

На правах рукописи

ДЕМЬЯНОВ Дмитрий Николаевич

**УПРАВЛЕНИЕ
МНОГОСВЯЗНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
С ЗАДАНИЕМ ТРЕБУЕМОГО СПЕКТРА СИСТЕМНЫХ НУЛЕЙ**

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

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

Уфа – 2011

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 Казанского
(Приволжского) федерального
университета

Официальные оппоненты

д-р техн. наук, проф.
КРЫМСКИЙ Виктор Григорьевич
зав. каф. информационно-
управляющих систем
Уфимской государственной академии
экономики и сервиса

канд. техн. наук, доц.
САИТОВА Гузель Асхатовна
доц. каф. технической кибернетики
Уфимского государственного
авиационного технического
университета

Ведущая организация

Институт проблем управления
сложными системами РАН,
г. Самара

Защита диссертации состоится «14» октября 2011 г. в 10-00 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 «02» сентября 2011 г.

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

В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Актуальность темы

Современные технические объекты, как правило, характеризуются значительной сложностью, наличием нескольких взаимосвязанных подсистем и каналов управления. Подобная *многосвязность* характерна для многих объектов машиностроения, электроэнергетики, транспорта, металлургической и химической промышленности. В процессе исследования и построения качественных систем управления такими объектами необходимо учитывать характер взаимодействия между отдельными подсистемами, для формального описания которого используется понятие *системного нуля*.

Системный нуль представляет собой обобщение на многомерный случай классического понятия нуля скалярной системы. Спектр системных нулей определяет многие характеристики сложного динамического объекта, а также тесно связан с такими его свойствами, как управляемость и наблюдаемость. Именно от количества и расположения на комплексной плоскости системных нулей динамического объекта зависит принципиальная разрешимость многих задач управления, фильтрации и идентификации, а также свойства получаемых решений (динамическая развязка каналов, синтез наблюдателей и слежение за изменением командного сигнала при наличии возмущений, оптимальное управление с квадратичным критерием качества, обращение динамических систем). Следовательно, при проектировании качественной системы управления многосвязным динамическим объектом необходимо определять и, при необходимости, корректировать спектр его системных нулей.

Повышение требований к качеству проектируемых систем автоматического управления и, как следствие, необходимость рассматривать ранее не учитываемые перекрёстные связи потребовало разработки методов синтеза многосвязных систем управления. Методы (в том числе и алгебраические) исследования и синтеза систем управления сложными динамическими объектами рассматривались в работах А. Р. Гайдука, Н. Б. Филимонова, В. Ю. Рутковского, В. В. Путова, В. Г. Крымского, Б. Н. Петрова, Б. Г. Ильясова, Г. Г. Себрякова, В. И. Васильева, Н. И. Юсуповой, Г. Г. Куликова, С. Д. Землякова, В. Н. Ефанова и др. Однако, существенным ограничением многих методов синтеза многосвязных систем управления является то, что они применимы лишь к минимально-фазовым динамическим объектам. Если объект является неминимально-фазовым, то приходится либо использовать более простые и менее совершенные методы, либо снижать требования к качеству проектируемой системы управления. Одним из способов, позволяющих обойти указанные ограничения, является использование различных методов коррекции спектра системных нулей на том этапе проектирования системы управления, когда неминимально-фазовость объекта мешает достижению поставленной цели.

Впервые задача обеспечения требуемого спектра системных нулей линейного многосвязного динамического объекта (ЛМДО) была сформулирована и решена Х. Х. Розенброком (Н. Н. Rosenbrock) в 70-х годах 20-го века. Однако, предложенные им алгоритмы обладали рядом недостатков, поэтому работы в

данном направлении были продолжены другими учёными. Разработке методов вычисления и обеспечения требуемого спектра системных нулей были посвящены работы В. Н. Букова, В. Н. Рябченко, М. Ш. Мисриханова, А. З. Асанова, Е. М. Смагиной, А. В. Сорокина, А. Л. Фрадкова, А. G. J. MacFarlane, W. M. Wonham, P. G. Antsaklis, В. Kouvaritakis, N. Karcanias и др.

Несмотря на значительный объем исследований в данной области, существующие методы вычисления и обеспечения требуемого спектра системных нулей являются недостаточно совершенными, характеризуются высокой сложностью и трудоёмкостью, а также плохо поддаются автоматизации. Указанные недостатки приводят к существенным сложностям при проектировании качественных систем управления неминимально-фазовыми многосвязными технологическими объектами.

