

**На правах рукописи**

**АХМЕТЗЯНОВ Инсур Завдятович**

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ  
МНОГОСВЯЗНЫХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО  
УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ  
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЛОЖЕНИЯ**

**Специальность 05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации (в промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук**

**Уфа – 2010**

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и информатики  
филиала ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет»  
в г. Набережные Челны

Научный руководитель

д-р техн. наук, доцент  
**АСАНОВ Асхат Замилович**,  
проф. каф. прикладной математики  
и информатики  
филиала Казанского (Приволжского)  
федерального университета  
в г. Набережные Челны

Официальные оппоненты

д-р техн. наук, проф.  
**ВАЛЕЕВ Сагит Сабитович**,  
зав. каф. информатики  
Уфимского государственного  
технического университета

д-р физ.-мат. наук, проф.  
**АСАДУЛЛИН Рамиль Мидхатович**,  
зав. каф. программирования  
и вычислительной математики  
Башкирского государственного  
педагогического университета

Ведущая организация

Институт проблем управления  
сложными системами РАН,  
г. Самара

Защита диссертации состоится « 12 » ноября 2010 г. в 14 часов  
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03  
при Уфимском государственном авиационном техническом университете  
по адресу: 450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета

Автореферат разослан « 07 » октября 2010 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
д-р техн. наук, проф.



**В. В. Миронов**

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

### Актуальность темы

Современные объекты управления, как правило, представляют собой совокупность подсистем, выполняющих различные задачи, подчиненные, однако, общей цели. Регулируемые параметры в разных подсистемах взаимосвязаны между собой. Так, в машиностроении широко применяется сложное технологическое оборудование, в состав которого входит множество регулируемых электро-, гидро-, пневмоприводов, работа которых должна выполняться согласованно. Подобные сложные объекты управления, имеющие множество взаимосвязанных каналов управления, являются типичными и в других отраслях, например, в авиастроении. Таким образом, одной из важнейших характеристик современных объектов управления является *многосвязность*, что требует соответствующих методов проектирования систем управления ими.

Характерным признаком современных систем автоматического управления (САУ) является многоконтурность, когда каждый замкнутый контур выполняет свои определенные задачи, такие как обеспечение требуемой динамики системы, компенсация внешних возмущений, компенсация параметрических возмущений и др. Процессы управления в каждом контуре должны быть взаимосвязаны, что имеет особенное значение для многосвязных объектов управления.

Большинство реальных технических объектов характеризуются нелинейностью, нестационарностью, неопределенностью параметров, что, наряду с многосвязностью, делает задачу проектирования САУ такими объектами чрезвычайно сложной. Известны подходы, когда синтез законов управления осуществляется для линеаризованного в некоторой рабочей точке объекта. Компенсация нестационарности, нелинейности в этом случае может выполняться, например, методами адаптивного управления. Тем не менее, решение задач анализа и синтеза систем управления даже линейным многосвязным объектом вызывает трудности, т.к. большинство хорошо освоенных классических методов ориентировано на системы с одним входом и выходом. Известные методы, применимые для многосвязных систем, в основном, базируются на численных методах, т.е. являются приближенными.

Таким образом, является *актуальной* проблема разработки новых методов проектирования многосвязных САУ (МСАУ) сложными линейными динамическими объектами (ЛДО), способных выполнять согласованное регулирование нескольких параметров, эффективно подавлять влияние возмущений.

Далее в работе термин *контур управления (многосвязный контур управления)* означает замкнутую цепь звеньев МСАУ, объединяющую объект управления и регулятор, состоящую из совокупности прямых и перекрестных скалярных контуров управления.

Под *аналитическим конструированием* МСАУ в данной работе понимается составная часть общего процесса проектирования, включающая аналитический синтез точными методами требуемых динамических характеристик МСАУ, этапы аппроксимации и обеспечения физической реализуемости

МСАУ, анализ характеристик синтезированной системы на предмет соответствия ее характеристик техническим требованиям.

### **Цель работы и задачи исследования**

Цель исследования состоит в разработке методов, алгоритмов аналитического конструирования МСАУ техническими объектами машиностроения на основе технологии вложения систем для снижения временных затрат на проектирование многосвязных систем управления.

Для достижения поставленной цели необходимо решение следующих задач.

1. Разработка метода синтеза двухконтурной МСАУ ЛДО с подчиненным регулированием по матричным критериям качества движения замкнутой системы.

2. Разработка метода синтеза комбинированной МСАУ (с управлением по оценкам состояния и внешних возмущений) ЛДО по матричным критериям качества движения замкнутой системы.

3. Разработка инженерных методик аналитического конструирования двухконтурных МСАУ ЛДО, обеспечивающих физическую реализуемость элементов САУ.

4. Разработка методики аналитического конструирования физически реализуемого многосвязного наблюдателя состояния и внешних возмущений ЛДО.

5. Оценка эффективности предлагаемых инженерных методик путем их использования при решении прикладных задач проектирования МСАУ в промышленности и последующего имитационного моделирования процессов в полученных системах.

### **Методы исследования**

Методы исследования базируются на положениях и методах линейной алгебры, теории матриц, теории автоматического управления, теории вложения систем, теории наблюдателей состояния; в том числе операционное исчисление (преобразование Лапласа), метод канонизации матриц для решения линейных (билинейных) матричных уравнений, теория порядковых отображений, методы редукции математических моделей.

### **На защиту выносятся**

1. Метод аналитического синтеза двухконтурной МСАУ ЛДО с подчиненным регулированием по матричным критериям качества замкнутой системы.

2. Метод аналитического синтеза комбинированной (с управлением по оценкам состояния и внешних возмущений) МСАУ ЛДО по матричным критериям качества замкнутой системы.

3. Метод аналитического синтеза наблюдающего устройства состояния и внешних возмущений многосвязного ЛДО по матричным критериям качества оценивания состояния и возмущений объекта.

4. Комплексы условий разрешимости задач синтеза МСАУ ЛДО, многосвязного наблюдающего устройства состояния и внешних возмущений ЛДО.

5. Инженерные методики проектирования многосвязного наблюдающего устройства состояния и внешних возмущений линейного динамического объекта, двухконтурных МСАУ ЛДО.

#### **Научная новизна**

1. Новизна разработанного метода синтеза двухконтурной МСАУ ЛДО с подчиненным регулированием состоит в комплексном задании критериев качества САУ, учёте многосвязности отдельных контуров управления, формировании в аналитическом виде классов эквивалентных точных решений задачи синтеза.

2. Новизна разработанного метода синтеза комбинированной МСАУ состоит в комплексном задании критериев качества САУ, формировании классов точных решений задачи синтеза, учёте многосвязности контуров управления, использовании астатического многосвязного наблюдателя в контуре управления по возмущению.

