регулятора спектр системы расщепляется на два спектральных множества:

$$\Lambda = \Lambda_L \cup \Lambda_R,$$

которые содержат соответственно $2n$ и $2m$ корней характеристического многочлена системы, причем

- 1) спектральная компонента Λ_L может быть как угодно далеко влево отодвинута от спектральной компоненты Λ_R ;
- 2) с заданной погрешностью будут выполняться приближенные равенства

$$\Lambda_L \approx \tilde{\Lambda}_{11}, \quad \Lambda_R \approx \Lambda_{22}. \blacksquare$$

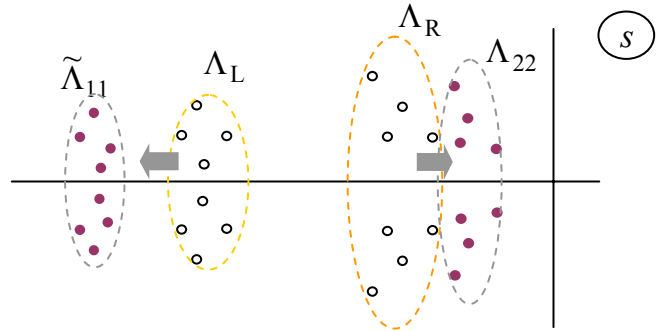


Рис. 5

Исследуются модальные свойства процессов регулирования. Под *модой* системы понимаются ее простейшие свободные движения, отвечающие отдельным точкам спектра $\lambda \in \Lambda$: они для каждой координаты являются квазиоднородными вида $\pi(t)e^{\lambda t}$, где $\pi(t)$ - алгебраический многочлен.

Выделим два принципиальных момента. Во-первых, обратная связь рассмотренной структуры не позволяет целенаправленно изменять спектр всей замкнутой системы - это, в частности, проявляется в неуправляемости спектральной компоненты Λ_R , что констатируется последней теоремой. Во-вторых, вследствие взаимодействия подсистем в динамике стабилизируемой основной подсистемы будут присутствовать моды с показателями $\lambda \in \Lambda_R$.

Спектральному множеству Λ_R могут отвечать малодемпфированные моды, неприемлемые для качества стабилизации основной подсистемы. Однако, паразитное действие этих мод на процессы стабилизации можно ослабить надлежащей настройкой ПД-регулятора согласно следующей теореме.

Теорема 9. Вклад малодемпфированных мод в динамику основной подсистемы может быть сделан сколь угодно малым посредством подходящего выбора коэффициентов усиления регулятора. $\blacksquare$

В этом случае справедлива следующая аппроксимирующая формула для передаточной матрицы системы:

$$W(s) \cong [E_n - \tilde{L}_{11}^{-1}(s)L_{12}(s)L_{22}^{-1}(s)L_{21}(s)]\tilde{L}_{11}^{-1}(s)\mathcal{R}(s).$$

Дается интерпретация полученных результатов с точки зрения теории инвариантности и автономного регулирования.

Глава 3. Релейное сепаратное регулирование в лагранжевых системах

В многосвязных САР отдельные контуры регулирования могут формироваться сепаратно, т.е. независимо от других.

Подобные решения (в иной терминологии) применяют в мехатронике: в робототехнике это схемы так называемого *децентрализованного управления* и локального сервоуправления.

В лагранжевых системах простейшими подсистемами являются двумерные: они представляют определенные степени свободы системы и в этом смысле являются *локальными*.

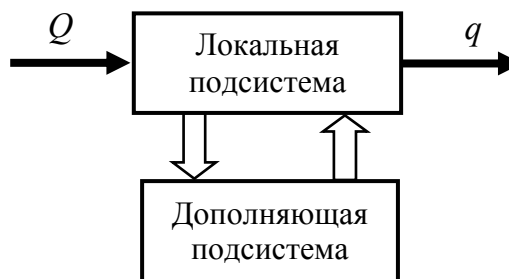


Рис. 6

Пусть выделены *целевая* локальная подсистема, отвечающая v -й степени свободы лагранжевой системы, и ее *дополняющая* подсистема (рис. 6). Далее