Таким образом, проблема разработки эффективных методов управления многосвязными динамическими объектами с заданием спектра системных нулей является *актуальной*.

Цель работы и задачи исследования

Цель исследования состоит в повышении эффективности управления многосвязными динамическими объектами при наличии системных нулей.

Для достижения поставленной цели требуется решение следующих задач.

1. Разработка эффективного метода вычисления системных нулей линейного многосвязного динамического объекта.
2. Разработка методов формирования модели линейного многосвязного динамического объекта, обеспечивающих требуемый спектр системных нулей.
3. Разработка методов формирования модели линейного многосвязного динамического объекта, обеспечивающих требуемый спектр системных нулей при наличии технических ограничений.
4. Разработка методов формирования обратной связи, обеспечивающих требуемый спектр системных нулей несобственного линейного многосвязного динамического объекта.
5. Разработка алгоритма аналитического синтеза системы управления многосвязным динамическим объектом с требуемым спектром системных нулей.

Методы исследования

Методы исследования базируются на положениях и методах линейной алгебры, теории матриц, теории автоматического управления; в том числе операционное исчисление (преобразование Лапласа), технология канонизации матриц для решения линейных (билинейных) матричных уравнений.

На защиту выносятся

1. Метод вычисления системных нулей линейного многосвязного динамического объекта.
2. Методы формирования модели линейного многосвязного динамического объекта, обеспечивающие требуемый спектр системных нулей.
3. Методы формирования модели линейного многосвязного динамического объекта, обеспечивающие требуемый спектр системных нулей при наличии технических ограничений.

4. Методы формирования обратной связи, обеспечивающие требуемый спектр системных нулей несобственного линейного многосвязного динамического объекта.

5. Алгоритм аналитического синтеза системы управления многосвязным динамическим объектом с требуемым спектром системных нулей.

Научная новизна

1. Новизна разработанного метода вычисления системных нулей линейного многосвязного динамического объекта заключается в применении циклической редукции матрицы Розенброка, приводящей к минимизации размерности решаемой задачи.

2. Новизна разработанных методов формирования модели линейного многосвязного динамического объекта, обеспечивающих требуемый спектр системных нулей, заключается в получении множества решений в аналитической форме без использования специальных канонических форм или обработки символьных матриц.

3. Новизна разработанных методов формирования модели линейного многосвязного динамического объекта, обеспечивающих требуемый спектр системных нулей при наличии технических ограничений, заключается в получении решения в виде матричных конструкций, имеющих наперед заданную структуру или заданные значения части коэффициентов.

4. Новизна разработанных методов формирования обратной связи, обеспечивающих требуемый спектр системных нулей несобственного линейного многосвязного динамического объекта, заключается в способе расчёта коэффициентов обратной связи, позволяющем свести задачу к управлению собственными значениями матрицы и решить её, используя методы модального управления.

5. Новизна разработанного алгоритма аналитического синтеза системы управления многосвязным динамическим объектом с требуемым спектром системных нулей заключается в комплексном использовании предложенных в данной работе методов анализа и синтеза требуемых матричных конструкций для построения качественных систем управления.

Практическая ценность работы

Практическая ценность полученных результатов состоит в следующем:

- В разработанном алгоритме вычисления полного множества системных нулей, позволяющем проводить анализ особенностей структуры сложного динамического объекта и учитывать их при выборе режимов работы и проектировании системы управления.

- В разработанных алгоритмах формирования модели линейного многосвязного динамического объекта, обеспечивающих требуемый спектр системных нулей, позволяющих сократить время расчёта в 2-3 раза благодаря отказу от обработки символьных матриц, позволяющих формализовать требования к вновь проектируемым динамическим объектам и обеспечить для них возможность построения качественной системы управления.

- В разработанных алгоритмах формирования обратной связи, обеспечивающих требуемый спектр системных нулей несобственного линейного мно-

госвязного динамического объекта и позволяющих добиться минимально-фазовости без введения параллельного компенсатора или модификации модели объекта.

- В разработанном алгоритме аналитического синтеза системы управления многосвязным динамическим объектом с требуемым спектром системных нулей, позволяющем проектировать качественные системы управления, в том числе неминимально-фазовыми динамическими объектами.