3. Новизна разработанного метода синтеза линейного наблюдающего устройства идентификации векторов состояния и внешних возмущений линейного многосвязного динамического объекта состоит в восстановлении нескольких возмущающих сигналов, в отдельном задании требований к качеству оценивания состояния и возмущений объекта, в учете многосвязности объекта наблюдения, в получении в аналитическом виде класса эквивалентных точных решений задачи.

4. Новизна сформулированных условий разрешимости задач синтеза двухконтурных МСАУ ЛДО, астатического наблюдателя состоит в получении их в аналитическом виде в форме систем матричных уравнений, в возможности формулировать условия, накладываемые на желаемые характеристики проектируемой САУ.

5. Техническая новизна разработанных инженерных методик проектирования наблюдающего устройства, двухконтурных МСАУ ЛДО состоит в формировании специальных условий, накладываемых на желаемые матричные критерии качества проектируемой САУ, астатического наблюдателя, позволяющих гарантированно получить физически реализуемые элементы системы управления.

#### **Практическая ценность работы**

Практическая ценность полученных результатов заключается в следующем.

- В разработанных инженерных методиках проектирования наблюдающих устройств состояния и возмущений, двухконтурных МСАУ ЛДО, позволяющих синтезировать САУ с физически реализуемыми матричными передаточными функциями (МПФ) ее элементов, оценить грубость получаемого решения задачи синтеза.

- В разработанном программном обеспечении для канонизации матриц произвольного размера при решении линейных матричных уравнений, для автоматизации вычислений по предлагаемым методикам аналитического конструирования наблюдающих устройств, МСАУ ЛДО.

Внедрение результатов диссертации осуществлено в разработках ОАО «Камский автомобильный завод (КамАЗ)» (г. Набережные Челны) в области

проектирования МСАУ сложным технологическим оборудованием, в области проектирования бортовых систем управления и диагностики автомобилей. Пакет прикладных программ для канонизации матриц, для решения линейных матричных уравнений, для анализа и синтеза МСАУ ЛДО на основе технологии вложения используется в учебном процессе на факультете Прикладной математики и информационных технологий Казанского (Приволжского) федерального университета.

#### **Связь темы исследования с научными программами**

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и информатики филиала КФУ в г. Набережные Челны в рамках гранта РФФИ: № 0808-00536, в рамках г/б НИР, рег. № 01200952946.

#### **Апробация работы**

Основные результаты настоящей диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях.

- I, II Всероссийская научная конференция «Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB» (Москва, 2002, 2004).
- XXXIII Уральский семинар по процессам управления (Екатеринбург, 2003).
- Всероссийская молодёжная научно-техническая конференция «Интеллектуальные системы управления и обработки информации» (Уфа, 2003).
- 2-я Российская мультikonференция по проблемам управления. Мехатроника, автоматизация, управление (С.-Петербург, 2008).
- XI Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2008).
- Итоговая научная конференция КГУ (2002–2008).

#### **Публикации**

По теме диссертации опубликовано 20 печатных работ, в том числе 12 статей, из них 2 – в изданиях, входящих в список ВАК, 8 в сборниках трудов конференций.

#### **Структура и объем работы**

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 108 наименований и 4 приложений. Основная часть работы (без библиографического списка и приложений) изложена на 170 страницах машинописного текста.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ**

**Во введении** кратко обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цели и задачи исследования, приведены методы исследований, определены научная новизна, практическая ценность работы.

**Первая глава** «Проблемы и методы проектирования систем управления техническими объектами в машиностроении» посвящена анализу особенностей сложных технических систем в машиностроении как объектов управления, ана-

лизу известных подходов и методов проектирования САУ многосвязными динамическими объектами.

Анализ современных технических объектов машиностроения показал, что в качестве типичных объектов управления выступает сложное технологическое оборудование, включающее многооперационные станки, автономные транспортные устройства, различные роботы-манипуляторы, прокатные станы и другое оборудование. Характерными особенностями подобных объектов являются наличие множества модулей, исполнительных механизмов, функционирование которых взаимосвязано и направлено на достижение общей цели. Как правило, имеется несколько взаимосвязанных регулируемых параметров. Все это заставляет рассматривать подобные объекты как многосвязные объекты управления. Наряду с многосвязностью технические объекты характеризуются нелинейностью, нестационарностью параметров.

Весьма распространенным при проектировании САУ техническими объектами является принцип многоконтурности, согласно которому в структуре проектируемой САУ выделяются несколько контуров управления, на каждый из которых возлагается определенная задача (обеспечение желаемой динамики, компенсация внешних возмущений, адаптация к изменению условий и др.). Возникает проблема распространения этого принципа на класс многосвязных объектов управления.

Задача управления многосвязным объектом с учетом его нелинейности, нестационарности параметров представляется чрезвычайно сложной. Однако, учитывая жесткость структуры объектов, а также предполагая, что компенсация нелинейности и нестационарности параметров выполняется дополнительным адаптивным контуром, возможно выполнять синтез базовых законов управления, привлекая для этого методы в классе линейных стационарных систем.

Развитию методов синтеза САУ линейными объектами посвящены работы А. А. Воронова, А. А. Красовского, Н. Т. Кузовкова, А. А. Первозванского, Б. Н. Петрова, Е. П. Попова, В. В. Солодовникова и многих других. Однако большинство классических методов анализа и синтеза неприменимы для многосвязных систем, т.к. не позволяют учитывать взаимовлияние каналов управления. Методам синтеза МСАУ динамическими объектами посвящены работы А. З. Асанова, В. Н. Букова, В. И. Васильева, Ф. А. Шаймарданова, А. А. Воронова, А. Р. Гайдука, Л. Заде (L. Zadeh), Б. Г. Ильясова, Ю. С. Кабальнова, А. А. Красовского, М. О. Меерова, М. Месаровича, В. Т. Морозовского, А. С. Морса (A. S. Morse), Х. Розенброка (H. N. Rosenbrock), Е. М. Смагиной и др. Большинство этих методов основаны на численных либо частотных методах и дают лишь приближенное решение задачи синтеза. Также известные методы не позволяют формализовать полный комплекс требований к САУ.

В результате проведенного анализа современных подходов выявлено относительно новое направление анализа и синтеза многосвязных систем, называемое технологией вложения (развиваемое коллективом авторов под руководством проф. В. Н. Букова). Данная технология может служить платформой новых аналитических методов синтеза, отличающихся матричной формой задания критериев качества проектируемой системы, позволяющих находить полное

множество точных решений задачи, формулировать условия разрешимости задачи. Однако, вопросы обеспечения практической реализуемости синтезируемых законов управления выходят за рамки технологии вложения. Таким образом, возникает необходимость разработки, на основе технологии вложения, новых методов синтеза МСАУ техническими объектами, учитывающих многоконтурность МСАУ, а также создания инженерных методик на их основе, обеспечивающих физическую реализуемость синтезируемых законов управления.

