

На правах рукописи

КАРИМОВ Валерий Сергеевич

**СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
МНОГОСВЯЗНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЛОЖЕНИЯ СИСТЕМ**

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

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

Уфа – 2013

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, профессор
АСАНОВ Асхат Замилович,
проф. каф. прикладной математики
и информатики Казанского
(Приволжского) федерального
университета

Официальные оппоненты

д-р техн. наук, проф.
Мунасыпов Рустэм Анварович,
проф. каф. технической кибернетики
Уфимского государственного
авиационного технического
университета

канд. техн. наук, доц.
Гаркушенко Владимир Иванович,
доц. каф. автоматики и управления
Казанского национального
исследовательского технического
университета им. А. Н. Туполева

Ведущая организация

Институт проблем управления
сложными системами РАН,
г. Самара

Защита диссертации состоится 17 апреля 2013 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
при Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке университета

Автореферат разослан 12 марта 2013 г.

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



В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Многие объекты автоматического управления в автомобильной и авиационной технике, машиностроении, нефтяной и металлургической промышленности, такие как дизельные и бензиновые двигатели, газотурбинные двигатели самолетов, приводы станков с числовым программным управлением, химические аппараты по переработке нефти, металлопрокатные станки, содержат временные запаздывания сигналов. Явление временного запаздывания сигналов связано с тем, что при изменении входного сигнала выходной сигнал объекта управления (ОУ) начинает изменяться не сразу, а с некоторой задержкой во времени. Это явление негативно влияет на управление техническими и промышленными объектами (может привести к потере устойчивости системы управления, ухудшению качества переходных процессов и т. д.).

В последнее время с ужесточением требований к работе систем автоматического управления (САУ) стало острой необходимостью учитывать даже незначительные запаздывания в каналах связи объекта. Учет явления запаздывания, которое может отрицательно влиять на процессы управления, позволит повысить качество систем управления. Добавим, что управление объектами с запаздываниями осложнено в случае, если они являются многосвязными. Многосвязными называются объекты с несколькими связанными через объект входными и выходными величинами (один вход влияет на все или несколько выходов объекта).

Степень разработанности темы исследования

Моделирование процессов, происходящих в реальных ОУ с запаздываниями, осуществляется с помощью дифференциальных уравнений с запаздывающим аргументом (дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом), развитием теории которых занимались Л. Э. Эльсгольц, А. Д. Мышкис, С. Б. Норкин, Р. Беллман, К. Кук, В. Б. Колмановский, В. Р. Носов.

К настоящему времени известен ряд работ, посвященных решению проблемы управления многосвязными объектами с сосредоточенными запаздываниями. Однако описанные в них методы синтеза систем управления с запаздываниями не лишены недостатков.

Следует отметить, что недостаточно исследованы системы управления с запаздываниями, локализованными одновременно по входу, состоянию и выходу. Также практически все существующие методы синтеза систем с запаздываниями не дают возможности получения множества решений задач синтеза и дальнейшего выбора из этого множества оптимального.

В данном исследовании для управления многосвязными динамическими объектами с сосредоточенными запаздываниями предлагается применение принципа динамической компенсации запаздываний (цель которого заключается в предварительной компенсации либо исключении запаздываний из контура управления и дальнейшего решения задачи синтеза без учета запаздываний) и нового направления в теории систем, называемого технологией вложения сис-

тем, которая была разработана В. Н. Буковым, В. Н. Рябченко, С. В. Горюновым, В. В. Косьянчуком, Е. Ю. Зыбиным, А. М. Бронниковым, Н. И. Сельвесюком, А. З. Асановым.

Цель и задачи

Цель диссертационной работы состоит в повышении эффективности управления многосвязными техническими объектами на основе новых методов синтеза систем автоматического управления, учитывающих запаздывания в информационных каналах объекта.

Исходя из указанной цели исследований, основными задачами являются:

1. Разработка методов синтеза многосвязных систем автоматического управления, учитывающих компенсацию запаздываний по состоянию, при измеряемом или наблюдаемом векторе состояния.
2. Разработка методов синтеза многосвязных систем автоматического управления, учитывающих запаздывания по управлению, на основе упредителя Смита и компенсационно-наблюдательной схемы.
3. Разработка методов синтеза многосвязных систем автоматического управления, учитывающих компенсацию совокупности запаздываний по состоянию, управлению и/или выходу объекта.
4. Разработка инженерных методик синтеза многосвязных систем автоматического управления техническими объектами с учетом запаздываний.

Методы исследования

Основными методами исследований являются теория матриц, теория автоматического управления, технология вложения систем, аппарат канонизации матриц, принцип динамической компенсации запаздываний, теория дифференциальных уравнений с отклоняющимся аргументом.

Положения, выносимые на защиту

1. Методы синтеза многосвязных систем автоматического управления с запаздываниями по состоянию при измеряемом или наблюдаемом векторе состояния.
2. Методы синтеза многосвязных систем автоматического управления с запаздываниями по управлению на основе упредителя Смита и компенсационно-наблюдательной схемы.
3. Методы синтеза многосвязных систем автоматического управления с совокупностью запаздываний по состоянию, управлению и/или выходу объекта.
4. Инженерные методики синтеза многосвязных систем автоматического управления техническими объектами с запаздываниями.

Научная новизна

1. Новизна разработанных методов синтеза систем автоматического управления с запаздываниями по состоянию при измеряемом или наблюдаемом векторе состояния состоит в учете многосвязности объекта управления, в формировании множества эквивалентных законов управления в аналитической форме и в получении условий существования множества решений задач синтеза до формирования самого решения задачи.

2. Новизна разработанных методов синтеза систем автоматического управления с запаздываниями по управлению на основе многосвязного упреждителя Смита и компенсационно-наблюдательной схемы состоит в том, что они позволяют синтезировать законы управления с несколькими запаздываниями в канале управления объекта, находить расчетные соотношения в аналитической форме для определения классов эквивалентных законов управления и их условий существования.