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. Пакет прикладных программ для анализа и синтеза систем управления многосвязными динамическими объектами с учётом спектра системных нулей используется 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, № 09-08-16000, № 11-08-00311, № 11-08-16026; в рамках г/б НИР рег. № 01200952946, № 01201054781.

Апробация работы

Основные результаты настоящей диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: Международная научно-техническая конференция «Мехатроника, Автоматизация, Управление» (Санкт-Петербург, 2008, 2010; Геленджик, 2009); X–XII Международная конференция «Проблемы управления и моделирования в сложных системах» (Самара, 2008–2010); VIII Международная конференция «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO'09 (Москва, 2009); II–III Всероссийская научная конференция «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» (Москва, 2004; Санкт-Петербург, 2007); Международная молодежная научная конференция «XVI Туполевские чтения» (Казань, 2008); Республиканская научная конференция «Наука, технологии и коммуникации в современном обществе» (Набережные Челны, 2008–2010).

Публикации

По теме диссертации опубликованы 27 печатных работ, в том числе 9 статей, из них 8 – в изданиях, входящих в список ВАК, 18 публикаций в сборниках трудов конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, библиографического списка из 151 наименования и приложений. Основная часть работы (без библиографического списка и приложений) изложена на 154 страницах машинописного текста.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе рассмотрено понятие системного нуля, его свойства и особенности использования при описании характеристик ЛМДО. Проведен обзор существующих методов вычисления и обеспечения требуемого спектра системных нулей, выявлены их основные достоинства и недостатки. Сформулирована цель исследования и задачи, решаемые в диссертационной работе.

Рассматривается ЛМДО, заданный системой уравнений:

$$\dot{x} = Ax + Bu; \quad y = Cx + Du, \quad (1)$$

где $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^s$ – векторы состояния, управления и выхода, A, B, C, D – числовые матрицы (если $D \neq 0$, то объект будем называть несобственным).

Множество системных нулей объекта (1) составляют корни полинома, являющегося наибольшим общим делителем тождественно не равных нулю миноров матрицы Розенброка, получаемых последовательным вычёркиванием всех строк и столбцов кроме n первых.

В общем случае множество системных нулей включает в себя множество передаточных нулей (чисел, уменьшающих нормальный ранг передаточной матрицы) и множество развязанных нулей (неуправляемые и/или ненаблюдаемые полюса). Если объект полностью управляем и наблюдаем, то множество системных нулей совпадает с множеством инвариантных нулей (чисел, уменьшающих нормальный ранг матрицы Розенброка) и передаточных нулей.

Известно, что расположение на комплексной плоскости системных нулей ЛМДО определяет принципиальную разрешимость целого ряда задач управления, фильтрации и идентификации, а также свойства получаемых решений. По этой причине при проектировании качественной системы управления необходимо уметь вычислить и, если потребуется, изменить спектр его системных нулей тем или иным способом.

Используемые в настоящее время методы вычисления и формирования спектра системных нулей позволяют в основном решать поставленные задачи, однако, обладают целым рядом существенных недостатков, затрудняющих их практическое использование.

Вычисление системных нулей, как правило, сводится к полной проблеме собственных значений, решение которой осуществляется с помощью известных численных методов. При этом, особенно для сложных систем (мехатронные объекты, электроэнергетические системы и т. д.), существенно возрастает размерность задачи и общее время расчёта. Даже использование аппарата канонизации матриц и введение матрицы связности позволяет снять проблему лишь частично. Вместе с тем, анализ показывает, что во многих случаях теоретически возможно дальнейшее понижение размерности.

Формирование спектра системных нулей осуществляется либо с помощью параллельного компенсатора, либо введением обратной связи, либо изме-

нением матрицы входа или выхода. Применение метода шунтирования сопряжено со значительными сложностями вычислительного характера и не всегда реализуемо физически. Использование обратной связи для задания спектра системных нулей возможно лишь для небольшого класса объектов. Кроме того, введение обратной связи только для изменения спектра системных нулей нецелесообразно, а методы управления и нулями, и полюсами ЛМДО просто отсутствуют. Изменение матрицы входа или выхода для формирования спектра системных нулей является наиболее перспективным. Однако, известные методы, реализующие данный подход, либо основаны на приведении к специальной канонической форме, либо требуют обработки символьных матриц, либо сводятся к нахождению глобального минимума функции многих переменных.