**Во второй главе** «Синтез законов управления многосвязными динамическими объектами на основе технологии вложения систем» представлены общие положения аналитического конструирования двухконтурных МСАУ ЛДО, базирующиеся на технологии вложения систем, предполагающие включение данного этапа проектирования в общую схему построения квазиадаптивных систем автоматического управления многосвязными нестационарными динамическими объектами.

В качестве объекта управления рассматривается линейная модель в пространстве состояний:

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Fw, \\ y = Cx, \end{cases}$$

где  $x \in \mathcal{R}^n$  – вектор состояния объекта;  $u \in \mathcal{R}^s$  – вектор задаваемых входных воздействий;  $y \in \mathcal{R}^m$  – вектор выходных сигналов объекта;  $w \in \mathcal{R}^l$  – вектор переменных возмущений произвольного вида, матрицы  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $F$  – матрицы постоянных коэффициентов.

В данной работе методы синтеза разработаны для двух различных структур МСАУ. Первая из рассматриваемых структур (рис. 1) распространяет принцип подчиненного регулирования на многосвязный объект. Вектор выходных сигналов  $y$  разбивается на два субвектора  $y_1$  и  $y_2$  выбором матриц  $C_1$  и  $C_2$ , при условии  $C = [C_1^T \ C_2^T]^T$ . Каждый векторный контур управления включает многосвязные регулятор  $K_i(p)$  и предкомпенсатор входного сигнала  $G_i(p)$  ( $i = \overline{1,2}$ ), описываемые матричными передаточными функциями (МПФ). Выбор данной структуры МСАУ целесообразен для управления многодвигательными электромеханическими объектами, что позволяет, например, вводить ограничения предельных значений управляемых величин.

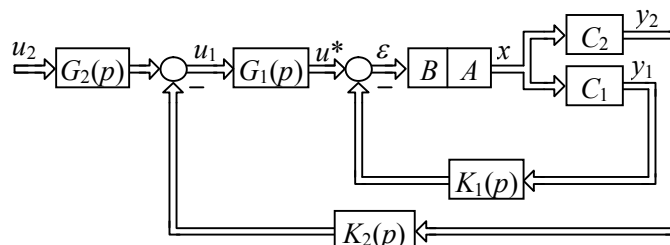


Рисунок 1 – Структура двухконтурной МСАУ с подчиненным регулированием.

Требования к качеству процессов управления формализуются в виде желаемых МПФ  $E_{y_i}^{u_i}(p)$ , задающих влияние входного сигнала каждого контура на соответствующий выход. Такой способ формализации характеристик замкну-



той системы, в отличие от модальных методов, позволяет задавать распределение нулей и полюсов по отдельным каналам управления. Задача синтеза заключается в определении МПФ  $K_i(p)$  и  $G_i(p)$  таких, которые обеспечили бы замкнутой системе характеристики, заявленные в виде желаемых МПФ  $E_{y_i}^{u_i}(p)$ .

Во второй из рассматриваемых структур МСАУ (рис. 2) используется комбинированный принцип управления, когда управляющий сигнал формируется с использованием информации о векторе состояния объекта  $x$  и величине его внешних возмущений  $w$ . Предполагается, что полный вектор состояния и вектор внешних возмущений недоступны прямому измерению, поэтому для формирования их косвенных оценок  $\hat{x}$  и  $\hat{w}$  их величины в контуры управления включен наблюдатель. Отличием предложенного наблюдателя от известных аналогов является возможность отдельного задания требований к точности и динамике оценивания состояния объекта и внешних возмущений. Структура МСАУ включает, кроме объекта управления (1), регулятор по состоянию  $K_x(p)$ , регулятор по возмущению  $K_w(p)$ , предкомпенсатор  $G(p)$ , а также матрицы наблюдателя  $L$  и  $L_{-1}(p)$ . Требования к САУ и наблюдателю формулируются в виде совокупности желаемых МПФ  $E_w^w(p)$ ,  $E_{\Delta x}^0(p)$ ,  $E_y^w(p)$ ,  $E_y^u(p)$ , задающих, соответственно, динамическую точность оценивания возмущений, влияние начальных условий на ошибку оценивания состояния, влияние возмущений и входного сигнала на выход замкнутой системы. Задача синтеза МСАУ (включая наблюдатель) заключается в определении матриц  $K_x(p)$ ,  $K_w(p)$ ,  $G(p)$ ,  $L(p)$  и  $L_{-1}(p)$  таких, чтобы обеспечить замкнутой МСАУ и наблюдателю характеристики качества, формализованные в виде указанной совокупности желаемых МПФ.

Поставленные задачи решаются путем выполнения этапов, предусмотренных технологией вложения систем. В целом, выполнение этих этапов аналогично для обеих рассматриваемых структур, поэтому рассмотрим, для краткости, их реализацию для МСАУ с комбинированной структурой (рис. 2).

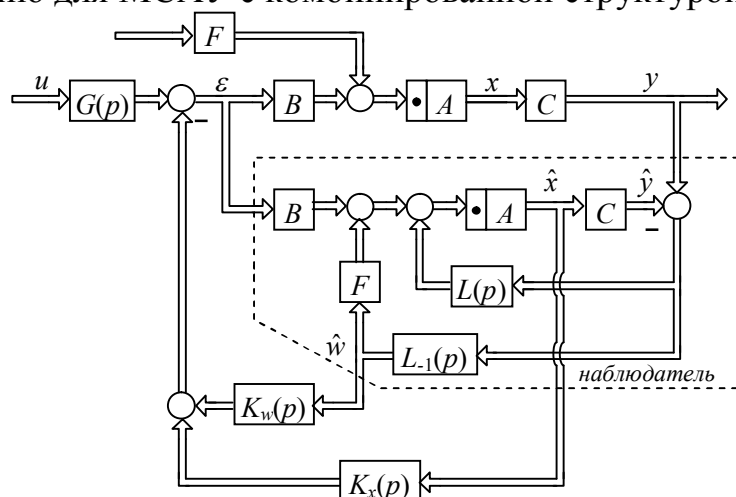


Рисунок 2 – Структура двухконтурной МСАУ с комбинированным регулированием.