3. Новизна разработанных методов синтеза многосвязных систем автоматического управления с совокупностью запаздываний по состоянию, управлению и/или выходу объекта состоит в том, что они позволяют находить множество эквивалентных законов управления и формировать условия существования решения задач синтеза в виде матричных тождеств.

4. Новизна предложенных инженерных методик синтеза многосвязных систем автоматического управления техническими объектами с запаздываниями состоит в применении разработанных методов синтеза систем управления с запаздываниями, в учете многосвязности объекта управления, в реализации законов управления на основе желаемых матричных критериев качества системы управления.

Теоретическая и практическая значимость результатов

Теоретическая и практическая значимость результатов, полученных в диссертации, заключается:

1. В разработанных инженерных методиках синтеза многосвязных систем автоматического управления техническими объектами с запаздываниями, позволяющих получить системы управления с заданными показателями качества.

2. В разработанных методах аналитического синтеза многосвязных систем управления с запаздываниями, позволяющих проектировать качественные системы автоматического управления с учетом условий существования множества решений задачи синтеза.

3. В разработке библиотеки программ, позволяющей автоматизировать расчет законов управления по предлагаемым инженерным методикам синтеза систем управления с запаздываниями на ЭВМ.

Внедрение результатов диссертации осуществлено в разработках НТЦ ОАО «Камский автомобильный завод (КамАЗ)» (г. Набережные Челны) в области проектирования систем управления сложным технологическим оборудованием, в области проектирования бортовых систем управления и диагностики автомобилей. Методы синтеза систем управления многосвязными объектами с запаздываниями используются в учебном процессе на факультете прикладной математики и информационных технологий филиала КФУ в г. Набережные Челны.

Связь темы исследования с научными программами

Работа выполнена на кафедре прикладной математики и информатики филиала КФУ в г. Набережные Челны в рамках грантов РФФИ № 08-08-00536, № 11-08-00311, в рамках г/б НИР рег. № 01200952946, № 01201054781.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность результатов исследования подтверждается соответствием между желаемыми и полученными характеристиками при проектировании систем управления по результатам цифрового имитационного моделирования.

Основные результаты настоящей диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Мехатроника, Автоматизация, Управление» (Санкт-Петербург, 2008); X, XII, XIII, XIV Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2008, 2010, 2011, 2012); VIII Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'09 (Москва, 2009); III Всероссийская научная конференция «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» (Санкт-Петербург, 2007); XIII, XIV, XV Международная молодежная научная конференция «Туполевские чтения» (Казань, 2005-2007); Республиканская научная конференция «Наука, технологии и коммуникации в современном обществе» (Набережные Челны, 2008–2012).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 23 печатные работы, в том числе 6 статей, из них 3 – в изданиях, входящих в список ВАК, 17 публикаций в сборниках трудов конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 98 наименований и приложений. Основная часть работы (без библиографического списка и приложений) изложена на 153 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении приведена общая характеристика работы: цель исследования, актуальность решаемых задач, определяется научная новизна и практическая значимость защищаемых результатов.

В первой главе приведен обзор существующих методов синтеза многосвязных систем управления с запаздываниями, рассматривается принцип динамической компенсации запаздываний. Обсуждается проблема управления объектами с запаздываниями и формулируется постановка задачи исследований.

Большая часть исследований по управлению объектами с запаздываниями проводилась на односвязных объектах, однако не меньший интерес представляют собой многосвязные объекты с запаздываниями. Проблемой управления многосвязными объектами с запаздываниями занимались следующие авторы: Г. Е. Пухов и К. Д. Жук, Г. Алевисакис и Д. Е. Себорг, Р. Т. Янушевский, А. С. Ключев и В. С. Карпов, А. Б. Филимонов, А. Фосард, Б. Г. Ильясов и др. Сложность управления такими объектами обусловлена наличием перекрестных связей в объектах управления, количеством входов и выходов объекта больше одного, количеством запаздываний, как правило, больше одного, и сосредото-

чением запаздываний в разных векторах объекта (по входу, состоянию, выходу). Другой особенностью управления объектами с запаздываниями является то, что применять методы синтеза желательно только к устойчивым объектам, так как в противном случае реализация практически любого закона управления может привести к неустойчивости всей системы управления.

Методы синтеза многосвязных систем с запаздываниями, основанные на принципе динамической компенсации запаздываний, используются в основном в системах управления с упредителем Смита, который наиболее часто применяется в системах с запаздываниями по входу. Система управления была разработана О. Дж. Смитом для объекта с одним входом и выходом, но в дальнейшем были предложены ее различные модификации для многосвязных систем. Однако регулирование в схемах с упредителем Смита осуществляется фактически по разомкнутому циклу, причем объект управления не должен быть неустойчивым и слабодемпфированным.

Методы модального синтеза систем управления для многосвязных объектов с запаздываниями, не позволяют получить удовлетворительных результатов. Помимо этого при их использовании необходимо, чтобы фазовый вектор объекта был полностью доступен для измерения. Исключением является метод синтеза, основанный на модальном методе в совокупности с методом спектральной компенсации запаздываний. Однако при его применении необходим наблюдатель в случае использования динамического регулятора.

Следующая группа методов синтеза систем управления объектами с запаздываниями основана на компенсации временных запаздываний при оптимальном управлении. В них используется подход, предложенный Р. Бэссом, который подробно рассматривался Р. Т. Янушевским. Однако, в случае применения этих методов при некоторых начальных условиях движение в системе становится неоптимальным и возрастает время переходного процесса. При этом отклонения фазовой траектории от оптимальной могут быть существенны, и оценить их разницу заранее сложно. Поэтому на практике применяют квазиоптимальные алгоритмы управления, в основе которых лежит линейная аппроксимация поверхности переключения вблизи начала координат фазового пространства. При этом, все же не удается полностью скомпенсировать влияние запаздывания на динамику системы, хотя амплитуда возникающих автоколебаний значительно уменьшается по сравнению с некомпенсированной системой.