Несовершенство рассмотренных методов существенно ограничивает их практическое использование, что не позволяет во многих случаях осуществлять синтез качественных систем управления ЛМДО. Следовательно, необходима разработка новых, более совершенных методов вычисления и формирования спектра системных нулей, которые позволили бы обойти ограничения существующих методов синтеза и повысить эффективность управления техническими (технологическими) объектами. Одним из возможных путей решения задачи является использование нового математического аппарата – технологии канонизации матриц, позволяющей в рамках единого формализма решать матричные уравнения различной структуры и получать полное множество решений в аналитической форме, а также условия его существования.

Во второй главе разработан циклический алгоритм вычисления системных нулей ЛМДО, основанный на использовании технологии канонизации матриц. Получены соотношения, позволяющие свести задачу к вычислению собственных значений специальным образом сформированной матрицы минимальной размерности.

Вычисление системных нулей объекта (1) было разделено на два этапа: вычисление инвариантных нулей и вычисление развязанных нулей (решением задачи будет объединение полученных множеств).

Развязанные по входу нули формально определяются условием:

$$\forall p_i^{di} : \text{rank} \begin{bmatrix} p_i^{di} I - A & B \end{bmatrix} < \text{norm rank} \begin{bmatrix} pI - A & B \end{bmatrix} = \text{dim}(A). \quad (2)$$

Применение невырожденных преобразований и анализ ранговых характеристик получаемых блочных матриц позволяет утверждать, что при замене $A \rightarrow A^*$, $B \rightarrow B^*$ условие (2) будет по-прежнему определять развязанные по входу нули, если введённые матрицы определяются выражением:

$$A^* = \widetilde{B}^L \overline{B}^L \widetilde{A} \overline{B}^L R; \quad B^* = -\widetilde{B}^L \overline{B}^L \overline{A} \overline{B}^L R. \quad (3)$$

Здесь и далее для некоторой матрицы X символами \widetilde{X}^R и \widetilde{X}^L обозначены, соответственно, правый и левый канонизаторы матрицы, а символами \overline{X}^R и \overline{X}^L – правый и левый матричные делители нуля.

Осуществляя пересчёт по формуле (3) несколько раз, можно получить в конечном итоге один из двух вариантов: матрица B^* станет нулевой (развязанные по входу нули определяться как собственные числа матрицы A^*), или же её ранг станет равен числу строк (развязанных по входу нулей нет).

В силу неединственности делителей нуля можно при каждом пересчёте получать хорошо обусловленную задачу. Кроме того, полученные результаты могут быть использованы для вычисления развязанных по выходу нулей, для чего необходимо лишь осуществить предварительную замену $A = A^T$; $B = C^T$. Наличие нулей, развязанных одновременно по входу и по выходу, может быть проверено с помощью классической декомпозиции Калмана.

Если исходный объект вида (1) является несобственным, то вычисление его инвариантных нулей может быть сведено к вычислению инвариантных нулей собственного объекта, чьи матрицы определяются следующим образом:

$$A^* = A - B\tilde{D}C; \quad B^* = B\bar{D}^R; \quad C^* = \bar{D}^L C. \quad (4)$$

Если один из делителей нуля матрицы D не существует, то задача сводится к нахождению развязанных по входу или по выходу нулей.

Если и правый, и левый делитель нуля матрицы D не существует (т. е. она является квадратной обратимой), то сводный канонизатор $\tilde{D} = D^{-1}$ и преобразования (4) приводят к широко известной формуле Шура для определителя блочной матрицы. В этом случае инвариантные нули объекта определяются как собственные числа матрицы $A - BD^{-1}C$.

Сформулированные результаты позволяют получить оценку количества инвариантных нулей несобственного объекта. Если $m = s = \text{rank}(D)$, то число инвариантных нулей равно $\dim(A)$. Если $m \neq s$ и $\text{rank}(D) = \min(m, s)$, то число инвариантных нулей объекта не превосходит $\dim(A) - \text{rank}(B\bar{D}^R)$ (если $m > s$) или $\dim(A) - \text{rank}(\bar{D}^L C)$ (если $m < s$). Если $\text{rank}(D) < \min(m, s)$, и матрица $\bar{D}^L C B \bar{D}^R$ имеет полный ранг, то число инвариантных нулей объекта не превосходит $\dim(A) - \min(\text{rank}(B\bar{D}^R), \text{rank}(\bar{D}^L C))$.