Сформируем блочно-матричное уравнение, полностью описывающее структуру МСАУ:

$$\Omega \begin{bmatrix} x^T & \hat{x}^T & y^T & \hat{y}^T & \varepsilon^T & \hat{w}^T & w^T & u^T \end{bmatrix}^T = \begin{bmatrix} x_0^T & \hat{x}_0^T & 0 & 0 & 0 & 0 & w^T & u^T \end{bmatrix}^T, \quad (2)$$

где блочная матрица

$$\Omega = \begin{bmatrix} pI_n - A & 0 & 0 & 0 & -B & 0 & -F & 0 \\ 0 & pI_n - A & -L(p) & L(p) & -B & -F & 0 & 0 \\ -C & 0 & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -C & 0 & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_x(p) & 0 & 0 & I_s & K_w(p) & 0 & -G(p) \\ 0 & 0 & -L_{-1}(p) & L_{-1}(p) & 0 & I_l & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix} \quad (3)$$

представляет собой всегда обратимую проблемную матрицу (проматрицу) задачи, включающую все известные и искомые звенья системы. Здесь и далее  $I_z$  обозначает единичную матрицу некоторого размера  $z$ . В терминах вложения систем желаемые требования к МСАУ формализуются в виде тройки так называемых образов:

$$\omega_1 = E_{\hat{w}}^w(p), \quad \omega_2 = E_{\hat{x}}^0(p) - E_x^0(p) = E_{\Delta x}^0(p), \quad \omega_3 = \begin{bmatrix} E_y^w(p) & E_y^u(p) \\ 0 & 0 \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Вложение системы (2) в образы (4) осуществляется согласно тождеству вложения  $\beta_i \Omega^{-1} \alpha_i = \omega_i$ , где матрицы вложения  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  задаются в виде

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_l \ 0]^T, & \beta_1 &= [0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ I_l \ 0 \ 0], \\ \alpha_2 &= [I_n \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]^T, & \beta_2 &= [-I_n \ I_n \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0], \\ \alpha_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_l & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}^T, & \beta_3 &= \begin{bmatrix} 0 & 0 & I_m & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

На следующем этапе выполняется специальная блочная факторизация проматрицы (3), образов (4) и матриц вложения в соответствии с соотношениями

$$\Omega = I_{2(n+m+l+s)} \Omega, \quad \alpha_i = I_{2(n+m+l+s)} \delta_i, \quad \beta_i = \pi_i \Omega, \quad \omega_i = \pi_i \alpha_i,$$

где  $\delta_i, \pi_i$  – некоторые блочные матрицы с неизвестными по постановке задачи элементами. В результате преобразований формируется система тождеств, сведенная к системе линейных (билинейных) матричных уравнений

$$\begin{cases} E_{\hat{w}}^w(p) = \pi_{1x}(p)F, & \pi_{1x}(p)(pI_n - A) + \pi_{1x}(p)L(p)C + \pi_{1x}(p)FL_{-1}(p)C = L_{-1}(p)C, \\ E_{\Delta x}^0(p)(pI_n - A + L(p)C + FL_{-1}(p)C) = -I_n, & E_y^w(p) = \pi_{3x}(p)F, & E_y^u(p) = \pi_{\Sigma}(p)BG(p), \\ \pi_{\Sigma}(p)(pI_n - A) + \pi_{\Sigma}(p)BK_x(p) = C, \\ \pi_{\Sigma}(p)BK_w(p)L_{-1}(p)C = C - \pi_{3x}(p)(pI_n - A) + (\pi_{\Sigma}(p) - \pi_{3x}(p))(L(p) + FL_{-1}(p))C \end{cases} \quad (5)$$

относительно искомым передаточных матриц  $K_x(p), K_w(p), G(p), L(p), L_{-1}(p)$ , а также некоторых вспомогательных дробно-полиномиальных матриц  $\pi_{1x}(p), \pi_{3x}(p)$  и  $\pi_{\Sigma}(p)$ . Любая совокупность указанных матриц, удовлетворяющая системе уравнений (5), будет являться формально точным решением задачи синтеза. Решение системы уравнений (5) получено на основе метода канонизации матриц (В.Н. Буков, В.В Косьянчук, 2001) в виде следующей совокупности параметризованных множеств

$$\begin{aligned}
\{K_x(p)\}_\varepsilon &= \overline{[\pi_\Sigma(p)B]}(C - \pi_\Sigma(p)(pI_n - A)) + \overline{[\pi_\Sigma(p)B]}^R \varepsilon, \\
\{G(p)\}_\xi &= \overline{[\pi_\Sigma(p)B]}E_y^u(p) + \overline{[\pi_\Sigma(p)B]}^R \xi, \\
\{\pi_{3x}\}_\mu &= E_y^w(p)\overline{F} + \mu\overline{F}^L \\
\{K_w(p)\}_{\eta,\varphi} &= \overline{[\pi_\Sigma(p)B]}S(p)\overline{[L_{-1}(p)C]} + \eta\overline{[L_{-1}(p)C]}^L + \overline{[\pi_\Sigma(p)B]}^R \varphi \\
\{\pi_{1x}(p)\}_\chi &= E_w^w(p)\overline{F} + \chi\overline{F}^L, \quad \{L_{-1}(p)\}_\gamma = -\pi_{1x}(p)[E_{\Delta x}^0(p)]^{-1}\overline{C} + \gamma\overline{C}^L, \\
\{L(p)\}_\kappa &= \left( -[E_{\Delta x}^0(p)]^{-1} - (pI_n - A) - FL_{-1}(p)C \right) \overline{C} + \kappa\overline{C}^L,
\end{aligned}$$

порождаемых произвольно варьируемыми конечными полиномиальными матрицами  $\varepsilon, \chi, \gamma, \eta, \varphi, \kappa, \mu, \xi$  соответствующих размеров. Здесь принято обозначение:  $S(p) = C - \pi_{3x}(p)(pI_n - A) + (\pi_\Sigma(p) - \pi_{3x}(p))(L(p) + FL_{-1}(p))C$ . Для некоторой матрицы  $X$  конструкции  $\overline{X}, \overline{X}^R$  и  $\overline{X}^L$  обозначают сводный матричный канонизатор, правый делитель нуля и левый делитель нуля соответственно. Показано, что матрица  $\pi_\Sigma(p)$  в данной задаче имеет физический смысл, соответствующий свободному движению системы при нулевых возмущениях и в предположении прямого измерения вектора состояния объекта (1). Задание значения этой матрицы может осуществляться с учетом ее физического смысла.