При построении систем автоматического управления с запаздываниями возможно применение приближенных методов, таких как аппроксимация звена запаздывания рядом Паде, аппроксимация набором апериодических звеньев или рядом Тейлора. После аппроксимации решают задачу управления любым из известных классических способов. Однако все из вышеперечисленных методов аппроксимации имеют общие недостатки при синтезе систем автоматического управления: звено запаздывания заменяется аппроксимирующим выражением с некоторой долей погрешности, которая зачастую отрицательно сказывается на качестве управления; происходит усложнение МПФ объекта

управления, что в дальнейшем при синтезе регуляторов ведет к вычислительным затруднениям.

Методы синтеза систем управления с запаздываниями, основанные на применении нейросетевых технологий, дают удовлетворительный результат при решении задач управления. Однако существенным ограничением этих методов является относительно длительное обучение нейронной сети.

Таким образом, все известные на данный момент методы синтеза систем управления имеют ряд недостатков, затрудняющих их практическое применение. Следовательно, необходима разработка новых, более совершенных методов синтеза систем автоматического управления, в которых эти недостатки были бы исключены.

Во второй главе рассмотрены вопросы синтеза многосвязных систем автоматического управления с запаздываниями по состоянию и с запаздываниями по управлению.

В методе синтеза многосвязных САУ с запаздываниями по состоянию при измеряемом векторе состояния в качестве объекта управления рассматривается модель с запаздываниями в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^l A_i x(t - \tau_i) + Bu(t), \quad y(t) = Cx(t), \quad (1)$$

где $\tau_0 = 0$, $0 < \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_l$ – постоянные времена запаздываний, $i = 0, 1, \dots, l$, $u(t) \in R^s$ – вектор входных переменных, $y(t) \in R^m$ – вектор выходных переменных, $x(t) \in R^n$ – фазовый вектор объекта управления, A_i, B, C, D – матрицы постоянных коэффициентов.

Задача синтеза в данном случае заключается в поиске МПФ предкомпенсатора $G(p)$ и регулятора $K(p)$ или условий, их определяющих, при которых поведение САУ (рисунок 1) будет описываться желаемыми матричными передаточными функциями $E_y^{\phi_x}(p)$ и/или $E_y^g(p)$.

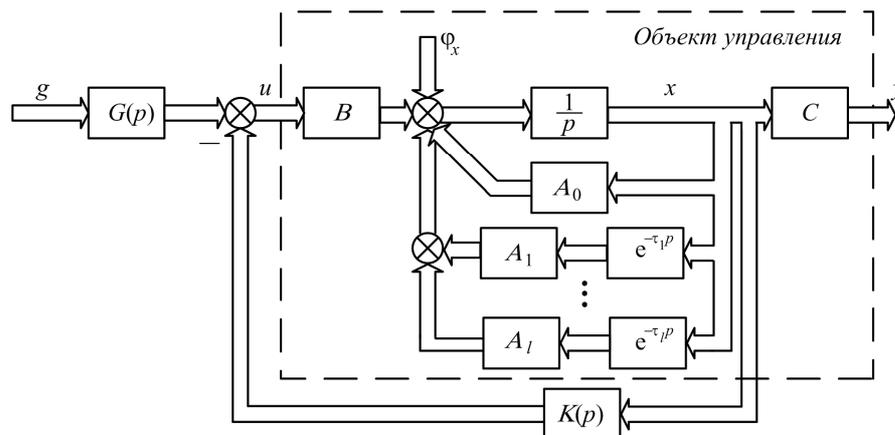


Рисунок 1 – Система автоматического управления с запаздываниями

Данная задача решается путем последовательного выполнения ряда этапов, предусмотренных технологией вложения систем. Выполнение этапов этих аналогично для методов, предлагаемых в данном исследовании, поэтому огра-

начимся рассмотрением реализацией метода синтеза системы управления объектом с запаздываниями по состоянию.

Сформируем проблемную матрицу (проматрицу) задачи, включающую все известные и искомые звенья системы:

$$\Omega(p) = \begin{bmatrix} pI_n - (A_0 + A_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + A_l e^{-\tau_l p}) & 0 & -B & 0 \\ -C & I_m & 0 & 0 \\ K(p) & 0 & I_s & -G(p) \\ 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}, \quad (2)$$

где I_s – единичная матрица размера s . Далее определим матрицы вложения α и β , используемые при вложении системы в образ синтезируемой системы ω (желаемая передаточная функция системы) согласно тождеству вложения $\beta\Omega^{-1}\alpha = \omega$:

$$\alpha = [I_n \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad \beta = [0 \ I_m \ 0 \ 0] \quad \text{при } \omega = E_y^{\varphi_x}(p); \quad (3)$$

$$\alpha = [0 \ 0 \ 0 \ I_s]^T, \quad \beta = [0 \ I_m \ 0 \ 0] \quad \text{при } \omega = E_y^g(p); \quad (4)$$

$$\alpha = \begin{bmatrix} I_n & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & I_s \end{bmatrix}^T, \quad \beta = [0 \ I_m \ 0 \ 0] \quad \text{при } \omega = [E_y^g(p) \ E_y^{\varphi_x}(p)]. \quad (5)$$

После выполнения процедур технологии вложения – последовательной факторизации матриц по формулам:

$$\Omega = \Sigma \Xi, \quad \alpha = \Sigma \delta, \quad \beta = \pi \Xi, \quad \omega = \pi \delta, \quad (6)$$

(δ , π – некоторые блочные матрицы с неизвестными элементами) можно получить уравнения, которым должны удовлетворять МПФ предкомпенсатора $G(p)$ и регулятора $K(p)$, для трех случаев: при синтезе по свободной составляющей $E_y^{\varphi_x}(p)$, при синтезе по вынужденной составляющей $E_y^g(p)$, при синтезе по свободной $E_y^{\varphi_x}(p)$ и вынужденной $E_y^g(p)$ составляющим движения замкнутой динамической системы. Для решения матричных уравнений, которые получаются в результате применения процедур вложения, применяется аппарат канонизации матриц. Результирующим решением будет являться следующая совокупность множеств регуляторов и предкомпенсаторов с произвольными дробно-полиномиальными матрицами $\mu(p)$, $\vartheta(p)$, $\xi(p)$, $\lambda(p)$, $\kappa(p)$, $\eta(p)$ соответствующих размеров:

1. При синтезе по свободной составляющей движения замкнутой динамической системы $E_y^{\varphi_x}(p)$.

$$\{K(p)\}_\mu = (E_y^{\varphi_x}(p)B) \tilde{\sim} (C - E_y^{\varphi_x}(p)(pI_n - (A_0 + A_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + A_l e^{-\tau_l p}))) + \overline{E_y^{\varphi_x}(p)B}^R \mu(p). \quad (7)$$

2. При синтезе по вынужденной составляющей движения замкнутой динамической системы $E_y^g(p)$.

$$\begin{aligned} \{K(p)\}_{T,\lambda,\vartheta} &= B \tilde{\left(T^{-1}(p) \begin{bmatrix} C^{\sim L} C \\ \lambda(p) \end{bmatrix} - (pI_n - (A_0 + A_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + A_l e^{-\tau_l p})) \right) + \overline{B}^R \vartheta(p), \\ \{G(p)\}_{N,\xi,\kappa} &= B \tilde{N}^{-1}(p) \begin{bmatrix} E_y^g(p)^{\sim L} E_y^g(p) \\ \kappa(p) \end{bmatrix} + \overline{B}^R \xi(p). \end{aligned} \quad (8)$$

3. При синтезе по свободной $E_y^{\varphi_x}(p)$ и вынужденной $E_y^g(p)$ составляющим движения замкнутой динамической системы.

$$\begin{aligned} \{K(p)\}_{\mu} &= (E_y^{\varphi_x}(p)B) \tilde{(C - E_y^{\varphi_x}(p)(pI_n - (A_0 + A_1 e^{-\tau_1 p} + \dots + A_l e^{-\tau_l p}))} + \overline{E_y^{\varphi_x}(p)B}^R \mu(p), \\ \{G(p)\}_{\eta} &= (E_y^{\varphi_x}(p)B) \tilde{E_y^g(p)} + \overline{E_y^{\varphi_x}(p)B}^R \eta(p). \end{aligned} \quad (9)$$

Для каждого из случаев были сформулированы условия разрешимости, выполнение которых необходимо и достаточно для существования решений (или единственного решения) уравнений (7), (8) и (9).

На основе полученных соотношений был разработан алгоритм аналитического синтеза системы управления объектом с запаздываниями по состоянию, позволяющий получить аналитическое решение задачи синтеза, компенсировать запаздывания по состоянию, проверять условия разрешимости задачи синтеза до ее решения и формировать множество эквивалентных решений.

Обсуждались частные случаи синтеза многосвязных САУ с запаздываниями по состоянию при матрице выхода C , равной матрице C_x , и при $C = I_n$ с матрицей состояния $A_0 + A_1 W_e$ (W_e – матрица запаздываний, I_n – единичная матрица размера n).

В следующем методе синтеза систем автоматического управления с запаздываниями по состоянию с наблюдаемым вектором состояния рассматривается модель ОУ (1). Так как фазовый вектор состояния объекта недоступен для измерения, то для его воспроизведения применяется наблюдатель полного порядка:

$$\hat{\dot{x}}(t) = \sum_{i=0}^l A_i \hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)), \quad \hat{y}(t) = C\hat{x}(t), \quad (10)$$

где $\hat{x}(t)$ – вектор состояния наблюдающего устройства, $\hat{y}(t)$ – вектор выхода наблюдающего устройства, L – матрица наблюдателя.

После последовательного выполнения процедур технологии вложения было получено множество регуляторов:

$$\begin{aligned} \{K(p)\}_{\mu,\eta} &= (E_y^v(p)) \tilde{\left[C(pI_n - \sum_{i=0}^l A_i e^{-\tau_i p})^{-1} B - E_y^v(p) \right] \left((pI_n - \sum_{i=0}^l A_i)^{-1} B \right) \tilde{+} \\ &+ \overline{E_y^v(p)}^R \mu(p) + \eta(p) \left((pI_n - \sum_{i=0}^l A_i)^{-1} B \right), \end{aligned} \quad (11)$$

удовлетворяющих закону управления:

$$v(p) = K(p)\hat{x}(p) + u(p), \quad (12)$$

где $v(p)$ – управляющие сигналы на входе системы.

Был проведен синтез системы с одним запаздыванием по управлению по технологии вложения систем. В результате получены уравнения для множеств предкомпенсаторов и регуляторов, содержащих упреждающее звено e^p , кото-

рое можно аппроксимировать, разложив, например, в ряд Тейлора. Однако даже после разложения e^p в ряд качество системы управления получается весьма низким.

В методе синтеза систем, содержащих запаздывания по управлению, для решения задачи синтеза кроме технологии вложения систем был использован упредитель Смита, работа которого основана на принципе динамической компенсации запаздывания. Упредитель Смита был применен для тех случаев, когда в объекте ни один сигнал, не содержащий запаздывания, не доступен для измерения, причем сам объект управления содержит запаздывания только по входу.

В этом методе в качестве объекта управления рассматривается следующая модель с запаздываниями по входу в пространстве состояний:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + B[u_1(t-\tau_1) \ u_2(t-\tau_2) \ \dots \ u_s(t-\tau_s)]^T + x_0(t), \quad x(t_0) = x_0, \quad x(t) \in R^n, \quad u(t) \in R^s, \\ y(t) &= Cx(t) + D[u_1(t-\tau_1) \ u_2(t-\tau_2) \ \dots \ u_s(t-\tau_s)]^T, \quad y(t) \in R^m. \end{aligned} \quad (13)$$

Модифицированный упредитель Смита для многосвязного случая содержит модель объекта управления с запаздываниями (14) и без запаздываний соответственно (15):

$$\begin{aligned} \dot{x}_M(t) &= Ax_M(t) + B[u_1(t-\tau_1) \ u_2(t-\tau_2) \ \dots \ u_s(t-\tau_s)]^T + x_{0M}(t), \quad x_M(t_0) = x_{0M}, \quad x_M \in R^n, \\ y_M(t) &= Cx_M(t) + D[u_1(t-\tau_1) \ u_2(t-\tau_2) \ \dots \ u_s(t-\tau_s)]^T, \quad y_M \in R^m, \end{aligned} \quad (14)$$