$$q = q_v, \quad Q = Q_v.$$

Динамику управляемой локальной подсистемы представим уравнением

$$S: M\ddot{q} = Q + \eta. \quad (13)$$

Здесь M - *обобщенная масса*, слагаемое η рассматривается как *возмущение*, действующее со стороны дополняющей подсистемы:

$$M = a_{vv}(q), \quad \eta = - \sum_{\substack{j=1 \\ j \neq v}}^n a_{vj}(q) \ddot{q}_j - \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial a_{vj}(q)}{\partial q_i} \dot{q}_i \dot{q}_j + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{\partial a_{ij}(q)}{\partial q_v} \dot{q}_i \dot{q}_j - \frac{\partial U_0(q)}{\partial q_v}.$$

Эти зависимости *a priori* неизвестны, но имеются ограничивающие оценки:

$$\underline{M} \leq M \leq \overline{M}, \quad |\eta| \leq \overline{\eta}.$$

Считаем, что наложены ограничения на управляющую силу:

$$|Q| \leq \overline{Q},$$

достаточные для противодействия любому возмущению:

$$\overline{\eta} < \overline{Q}.$$

Регулирование должно осуществляться на основе текущей информации о состоянии целевой подсистемы (13) и быть *робастным* в условиях имеющихся неопределенностей. В главе исследуются возможность реализации сепаратного регулирования по *схеме линейного быстрогодействия*.

Для сравнения отметим, что Е.С. Пятницким и В.И. Матюхиным в рамках сформулированного ими принципа декомпозиции изучалось релейное сепаратное регулирование обобщенных координат механической системы с линейной функцией переключения.

Глава 4. Управление манипуляционными роботами

Важной предпосылкой развития робототехники является расширение теоретической базы процессов управления.

Существенный вклад в эту область исследований внесли отечественные ученые: Е.П. Попов, В.С. Медведев, А.Ф. Верещагин, С.Л. Зенкевич, П.Д. Крутько, В.С. Кулешов, Н.А. Лакота, А.Г. Лесков, А.В. Тимофеев, А.С. Ющенко, Е.И. Юревич, Ф.Л. Черноусько, Е.И. Воробьев, В.Е. Бербюк, М.З. Коловский, А.И. Корендясев, Ф.М. Кулаков, Ю.В. Подураев, Б.А. Смольников и др.

В главе энергетический подход и принцип многорежимности применяются к задачам управления манипуляционными роботами. Рассмотрена также проблема компьютерного моделирования многозвенных манипуляторов.

Моделирование динамики манипулятора. При построении моделей манипуляционных роботов используют различные способы описания механических систем: уравнения Лагранжа, принцип Даламбера, уравнения Ньютона-Эйлера, уравнения Аппеля, принцип наименьшего принуждения Гаусса.

Автором предложен новый метод моделирования многозвенных манипуляторов. Главная его особенность - применение *канонических переменных* q и p , где $p = \partial K / \partial \dot{q}$ - обобщенный импульс. Тогда из (1)–(3) получаем

$$\dot{q} = \mathcal{A}^{-1}(q)p, \quad \dot{p} = \frac{\partial L}{\partial q} + Q,$$

причем

$$\frac{\partial L}{\partial q_i} = \frac{1}{2} \dot{q}^T \frac{\partial \mathcal{A}(q)}{\partial q_i} \dot{q} - \frac{\partial U_0(q)}{\partial q_i} \quad (i = \overline{1, n}).$$

В модели также используются однородные преобразования Денавита-Хартенберга и рекурсивные уравнения Ньютона-Эйлера: первые служат для вычисления тензоров инерции и положения звеньев в глобальной системе координат, а вторые позволяют определить матрицу инерции системы $\mathcal{A}(q)$.

Разработана программа моделирования манипуляционного робота типа RUMA 560 в среде математического пакета MATLAB. Вычислительные эксперименты подтверждают эффективность предложенных решений.

Глава 5. Управление мостовым краном

Данный тип грузоподъемных машин широко применяется в промышленности.