В работе сформулированы равенства, выполнение которых необходимо и достаточно для существования решения (хотя бы одного) системы уравнений (5):

$$\begin{aligned}
E_w^w(p)\overline{F}^R &= 0, \quad \pi_{1x}(p)[E_{\Delta x}^0(p)]^{-1}\overline{C}^R = 0, \quad \left( [E_{\Delta x}^0(p)]^{-1} + (pI_n - A) \right) \overline{C}^R = 0, \\
(C - \pi_{3x}(p)(pI_n - A + L(p)C) + \pi_\Sigma(p)L(p)C)\overline{[L_{-1}(p)C]}^R &= 0, \\
\overline{[\pi_\Sigma(p)B]}^L S(p) &= 0, \quad \overline{[\pi_\Sigma(p)B]}^L (C - \pi_\Sigma(p)(pI_n - A)) = 0, \\
\overline{[\pi_\Sigma(p)B]}^L E_y^u(p) &= 0, \quad E_y^w(p)\overline{F}^R = 0.
\end{aligned}$$

Условия разрешимости накладывают ограничения на возможные значения желаемых МПФ и вспомогательных матриц  $\pi_{1x}(p), \pi_{3x}(p)$  и  $\pi_\Sigma(p)$ .

На основе полученных соотношений разработан алгоритм аналитического синтеза, позволяющий формировать полное множество математически точных решений задачи синтеза МСАУ.

**В третьей главе** «Обеспечение каузальности и грубости решений задачи синтеза законов управления многосвязными динамическими объектами» решается проблема обеспечения физической реализуемости синтезируемых законов управления в МСАУ с подчиненным регулированием, в МСАУ с комбинированным регулированием (включая наблюдатель). Также формируются условия, позволяющие оценить внутреннюю устойчивость МСАУ.

Физическая реализуемость (ФР) закона управления подразумевает ФР всех МПФ, входящих в соответствующее уравнение. Для некоторой МПФ  $E(p) = \|e_{ij}(p)\|, i = \overline{1, n}, j = \overline{1, m}$ , где  $e_{ij}(p) = n_{e_{ij}}(p)/d_{e_{ij}}(p)$  это означает выполнение условия  $\deg(d_{e_{ij}}(p)) - \deg(n_{e_{ij}}(p)) \geq 0, \forall i, j$ . В данной главе разрабатываются условия, накладывающие ограничения на структуру желаемых МПФ и некоторых элементов блочной матрицы  $\pi$ , входящих в уравнения синтеза. Выполнение этих

условий позволяет выполнять синтез только физически реализуемых законов управления.

Получение условий ФР базируется на основных положениях метода порядковых отображений (В. И. Васильев, 1983). В данной работе эти положения были дополнены условиями для порядковых отображений левой и правой частей различных видов линейных матричных уравнений (левостороннего, правостороннего и двустороннего).

Сформируем условия ФР для контура управления по состоянию МСАУ со структурой, показанной на рис. 2. Уравнения синтеза контура являются подсистемой системы уравнений (5):

$$\pi_{\Sigma}(p)(pI_n - A) + \pi_{\Sigma}(p)BK_x(p) = C, \quad E_y^u(p) = \pi_{\Sigma}(p)BG(p). \quad (6)$$

Решена задача нахождения таких условий, накладываемых на структуру МПФ  $E_y^u(p)$ ,  $\pi_{\Sigma}(p)$ , выполнение которых обеспечит ФР решения системы уравнений (6). В рамках предлагаемого подхода сформированы две группы условий.

Условия *первой группы* оперируют с порядковыми образами передаточных матриц. Порядковый образ некоторой МПФ  $E(p)$  есть отображение  $\Lambda: \mathcal{A}^{m \times n}(p) \rightarrow \mathcal{L}$ , определяемое как  $\Lambda(E(p)) = \Lambda(\|E_{ij}(p)\|_{m \times n}) = \|\lambda(d_{e_{ij}}(p)) - \lambda(n_{e_{ij}}(p))\|_{m \times n}$ .  $\mathcal{A}^{m \times n}(p)$  – множество дробно-полиномиальных матриц (МПФ),  $\mathcal{L}$  – множество целочисленных матриц,  $\lambda(\bullet)$  – отображение  $\lambda: \mathcal{P}(p) \rightarrow Z^+$ , устанавливающее соответствие каждому полиному из множества  $\mathcal{P}(p)$  одного элемента множества неотрицательных целых чисел  $Z^+$  – порядка данного полинома. Требование ФР передаточных матриц  $K_x(p)$ ,  $G(p)$  выражается в виде равенств

$$\Lambda(K_x(p)) = 0, \quad \Lambda(G(p)) = 0. \quad (7)$$

Для выполнения условий (7) необходимо, чтобы порядковые образы МПФ  $E_y^u(p)$ ,  $\pi_{\Sigma}(p)$  удовлетворяли следующим равенствам:

$$\Lambda(\pi_{\Sigma}(p)) = \Lambda(C(pI_n - A + BK_x(p))^{-1}), \quad \Lambda(E_y^u(p)) = \Lambda(\pi_{\Sigma}(p)BG(p)). \quad (8)$$

При вычислении допустимых порядковых образов по формулам (8) выполняются операции над порядковыми множествами матриц по правилам, принятым на множестве порядковых отображений. При определении порядкового образа матрицы  $\pi_{\Sigma}(p)$  по формуле (8) образ матрицы  $K_x(p)$  принят равным нулевой матрице, согласно (7). Вместе с тем существует наименьший порядковый образ  $\Lambda^{\min}(K_x)$  матрицы  $K_x(p)$  для такого же образа  $\Lambda(\pi_{\Sigma}(p))$ , который определяется по формуле

$$\Lambda^{\min}([K_x(p)]_{kj}) = \max_{1 \leq l \leq m} \{ \min_{1 \leq k \leq n} \{ \Lambda([\pi_{\Sigma}(p)B]_{lk}) \} - \Lambda([\pi_{\Sigma}(p)B]_{lk}) \}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (9)$$

Необходимым является условие неотрицательности всех элементов наименьшего образа, т.е.

$$\Lambda^{\min}(K_x(p)) \geq 0. \quad (10)$$

При невыполнении этого условия специальным образом корректируется образ матрицы  $K_x(p)$ .

В работе показано, что для первого уравнения в (6) имеет место неравенство

$$\Lambda(\pi_{\Sigma}(p)BK_x(p)) \geq \Lambda(C - \pi_{\Sigma}(p)(pI_n - A)),$$

т.е. выполнения первой группы условий недостаточно. В этом случае формируется *вторая группа* условий, накладывающая ограничения на значения некоторых коэффициентов полиномов в числителях и знаменателях элементов МПФ

$\pi_{\Sigma}(p)$ . Представим МПФ  $\pi_{\Sigma}(p)$  в виде  $\pi_{\Sigma}(p) = \frac{1}{d_{\pi}(p)} \|n_{\pi}(p)\|_{m \times n}$ , где  $d_{\pi}(p)$  – наи-

большее общее кратное (НОК) матрицы  $\pi_{\Sigma}(p)$ ;  $n_{\pi_{kj}}(p) = \sum_{l=0}^{\lambda(n_{\pi_{kj}}(p))} s_{\pi_{kjl}} p^l$ ,  $k = \overline{1, m}, j = \overline{1, n}$ .