где $x_M(t)$ – вектор состояния модели объекта с запаздываниями, $y_M(t)$ – вектор выхода модели объекта с запаздываниями, x_{0M} – вектор начальных условий модели объекта с запаздываниями,

$$\begin{aligned} x_1(t) &= Ax_1(t) + Bu(t) + x_{01}(t), \quad x_1(t_0) = x_{01}, \quad x_1 \in R^n, \\ y_1(t) &= Cx_1(t) + Du(t), \quad y_1 \in R^m, \end{aligned} \quad (15)$$

где $x_1(t)$ – вектор состояния модели объекта без запаздываний, $y_1(t)$ – вектор выхода модели объекта без запаздываний, x_{01} – вектор начальных условий модели объекта без запаздываний.

В результате выполнения этапов технологии вложения систем были получены компенсаторы и условия существования множества решений для нескольких случаев синтеза: синтез по свободной составляющей, вынужденной, по свободной и вынужденной составляющим движения замкнутой системы управления. Разработанный метод отличается тем, что при его применении получается ограниченное множество решений задачи синтеза, а также тем, что с помощью полученных условий существования можно проверить разрешимость задачи синтеза без решения самой задачи.

В следующем методе синтеза САУ для многосвязных объектов с запаздываниями по управлению рассматривался объект с недоступным непосредственному наблюдению фазовым вектором состояния. В качестве объекта управления рассматривается следующая модель с запаздываниями по входу в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + \sum_{i=0}^r B_i u(t-\tau_i), \quad y(t) = Cx(t) + \sum_{i=0}^r D_i u(t-\tau_i). \quad (16)$$

Задача управления в данном случае состоит из двух частей:

1. Компенсация запаздываний по управлению путем построения компенсационно-наблюдательной схемы, вычисляющей текущий фазовый вектор $x(t)$ объекта по информации о сигналах $u(t)$ и $y(t)$.

2. Поиск МПФ регулятора $K(p)$ или условий, ее определяющих, при которой поведение САУ будет описываться желаемой матричной передаточной функцией $E_y^v(p)$.

Предлагаемая схема наблюдения, содержащая модель объекта, была представлена уравнениями:

$$\begin{aligned} \dot{x}_m(t) &= Ax_m(t) + \sum_{i=0}^r B_i u(t - \tau_i), \quad y_m(t) = LCx_m(t) + L \sum_{i=0}^r D_i u(t - \tau_i), \\ \hat{x}(t) &= A\hat{x}(t) + Ly(t) - y_m(t) + \sum_{i=0}^r B_i u(t), \end{aligned} \quad (17)$$

где $\hat{x}(t)$ – фазовый вектор состояния наблюдателя, $x_m(t)$ – фазовый вектор состояния модели объекта, $y_m(t)$ – вектор выхода модели объекта, L – матрица наблюдателя, определяемая проектировщиком.

В результате синтеза системы управления по вынужденной составляющей движения замкнутой динамической системы получилось следующее множество решений регуляторов:

$$\begin{aligned} \{K(p)\}_{\mu, \eta} &= E_y^v(p) [C(pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^r B_i e^{-\tau_i p} + \sum_{i=0}^r D_i e^{-\tau_i p} - E_y^v(p)] \times \\ &\times ((pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^r B_i)^{\sim} + \overline{E_y^v(p)}^R \mu(p) + \eta(p) (pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^r B_i. \end{aligned} \quad (18)$$

и условия их существования:

$$\begin{aligned} \overline{E_y^v(p)}^L [C(pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^r B_i e^{-\tau_i p} + \sum_{i=0}^r D_i e^{-\tau_i p} - E_y^v(p)] &= 0, \\ [C(pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^r B_i e^{-\tau_i p} + \sum_{i=0}^r D_i e^{-\tau_i p} - E_y^v(p)] ((pI_n - A)^{-1} \sum_{i=0}^r B_i) &= 0. \end{aligned} \quad (19)$$

На основе полученных соотношений был разработан алгоритм аналитического синтеза системы управления объектом с запаздываниями по управлению с компенсационно-наблюдательной схемой, позволяющий получить аналитическое решение задачи синтеза и формировать множество эквивалентных решений.

В третьей главе были разработаны методы синтеза систем управления для многосвязных объектов управления с комплексными запаздываниями (с запаздываниями, сосредоточенными в разных каналах объекта). В первом методе рассматривался объект управления, имеющий запаздывания по управлению и состоянию, во втором – по состоянию и выходу, и в третьем – по управлению, состоянию и выходу.

Каждый из методов синтеза позволяет найти множество решений для регуляторов и предкомпенсаторов и обладает возможностью проверки разрешимости задачи синтеза до получения результата решения задачи. Условия суще-

ствования этих решений были выведены для трех случаев синтеза: по свободной составляющей $E_y^{\phi_x}(p)$, по вынужденной составляющей $E_y^g(p)$, по свободной $E_y^{\phi_x}(p)$ и вынужденной $E_y^g(p)$ составляющим движения замкнутой динамической системы.

В методе синтеза систем управления для многосвязных объектов с запаздываниями по управлению и состоянию в качестве объекта управления рассматривается следующая модель в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^l A_i x(t - \tau_i) + \sum_{j=0}^r B_j u(t - \theta_j), \quad y(t) = Cx(t), \quad (20)$$

где $\tau_0 = 0$, $0 < \tau_1, \tau_2, \dots, \tau_l$ – постоянные времена запаздываний при матрицах A_i , $\theta_0 = 0$, $0 < \theta_1, \theta_2, \dots, \theta_r$ – постоянные времена запаздываний при матрицах B_j , $i = 0, 1, \dots, l$, $j = 0, 1, \dots, r$.