Если исходный объект является собственным, то его инвариантные нули определяются как числа, уменьшающие нормальный ранг матрицы связности. При этом сама матрица связности, после соответствующих преобразований, может быть представлена в виде матрицы Розенброка некоторого объекта:

$$\begin{cases} A^* = \bar{B}^L \bar{C}^R \bar{B}^L A \bar{C}^R \bar{B}^L \bar{C}^R; & B^* = \bar{B}^L \bar{C}^R \bar{B}^L A \bar{C}^R \bar{B}^L \bar{C}^R; \\ C^* = -\bar{B}^L \bar{C}^R \bar{B}^L A \bar{C}^R \bar{B}^L \bar{C}^R; & D^* = -\bar{B}^L \bar{C}^R \bar{B}^L A \bar{C}^R \bar{B}^L \bar{C}^R. \end{cases} \quad (5)$$

Если один из делителей нуля матрицы $\bar{B}^L \bar{C}^R$ не существует, то задача сводится к нахождению развязанных по входу или по выходу нулей. Если оба делителя нуля матрицы $\bar{B}^L \bar{C}^R$ не существуют, то инвариантные нули объекта определяются как собственные числа матрицы $(\bar{B}^L \bar{C}^R)^{-1} \bar{B}^L A \bar{C}^R$.

Циклическое применение формул (4) и (5) при нахождении спектра инвариантных нулей позволяет последовательно уменьшать размерность задачи, сводя её к нахождению собственных значений некоторой матрицы или к нахождению развязанных по входу или по выходу нулей. Блок-схема предложенного алгоритма представлена на рисунке 1.

Использование соотношений (3) – (5) позволяет построить эффективный алгоритм расчёта, обеспечивающий минимизацию размерности задачи (она равна количеству конечных системных нулей ЛМДО).