Строгое равенство порядковых образов левой и правой частей первого уравнения в (6) может быть достигнуто приравниванием нулю необходимого числа коэффициентов при старших степенях  $p$  в полиномах числителей элементов правой части уравнения.

В результате формируется линейное матричное уравнение общего вида

$$Zq = v$$

относительно вектора  $q$ , составленного из искоемых коэффициентов  $s_{\pi_{kjl}}$  полиномов МПФ  $\pi_{\Sigma}(p)$ .  $Z$  и  $v$  – соответственно матрица и вектор известных числовых коэффициентов. Применение метода канонизации для решения этого уравнения позволяет получить полное множество решений в параметризованном виде, а именно, в виде совокупности некоторых равенств. Эти равенства и составляют вторую группу условий обеспечения ФР МПФ  $K_x(p)$ .

В данной главе также рассматривается вопрос исследования внутренней устойчивости МСАУ. Внутренняя неустойчивость, как правило, является следствием наличия в структуре МСАУ компонентов, содержащих неминимально-фазовые полюсы и нули передачи, которые взаимно сокращаются. В результате анализа внутренней устойчивости рассматриваемых в работе структур МСАУ сформированы условия, выполнение которых гарантирует внутреннюю устойчивость МСАУ. Важнейшим из них является требование отсутствия неминимально-фазовых системных нулей передачи в объекте управления. В случае невыполнения данного требования возможна модификация модели объекта управления с целью коррекции его системных передаточных нулей.

**В четвертой главе**, на основе результатов, полученных в предыдущих двух главах, разработаны инженерные методики аналитического конструирования САУ многосвязными техническими объектами с подчиненным регулированием, с комбинированным регулированием, а также наблюдающего устройства состояния и внешних возмущений. Далее на основе предложенных методик выполнено решение практической задачи проектирования двухконтурной МСАУ трехмассовым электромеханическим объектом с упругими связями.

Назначением разработанных инженерных методик является адаптация формальных методов аналитического синтеза к проблемам практической реализации синтезируемых законов управления. Для этого в методиках применяется изложенный в третьей главе подход по обеспечению физической реализуемости решений задач синтеза. В работе предлагаемые методики представлены в виде пошаговых алгоритмов, что упрощает их программную реализацию в средах символьных и матричных вычислений (MATLAB). Обобщенный алгоритм

инженерных методик представлен на рис. 3. В ходе выполнения этапов алгоритма осуществляется последовательное сужение множеств допустимых желаемых МПФ до подмножеств, выбор элементов которых гарантирует получение физически реализуемых законов управления.

При необходимости, для упрощения реализации результатов синтеза может выполняться аппроксимация моделей элементов МСАУ известными методами. Качество спроектированной МСАУ оценивается путем имитационного моделирования.

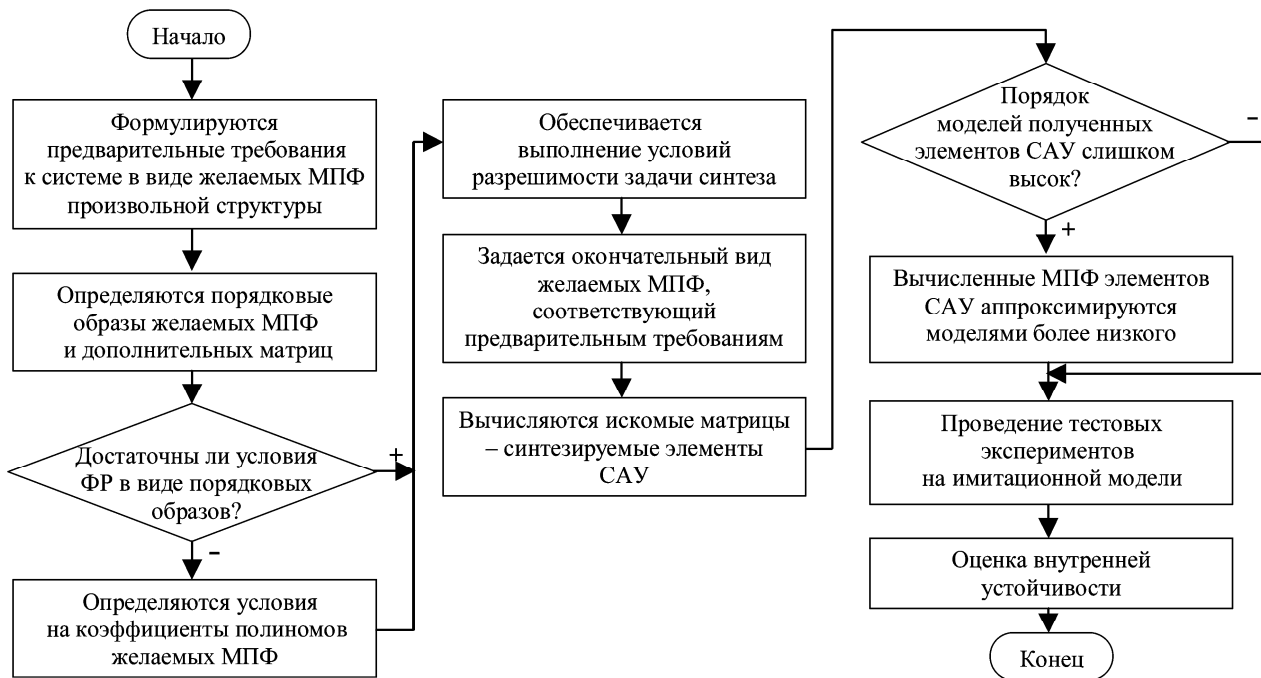


Рисунок 3 – Блок-схема обобщенного алгоритма методик аналитического конструирования МСАУ.

Адекватность и эффективность разработанных методик иллюстрируется при решении задачи аналитического конструирования комбинированной МСАУ рабочими движениями в обрабатывающем центре. Взаимосвязанными рабочими движениями являются движение продольной подачи и вращение привода главного движения (шпинделя) при выполнении операций сверления, растачивания. Взаимосвязь движений осуществляется через обрабатываемую деталь и инструмент. Вектор регулируемых (выходных) параметров составляют величина продольного перемещения  $s$  и частота вращения шпинделя  $\omega_2$ . Управляющими величинами являются напряжения  $u_1$  и  $u_2$  на входах силовых преобразователей электроприводов продольного и вращательного рабочих движений соответственно. В качестве внешних возмущающих воздействий  $w$  рассматриваются колебания моментов сопротивления  $\Delta M_{c1}$  и  $\Delta M_{c2}$ , приведенных к валам электродвигателей.