Процесс реализации закона управления происходит в два этапа: сначала компенсируются запаздывания по управлению, а затем проводится построение системы автоматического управления с запаздываниями по состоянию с помощью технологии вложения систем. Компенсация запаздываний по управлению осуществляется с помощью параллельного присоединения к объекту контура, компенсирующего запаздывания по входу и представленного в виде МПФ:

$$R(p) = C(pI_n - \sum_{i=0}^l A_i e^{-\tau_i p})^{-1} (\sum_{j=0}^r B_j - \sum_{j=0}^r B_j e^{-\theta_j p}). \quad (21)$$

В методе синтеза систем управления для многосвязных объектов с запаздываниями по состоянию и выходу в качестве объекта управления рассматривается следующая модель в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^l A_i x(t - \tau_i) + Bu(t), \quad y(t) = \sum_{i=0}^l C_i x(t - \tau_i). \quad (22)$$

После применения этапов технологии вложения систем получаются следующие множества регуляторов и предкомпенсаторов для трех случаев:

1. При синтезе по свободной составляющей движения замкнутой динамической системы $E_y^{\phi_x}(p)$.

$$\{K(p)\}_{\mu} = (E_y^{\phi_x}(p)B) \tilde{\sim} \left(\sum_{i=0}^l C_i e^{-\tau_i p} - E_y^{\phi_x}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^l A_i e^{-\tau_i p}) \right) + \overline{E_y^{\phi_x}(p)B}^R \mu(p). \quad (23)$$

2. При синтезе по вынужденной составляющей движения замкнутой динамической системы $E_y^g(p)$.

$$\begin{aligned} \{K(p)\}_{T, \lambda, \vartheta} &= B \tilde{\sim} \left(T^{-1}(p) \left[\left(\sum_{i=0}^l C_i e^{-\tau_i p} \right) \tilde{\sim}^L \sum_{i=0}^l C_i e^{-\tau_i p} \right] - (pI_n - \sum_{i=0}^l A_i e^{-\tau_i p}) \right) + \overline{B}^R \vartheta(p), \\ \{G(p)\}_{N, \xi, \kappa} &= B \tilde{\sim} N^{-1}(p) \left[\begin{array}{c} E_y^g(p) \tilde{\sim}^L E_y^g(p) \\ \kappa(p) \end{array} \right] + \overline{B}^R \xi(p). \end{aligned} \quad (24)$$

3. При синтезе по свободной $E_y^{\phi_x}(p)$ и вынужденной $E_y^g(p)$ составляющим движения замкнутой динамической системы.

$$\begin{aligned} \{K(p)\}_{\mu} &= (E_y^{\varphi_x}(p)B) \tilde{\sim} \left(\sum_{i=0}^l C_i e^{-\tau_i p} - E_y^{\varphi_x}(p)(pI_n - \sum_{i=0}^l A_i e^{-\tau_i p}) \right) + \overline{E_y^{\varphi_x}(p)B}^R \mu(p), \\ \{G(p)\}_{\eta} &= (E_y^{\varphi_x}(p)B) \tilde{\sim} \overline{E_y^s(p) + E_y^{\varphi_x}(p)B}^R \eta(p). \end{aligned} \quad (25)$$

В методе синтеза систем управления для многосвязных объектов с запаздываниями по управлению, состоянию и выходу в качестве объекта управления рассматривается следующая модель в пространстве состояний:

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=0}^l A_i x(t - \tau_i) + \sum_{j=0}^r B_j u(t - \theta_j), \quad y(t) = \sum_{i=0}^l C_i x(t - \tau_i). \quad (26)$$

Аналогично методу синтеза САУ с запаздываниями по управлению и состоянию сначала компенсируются запаздывания по управлению и выходу, а затем проводится построение системы автоматического управления с запаздываниями по состоянию с помощью технологии вложения систем. Компенсация запаздываний по управлению и выходу осуществляется с помощью параллельного присоединения к объекту контуров, компенсирующих запаздывания по входу и выходу, и представленных в виде МПФ:

$$\begin{aligned} R(p) &= \sum_{i=0}^l C_i e^{-\tau_i p} (pI_n - \sum_{i=0}^l A_i e^{-\tau_i p})^{-1} \left(\sum_{j=0}^r B_j - \sum_{j=0}^r B_j e^{-\theta_j p} \right), \\ H(p) &= \left(\sum_{i=0}^l C_i - \sum_{i=0}^l C_i e^{-\tau_i p} \right) (pI_n - \sum_{i=0}^l A_i e^{-\tau_i p})^{-1} \sum_{j=0}^r B_j. \end{aligned} \quad (27)$$

После применения этапов технологии вложения систем получают множество регуляторов и предкомпенсаторов для трех случаев.

В конце главы было сформулировано предположение, что матричная передаточная функция, содержащая запаздывания может быть физически реализована, если степень ее старшего члена числителя $P_{0,jk}(p)$ не превышает степени ее аналогичного члена знаменателя $Q_{0,jk}(p)$ каждого элемента матричной функции, где $j = 1, 2, \dots, n$, $k = 1, 2, \dots, m$.

В четвертой главе разработаны инженерные методики синтеза САУ объектом с запаздываниями по управлению и состоянию, синтеза САУ объектом с запаздываниями по входу с использованием компенсационно-наблюдательной схемы, синтеза САУ многосвязным объектом с запаздываниями по состоянию. Они основаны на теоретических результатах, полученных во второй и третьей главах диссертации.

Эффективность разработанных методик иллюстрируется при решении задачи синтеза САУ лазерным технологическим комплексом (ЛТК). ЛТК является сложным многосвязным объектом с размером матрицы состояния A 18×18 . При подаче сигналов на приводы X и Y наблюдается явление запаздывания, связанное с задержкой сигналов в приводах управления. Кроме этого явление запаздывания можно наблюдать при регулировке фазового напряжения в контуре регулирования мощности фазового резонатора. Управляющими величинами являются напряжения U_x , U_y , которые подаются на приводы для управления перемещениями оптической системы и стола по координатам X и Y соответственно, $\sim U$ – напряжение, подаваемое на блок питания, напряжение $U'_{\text{босл}}$, необходимое для регулирования сигналов внутреннего контура. Предполагается,

что весь вектор состояния САУ ЛТК доступен для непосредственного наблюдения.