Электрический мостовой кран состоит из моста и грузовой тележки. Мост опирается на ходовые колеса и перемещается по рельсам подкранового пути вдоль пролета цеха. На верхних поясах несущих балок моста установлены рельсы - по ним (поперек пролета цеха) передвигается грузовая тележка, снабженная подъемным механизмом с грузозахватным элементом.

Эффективное управление грузоподъемным краном должно обеспечивать безопасность выполняемых подъемно-транспортных операций и способствовать достижению его максимальной производительности, что особенно акту-

ально для кранов большой грузоподъемности ($50 \div 1000$ т). Сложность задач управления обусловлена *колебаниями* подвешенного на тросе груза.

Математическая модель мостового крана. Теоретическое изучение процессов управления мостовым краном требует разработки адекватной математической модели. В главе дано обобщение предложенной У.Бурдаш-Зигурдижаном математической модели крана: дополнительно учтено движение моста крана и двухмерное колебание груза.

Динамика крана описывается уравнениями Лагранжа второго рода. Полная кинетическая энергия крана включает кинетическую энергию его инерционных частей - тележки, моста, груза и барабана лебедки. Потенциальная энергия определяется высотой груза. Силы трения обусловлены качением колес по рельсам и сопротивлением трения реборд ходовых колес о рельсы.

Стратегия управления перемещением груза. На рис. 7 показана циклограмма подъемно-транспортной операции. Исследуются вопросы предотвращения колебаний груза. Колебания необходимо гасить при установившемся движении и при позиционировании крановой тележки.

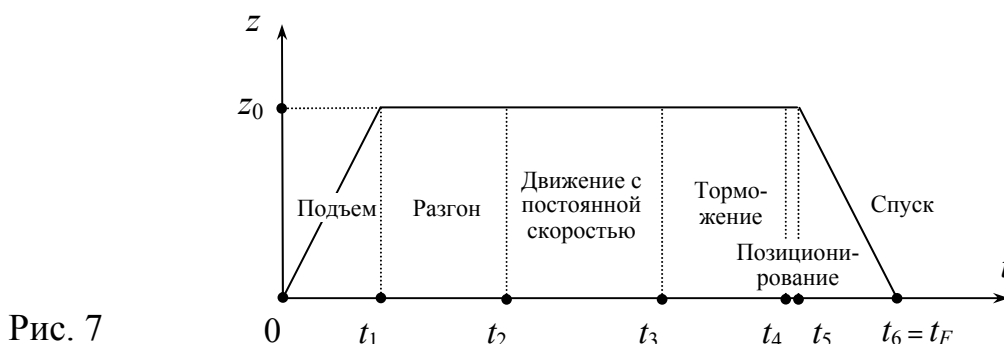


Рис. 7

Применение энергетического подхода. На базе энергетического подхода изучается *эффект гашения колебаний груза* при решении двух задач: стабилизации скорости грузовой тележки и регулирования положения тележки над местом установки груза. Решаемые задачи вписываются в *теоретическую схему стабилизации лагранжевых систем по части переменных*, исследованную в главе 2. При моделировании принимались технические характеристики электрического мостового крана типа К-5.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации разработан общий подход к построению законов робастного управления лагранжевыми динамическими системами, названный *энергетическим*: он объединяет формализм лагранжевой механики, энергетические соображения и методологию второго метода Ляпунова. Ряд теоретико-методологических вопросов диссертационного исследования посвящен раз-

виту *принципа многорежимности* применительно к процессам регулирования в лагранжевых системах.

Полученные теоретические результаты применены к задачам управления манипуляционными роботами и подъемно-транспортными машинами.

Основные научные результаты диссертационного исследования:

1. Разработаны теоретические положения энергетического подхода. Получены линейные и нелинейные законы регулирования, обеспечивающие робастную стабилизацию лагранжевых систем.
2. Исследовано влияние динамики привода на процессы регулирования. Доказана применимость энергетического подхода при любой степени инерционности каналов регулирования.
3. Рассмотрена задача робастной стабилизации лагранжевых систем по отношению к части переменных на базе энергетического подхода. Исследовано в линейном приближении действие многомерного ПД-регулятора, а также динамические свойства процесса стабилизации.
4. Рассмотрена задача робастного сепаратного регулирования локальных подсистем лагранжевой системы. Предложено ее решение, основанное на модификации схемы линейного быстрогодействия.
5. Рассмотрена научно-техническая задача управления мостовым краном с учетом колебаний подвешенного на канате груза. Исследованы вопросы гашения колебаний груза при выполнении мостовым краном подъемно-транспортных операций на базе энергетического подхода.