Требования к качеству процессов в МСАУ определены для вынужденного движения замкнутой системы по управлению и по внешнему возмущению. В качестве предварительных требований обозначены: развязка каналов управления, время переходных процессов не более  $0,2c.$ , эффективное подавление воз-

мущений в системе. Данные требования в ходе уточнения были формализованы в виде желаемых МПФ

$$E_y^u(p) = \begin{bmatrix} \frac{91125}{p^3 + 118.1p^2 + 5314.4} & 0 \\ 0 & \frac{91125}{p^3 + 118.1p^2 + 5314.4} \end{bmatrix},$$

$$E_y^w(p) = \frac{1}{p^6 + 190.8p^5 + 17172p^4 + 9.55 \cdot 10^5 p^3 + 0.34 \cdot 10^8 p^2 + 0.78 \cdot 10^9 p + 0.83 \cdot 10^{10}} \times$$

$$\times \begin{bmatrix} -p(6.99p^3 - 1333p^2 - 112910p - 0.29 \cdot 10^7) & -p(34.94p^2 + 2827p + 20120) \\ p^2(46.175p^2 + 8802p + 288240) & -p^3(17.01p^2 + 3244.2p + 153620) \end{bmatrix}.$$

Для косвенного оценивания состояния объекта и неизмеряемых внешних возмущений  $\Delta M_{c1}$  и  $\Delta M_{c2}$  по разработанной методике синтезирован наблюдатель с астатизмом в канале измерения возмущений.

В результате выполнения этапов соответствующей инженерной методики была спроектирована МСАУ, удовлетворяющая всем сформулированным требованиям. На рис. 4 представлены результаты цифрового моделирования процессов в спроектированной МСАУ при замкнутом и разомкнутом контуре компенсации возмущений.

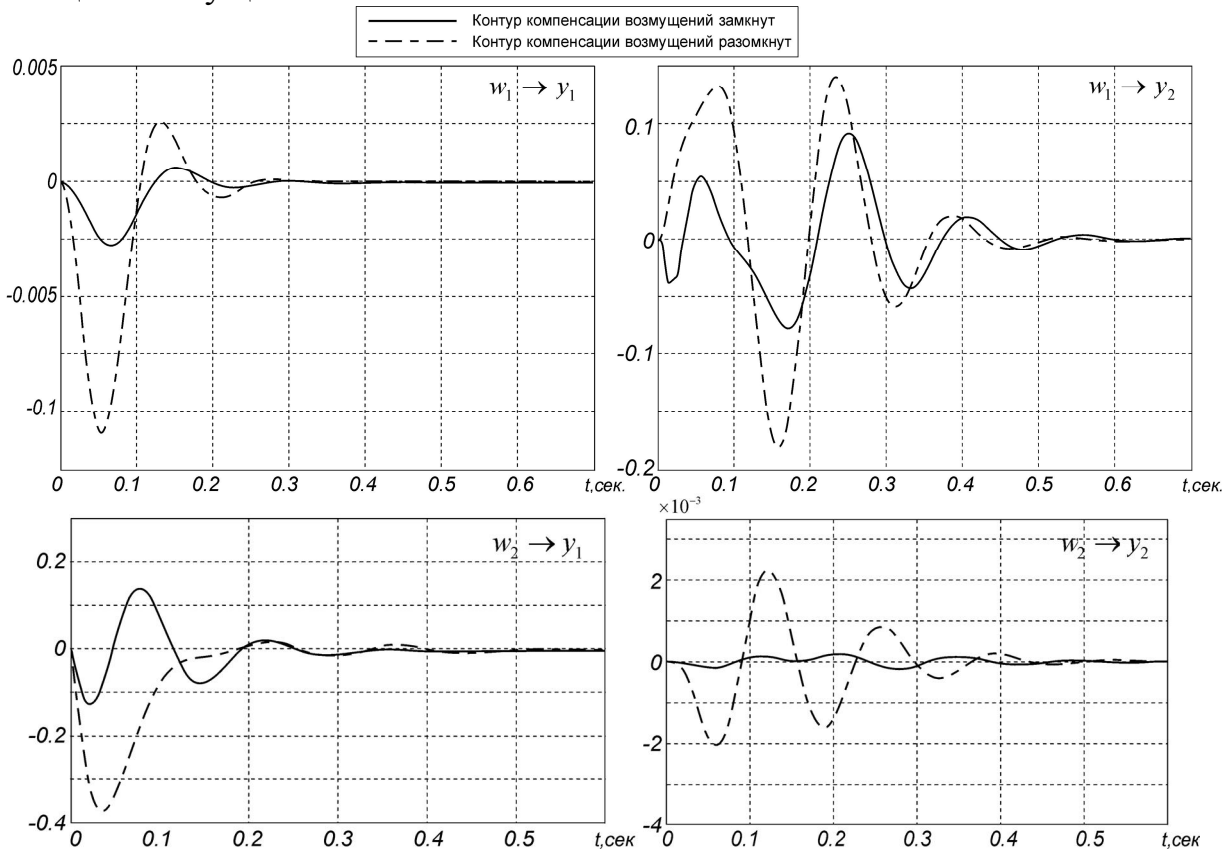


Рисунок 4 – Реакции по выходу спроектированной системы на ступенчатые возмущающие сигналы.

Применение для проектирования МСАУ техническим объектом разработанной инженерной методики позволило, в отличие от модального подхода,

полностью учесть желаемую динамику каждого прямого и перекрестного каналов управления за счет формализации критериев качества МСАУ в форме МПФ. Результатом процедуры аналитического конструирования являются физически реализуемые МПФ элементов САУ, представляющие точное решение задачи синтеза в смысле соответствия характеристик САУ желаемым.

Адекватность разработанных инженерных методик подтверждена также результатами аналитического конструирования МСАУ трехмассовым электромеханическим объектом с упругими связями, а также МСАУ боковым движением летательного аппарата.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ**

1. На основе технологии вложения систем разработаны методы аналитического синтеза двухконтурных МСАУ ЛДО с подчиненным и комбинированным (по оценкам состояния и внешних возмущений объекта) управлением, метод аналитического синтеза астатического наблюдателя состояния и возмущений ЛМДО. Методы предусматривают формализацию требований к качеству законов управления (наблюдения) в форме желаемых МПФ, формирование в аналитическом виде классов эквивалентных точных решений задач синтеза, получение строгих условий существования решения задач синтеза в форме матричных равенств.

2. Разработан комплекс условий, накладываемых на желаемые МПФ в ходе процедуры проектирования элементов МСАУ, выполнение которых обеспечивает физическую реализуемость синтезируемых законов управления (наблюдения). Получение условий основано на положениях метода порядковых отображений, расширенных в данной работе. Получены также условия, позволяющие оценить внутреннюю устойчивость (грубость) спроектированной системы.