Желаемое поведение САУ задается МПФ исходя из следующих соображений: запаздывания по управлению и состоянию должны быть скомпенсированы, быстродействие системы по полюсам p_1 , p_4 и каналу 46 должно быть увеличено до 30 %. В результате выполнения этапов соответствующей инженерной методики была получена система, полностью удовлетворяющая заданному желаемому поведению. На рисунке 2 представлены результаты цифрового моделирования процессов, происходящих в САУ ЛТК, полученной по инженерной методике, и в САУ, синтезированной классическим методом при замене звеньев запаздывания Паде аппроксимацией 2 порядка.

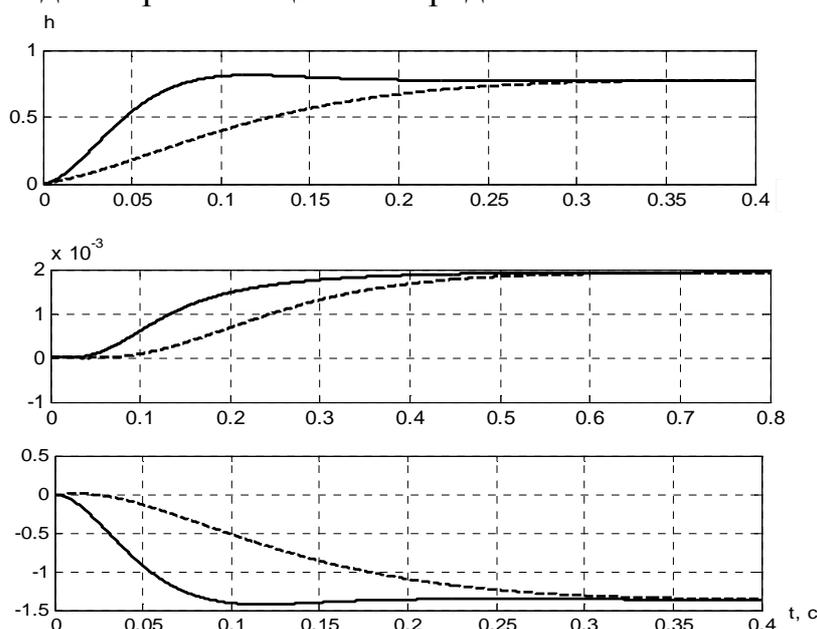


Рисунок 2 – Переходные характеристики САУ ЛТК (сплошная линия), полученной на основе инженерной методики, и САУ ЛТК (пунктирная линия), синтезированной классическим методом

Адекватность и эффективность разработанных инженерных методик подтверждена также результатами синтеза САУ газотурбинным двигателем (ГТД) самолета и САУ химическим аппаратом для очистки нефти.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе математических аппаратов технологии вложения и канонизации матриц разработаны методы синтеза многосвязных систем автоматического управления при измеряемом или наблюдаемом векторе состояния, учитывающие компенсацию запаздываний по состоянию. Преимущество предложенных методов заключается в том, что они позволяют формировать множество эквивалентных законов управления в аналитической форме и получать условия существования множества решений задач синтеза до формирования самого решения задачи.

2. На основе технологии вложения систем и принципа динамической компенсации запаздываний разработаны методы синтеза многосвязных систем автоматического управления с запаздываниями по управлению. Первый метод основан на применении упредителя Смита для случая, когда ни один сигнал в объекте управления, не содержащий запаздывания, не доступен для измерения. Во втором методе используется компенсационно-наблюдательная схема для случая, когда фазовый вектор состояния объекта недоступен непосредственному наблюдению. Разработанные методы отличаются тем, что они позволяют синтезировать законы управления с несколькими запаздываниями в канале управления объекта, находить расчетные соотношения в аналитической форме для определения классов эквивалентных законов управления и их условий существования. Применение аппарата матричной алгебры позволяет существенно упростить практическую реализацию получаемых законов управления с помощью применения программных средств матричных и символьных вычислений.

3. С помощью метода параллельной компенсации запаздываний и технологии вложения разработаны методы синтеза многосвязных систем автоматического управления, учитывающие компенсацию совокупности запаздываний по состоянию, управлению и/или выходу объекта. Преимущество предложенных методов заключается в том, что с их помощью можно синтезировать законы управления объектами, которые содержат совокупность запаздываний, находить множество эквивалентных законов управления и формировать условия существования решения задач синтеза в виде матричных тождеств.

4. Разработаны инженерные методики синтеза систем автоматического управления объектом с запаздываниями по управлению и состоянию; объектом с запаздываниями по входу с использованием компенсационно-наблюдательной схемы; объектом с запаздываниями по состоянию. Методики основаны на методах решения задач синтеза, полученных в данной работе. Они отличаются тем, что при получении расчетных выражений, выведенных в них в виде матричных равенств, был использован аппарат матричной алгебры, позволяющий существенно упростить вычисления с помощью программ для научно-инженерных расчетов.

5. Эффективность предложенных методов в данной работе подтверждена опытом их практического использования при проектировании систем управления реальными техническими объектами. Применение разработанных методов позволяет сократить время проектирования систем управления и учитывать при решении задач запаздывания, содержащиеся в различных каналах объекта. При проектировании САУ ЛТК были получены результаты синтеза с учетом взаимосвязей параметров и запаздываний объекта управления. Выявлено соответствие между желаемыми и полученными характеристиками САУ ЛТК по результатам цифрового имитационного моделирования.

СПИСОК РАБОТ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Применение технологии вложения в задаче синтеза САУ для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2008. № 9. С. 13–19.
2. Решение задачи синтеза системы автоматического управления многосвязным объектом с запаздываниями / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Вестник УГАТУ: науч. журнал УГАТУ. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 24–32.
3. Синтез системы автоматического управления многосвязным объектом с запаздываниями по состоянию и с наблюдателем полного порядка / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Вестник УГАТУ: науч. журнал УГАТУ. 2012. Т. 16, № 3 (48). С. 11–15.