На основании проведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие **выводы**:

1. Принцип многорежимности направлен на повышение функциональной гибкости и эффективности систем управления за счет комбинирования одnoreжимных стратегий управления.
2. Целесообразно выделять режимы регулирования «в большом» и «в малом», режим стабилизации, а также применять сепаратное регулирование обобщенных координат лагранжевой системы.
3. Энергетический подход позволяет решать задачи робастного регулирования «в большом» для лагранжевых систем.
4. Предложенные методы исследования спектральных свойств управляемых лагранжевых систем могут быть полезными при анализе режимов регулирования «в малом» и в задачах модального управления.
5. Правильность теоретических положений и эффективность предложенных решений подтверждает компьютерное моделирование процессов управления многозвенным манипулятором и грузоподъемным краном.

Результаты теоретических исследований могут найти применение в робототехнике, в системах автоматизированного электропривода производственных механизмов и технологических комплексов, в системах автоматизации подъемно-транспортных установок и магистрального транспорта.

Основные результаты диссертации отражены в работах:

1. *Медведев В.С., Филимонов Н.А.* Нейросетевой алгоритм решения обратной позиционной задачи кинематики манипуляционных роботов // Информационные технологии в естественных науках, экономике и образовании: Труды междунар. конф. – Саратов: ПКИ Центрсоюза РФ. – 2002. – С. 58-60.
2. *Медведев В.С., Филимонов Н.А.* Энергетический подход в задачах управления манипуляционными роботами // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2003. – № 4. – С.22-27.
3. *Филимонов Н.А.* О применимости схем нейронного управления на основе инверсно-прямой модели обучения // Интеллектуальные системы: Труды Пятого междунар. симп. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана. – 2002. – С. 121-123.
4. *Филимонов Н.А.* Анализ схемы нейронного управления движущимися объектами на основе инверсно-прямой модели обучения // Тез. докл. XXXIV науч.-техн. конф. студ., асп. и мол. ученых. – СПб.: АГА. – 2002. – С. 14-15.
5. *Филимонов Н.А.* Моделирование динамики манипулятора // Тез. докл. XXXV науч. конф. студ., асп. и мол. ученых. – СПб.: АГА. – 2003. – С. 11.
6. *Филимонов Н.А.* Применение энергетического подхода в задачах управления манипулятором // Докл. академии военных наук. – 2003. – № 9. – С. 115-122.
7. *Филимонов Н.А.* Сепаратное регулирование локальных координат манипуляционного робота // Современные технологии в задачах управления, автоматизации и обработки информации: Труды XII междунар. науч.-тех. семинара. – М.: Изд-во МЭИ. – 2003. – С. 147-148.
8. *Филимонов Н.А.* Энергетический подход в задаче демпфирования колебаний груза мостового крана // Мехатроника, автоматизация, управление: Труды Первой Всерос. науч.-тех. конф. с междунар. участием. – М.: Новые технологии. – 2004. – С.462-467.
9. *Филимонов Н.А.* Исследование процессов сепаратного регулирования локальных координат манипуляционного робота // Интеллектуальные системы: Труды Шестого междунар. симп. – М.: РУСАКИ. – 2004. – С. 481-484.
10. *Филимонов Н.А.* О применимости схем нейронного управления на основе инверсно-прямой модели обучения // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2004. – № 10. – С.33-38.
11. *Filimonov N.A.* Analysis of inversely direct method of training of neuron control circuits // Proceedings of 15th Internat. Conf. on Systems for Automation of Engineering and Research (SAER-2002). – Sofia: SAER Forum Group & Publishing House of the USB. – 2002. – P. 223-225.