3. Разработаны инженерные методики проектирования двухконтурных МСАУ с подчиненным управлением; МСАУ с комбинированным управлением; наблюдателя состояния и внешних возмущений. Методики базируются на методах, алгоритмах решения задач синтеза, полученных в данной работе. Применение аппарата матричной алгебры упрощает практическую реализацию полученных методик с применением современных программных средств матричных и символьных вычислений.

4. Эффективность предложенных в данной работе подходов к аналитическому конструированию двухконтурных МСАУ ЛДО подтверждена на примере проектирования МСАУ электромеханическим техническим объектом. Получены результаты с полным учетом всех важнейших взаимосвязей параметров объекта управления, влияния возмущений, достигнута физическая реализуемость спроектированной МСАУ. Предложенные методики и разработанное программное обеспечение были внедрены на ОАО "КамАЗ" и использованы при проектировании системы управления обрабатывающего центра ИР-800.

5. Разработанные в данной работе методы и алгоритмы аналитического синтеза МСАУ ЛДО могут быть использованы в общей процедуре аналитиче-



ского конструирования адаптивных МСАУ многосвязными нелинейными, нестационарными объектами управления, где роль адаптивных компонентов будет сводиться к компенсации влияния параметрических отклонений и нелинейностей объекта управления.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОПУБЛИКОВАНЫ В РАБОТАХ**

### ***В рецензируемых журналах из списка ВАК***

1. Аналитическое конструирование каузального многосвязного астатического наблюдающего устройства / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2007. № 1. С. 22–26.

2. Алгоритм синтеза многосвязного астатического наблюдающего устройства с учетом условий физической реализуемости / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2007. № 7. С. 9–16.

### ***В других изданиях***

3. Измерительная система в среде MATLAB для построения частотных характеристик моделей / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Ученые записки КГУ (филиал в г. Наб. Челны). Наб. Челны : Камский изд. дом, 2001. Вып. 3. С. 171–178.

4. Исследование нелинейной модели электропривода постоянного тока частотными методами / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Ученые записки КГУ (филиал в г. Наб. Челны). Наб. Челны : Камский изд. дом, 2001. Вып. 3. С. 179–184.

5. Построение частотных характеристик моделей динамических систем в среде MATLAB / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB : тр. I Всерос. науч. конф. М. : ИПУ РАН, 2002. С. 342–355.

6. Модуль частотных измерений в среде Matlab / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Проектирование и исследование технических систем : межвуз. науч. сб. Наб. Челны : Камский гос. политехн. ин-т. 2002. Вып. 1. С. 60–67.

7. Оценивание момента нагрузки электродвигателя постоянного тока без установившейся ошибки / И. З. Ахметзянов // Итоговая науч. конф. за 2002 г. : матер. конф. Наб. Челны : Фил. Казан. гос. ун-та, 2003. С. 103–104.

8. Применение технологии вложения для синтеза многоконтурных динамических систем / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Механика и процессы управления : тр. XXXIII Уральского сем. Екатеринбург : Уральское отделение РАН, 2003. С. 637–646.

9. Синтез астатического наблюдателя состояния методом вложения систем / И. З. Ахметзянов // Проектирование и исследование технических систем : межвуз. науч. сб. Наб. Челны : Камский гос. политехн. ин-т. 2003. Вып. 3. С. 52–57.

10. Синтез двухконтурных многомерных динамических систем методом вложения / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Проектирование и исследование

технических систем : межвуз. науч. сб. Наб. Челны : Камский гос. политехн. ин-т. 2003. Вып. 3. С. 67–72.

11. Синтез системы управления двухмассовым упруговязким объектом на основе технологии вложения систем / И. З. Ахметзянов // Итоговая науч. конф. за 2003 г. : матер. конф. Наб. Челны : Фил. Казан. гос. ун-та, 2004. С. 136–138.

12. Канонизация матриц произвольного размера средствами Matlab / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB : тр. II Всерос. науч. конф. М. : ИПУ РАН, 2004. С. 796–805.

13. Использование метода канонизации для синтеза системы управления многосвязным объектом на основе технологии вложения / И. З. Ахметзянов // Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB : тр. II Всерос. науч. конф. М. : ИПУ РАН, 2004. С. 828–841.

14. Программная реализация процедуры канонизации матрицы произвольного размера / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Проектирование и исследование технических систем : межвуз. науч. сб. Наб. Челны : Камский гос. политехн. ин-т. 2004. Вып. 4. С. 48–55.

15. Модификация алгоритма синтеза астатического наблюдателя с использованием аппроксимации точного решения / И. З. Ахметзянов // Проектирование и исследование технических систем : межвуз. науч. сб. Наб. Челны : Камский гос. политехн. ин-т. 2004. Вып. 5. С. 31–39.

16. Синтез системы автоматического управления динамическим объектом с компенсацией внешних возмущений / И. З. Ахметзянов // Проектирование и исследование технических систем : межвуз. науч. сб. Наб. Челны : Камский гос. политехн. ин-т. 2005. Вып. 6. С. 49–55.

17. Модифицированный алгоритм синтеза астатического наблюдающего устройства / И. З. Ахметзянов // Проектирование и исследование технических систем : межвуз. науч. сб. Наб. Челны : Камский гос. политехн. ин-т. 2005. Вып. 6. С. 56–65.

18. Аналитическое конструирование каузального многосвязного астатического наблюдающего устройства / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Российская авионавтика. Нью-Йорк, США, 2007. Т. 50, № 1. С. 21–29. (Статья на англ. яз.)

19. Синтез САУ многосвязным динамическим объектом с учетом физической реализуемости / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Мехатроника, автоматизация, управление : матер. II Росс. мультikonф. по проблемам управления. СПб : ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 25–28.

20. Достижение физической реализуемости при проектировании САУ многосвязным линейным динамическим объектом / А. З. Асанов, И. З. Ахметзянов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XI Междунар. конф. Самара : СНИЦ РАН, 2009. С. 132–139.

Диссертант



И. З. Ахметзянов

АХМЕТЗЯНОВ Инсур Завдятович

**АНАЛИТИЧЕСКОЕ КОНСТРУИРОВАНИЕ МНОГОСВЯЗНЫХ  
СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ  
ОБЪЕКТАМИ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЛОЖЕНИЯ**

05.13.01 – Системный анализ, управление  
и обработка информации (в промышленности)

**АВТОРЕФЕРАТ**  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Подписано к печати 04.10.2010. Формат 60x84 1/16.  
Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Суг.  
Усл. печ. л. 1,2. Уч.-изд. л. 0,93.  
Тираж 120 экз.

Отпечатано в ГОУ ВПО «Набережночелнинский государственный  
педагогический институт»  
423806 г.Набережные Челны, ул. Низаметдинова, 28