В других изданиях

4. Расчёт параметров поляризационно-чувствительного многоспектрального фотоприёмника для измерения истинных температур [Электронный ресурс] / В. С. Каримов, В. В. Звездин, В. В. Заморский, Р. Ф. Зарипов // Социально-экономические и технические системы: онлайн-электронный научно-технический журнал. 2004. № 1. – Режим доступа: <http://kampi.ban-corp.ru/sets>.
5. Повышение качества сварных соединений узлов и деталей автомобиля при лазерной сварке / В. В. Звездин, В. В. Заморский, И. С. Сабиров, В. С. Каримов // Проблемы качества и эксплуатации автотранспортных средств: матер. III Междунар. науч.-техн. конф. Пенза: ПГУАС, 2004. Ч.1. С. 54–58.
6. Математическая модель системы управления лазерным технологическим комплексом / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Проектирование и исследование технических систем: межвуз. научн. сб. Наб. Челны: Камский гос. политехн. ин-т. 2005. № 6. С. 66–76.
7. Разработка модели многосвязной системы автоматического управления лазерным технологическим комплексом / В. С. Каримов // XIII Туполевские чтения: матер. Междунар. молодежн. науч. конф. Казань: КГТУ, 2005. Т. I. С. 141–143.
8. Оценка многосвязности многоканальной системы автоматического управления лазерным технологическим комплексом / В. С. Каримов // Матер. итоговой науч. конф. за 2005 г. Наб. Челны: Ф-л КГУ, 2005. С. 92–93.
9. Редукция многосвязной модели системы автоматического управления лазерным технологическим комплексом / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Проектирование и исследование технических систем: межвуз. научн. сб. Наб. Челны: Камская гос. инж.-эконом. академия, 2006. № 8. С. 33–41.
10. Снижение размерности модели многосвязной системы автоматического управления лазерным технологическим комплексом методом ортогональной редукции / В. С. Каримов // XIV Туполевские чтения: матер. Междунар. молодежн. науч. конф. Казань: КГТУ, 2006. Т. 3. С. 76–78.
11. Разработка системы автоматического управления многосвязным объектом на примере лазерного технологического комплекса / В. С. Каримов // Матер. итог. научн. конф. Наб. Челны: Ф-л КГУ, 2007. С. 98–102.
12. Решение задачи синтеза многосвязной системы автоматического управления с запаздыванием по управлению с применением метода канонизации в среде Matlab / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Проектирование научных и инженерных приложений в среде MATLAB: тр. 3-й Всерос. науч. конф. СПб.: СПбГУ, 2007. С. 936–949.

13. О задаче синтеза системы автоматического управления с запаздыванием по состоянию / В. С. Каримов // XV Туполевские чтения: матер. Междунар. молодежн. науч. конф. Казань: КГТУ, 2007. Т. II. С. 185–187.

14. О задаче синтеза системы автоматического управления для многосвязного объекта с чистым запаздыванием на основе технологии вложения систем / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Наука, технологии и коммуникации в современном обществе: матер. Респ. научн.-практ. конф. Набережные Челны: фил. Казанск. гос. ун-та, 2008. С. 98–101.

15. Синтез системы автоматического управления для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию и выходу / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. X Междунар. конф. Самара: СНЦ РАН, 2008. С. 232–237.

16. Синтез САУ для многосвязного объекта с запаздываниями на основе закона управления состоянием / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Мехатроника, автоматизация, управление – 2008: матер. Междунар. науч.-техн. конф. СПб.: ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2008. С. 33–36.

17. Синтез системы автоматического управления для многосвязного объекта с запаздываниями / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'09: тр. VIII Междунар. конф. М.: ИПУ РАН, 2009. С. 1375–1389.

18. Применение метода синтеза системы автоматического управления с запаздыванием по управлению для проектирования системы управления газотурбинным двигателем самолета / В. С. Каримов // Наука, технологии и коммуникации в современном обществе: матер. Респ. научн.-практ. конф. Набережные Челны: Фил. Казанск. гос. ун-та, 2009. Т. 2. С. 75–77.

19. Применение компенсационно-наблюдательной схемы в задаче синтеза многосвязной САУ с запаздываниями / В. С. Каримов // Наука, технологии и коммуникации в современном обществе: матер. Респ. научн.-практ. конф. с междунар. участ. Набережные Челны: Фил. Казанск. гос. ун-та, 2010. Т. 1. С. 283–287.

20. Синтез системы автоматического управления для многосвязного объекта с запаздываниями по управлению на основе компенсационно-наблюдательной схемы / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XII Междунар. конф. Самара: СНЦ РАН, 2010. С. 224–231.

21. Разработка алгоритма управления многосвязным объектом с запаздываниями по выходу с применением наблюдающего устройства / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XIII Междунар. конф. Самара: СНЦ РАН, 2011. С. 177–182.

22. Обобщенный алгоритм синтеза системы автоматического управления многосвязным объектом с запаздываниями с применением наблюдающего устройства / В. С. Каримов // Наука, технологии и коммуникации в современном обществе: матер. Респ. научн.-практ. конф. с междунар. участ. Набережные Челны: Фил. Казанск. гос. ун-та, 2012. Т. 1. С. 156–162.

23. Синтез адаптивной системы управления с эталонной моделью для многосвязного объекта с запаздываниями по состоянию / А. З. Асанов, В. С. Каримов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах: тр. XIV Междунар. конф. Самара: СНЦ РАН, 2012. С. 577–582.

КАРИМОВ Валерий Сергеевич

СИНТЕЗ СИСТЕМ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ
МНОГОСВЯЗНЫМИ ОБЪЕКТАМИ С ЗАПАЗДЫВАНИЯМИ
НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ВЛОЖЕНИЯ СИСТЕМ

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 11.03.2013. Формат 60x84 1/16.
Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyr.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,97.
Тираж 107 экз. Заказ № ____.

ФБГОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный
технический университет»
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К. Маркса, 12