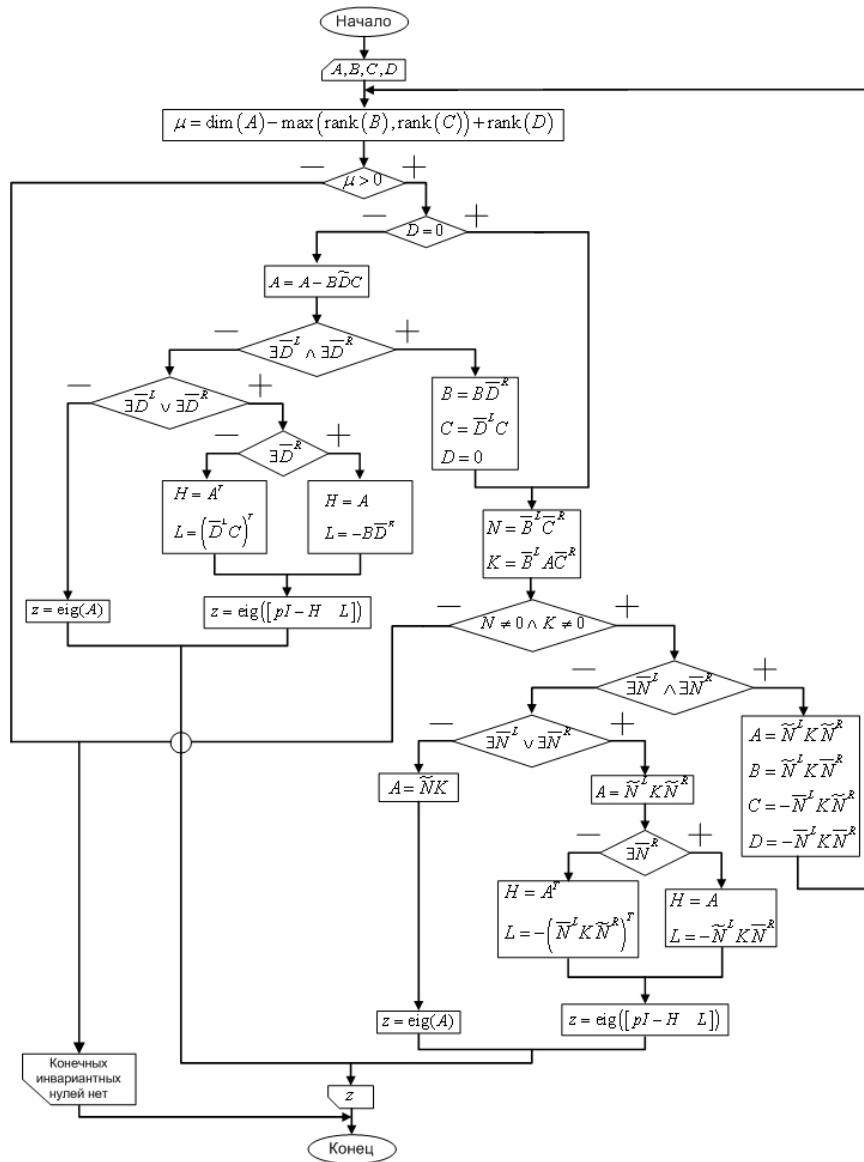


Рисунок 1 – Алгоритм вычисления инвариантных нулей.

Предложенный алгоритм позволяет минимизировать размерность задачи и существенно сократить время расчёта (особенно для сложных объектов).

В третьей главе разработаны методы формирования модели линейного многосвязного динамического объекта, обеспечивающие требуемый спектр системных нулей. Указанные методы позволяют получать полное множество решений поставленной задачи, в том числе и при наличии ограничений.

На практике необходимыми свойствами модели ЛМДО являются управляемость и наблюдаемость (только для таких имеет смысл рассматривать и корректировать тонкие структурные свойства, характеризующие взаимодействие каналов), поэтому спектры системных и передаточных нулей совпадают.

Формально потеря ранга передаточной матрицы при определённом значении комплексной переменной может быть записана следующим образом:

$$C(p_i I - A)^{-1} B U_{0i} = 0, \quad (6)$$

где p_i – значение i -ого передаточного нуля ($i = \overline{1, \mu}$), U_{0i} – не равный тождественно нулю вектор-столбец.

Записав для каждого значения передаточного нуля условие (6) и объединив их в систему, получим одно линейное матричное уравнение:

$$C \left[(p_1^t I - A)^{-1} BU_{01} \quad (p_2^t I - A)^{-1} BU_{02} \quad \dots \quad (p_\mu^t I - A)^{-1} BU_{0\mu} \right] = 0. \quad (7)$$

Его решение в общем виде определяется выражением:

$$C = \eta \overline{\left[(p_1^t I - A)^{-1} BU_{01} \quad (p_2^t I - A)^{-1} BU_{02} \quad \dots \quad (p_\mu^t I - A)^{-1} BU_{0\mu} \right]^L}, \quad (8)$$

где η – произвольная матрица полного ранга соответствующей размерности.

Таким способом можно задавать не только расположение, но и количество конечных передаточных нулей динамического объекта. Не умаляя общности, рассмотрим объект с равным числом входов и выходов. Для него справедливо соотношение $n - \mu = km + e$, где k, e – целые числа, $k > 0$, $0 \leq e < m$. Тогда объект будет иметь μ передаточных нулей при равенстве нулю матриц CB , CAB , ..., $CA^{k-2}B$ и наличии дефекта ранга матрицы $CA^{k-1}B$. По аналогии с (7) данное условие можно записать в виде одного матричного уравнения:

$$C \left[B \quad AB \quad \dots \quad A^{k-2}B \quad A^{k-1}BM_L \quad (p_1^t I - A)^{-1} BU_{01} \quad \dots \quad (p_\mu^t I - A)^{-1} BU_{0\mu} \right] = 0. \quad (9)$$

Его решение в общем виде определяется выражением:

$$C = \eta \overline{\left[B \quad AB \quad \dots \quad A^{k-2}B \quad A^{k-1}BM_L \quad (p_1^t I - A)^{-1} BU_{01} \quad \dots \quad (p_\mu^t I - A)^{-1} BU_{0\mu} \right]^L}, \quad (10)$$

где M_L – матрица полного ранга размера $n \times e$.

Формулы для расчёта матрицы входа, обеспечивающей требуемый спектр передаточных нулей, получаются путём небольшой модификации соотношений (6) – (10), а для задания спектра передаточных нулей объекта с различным числом входов и выходов следует рассматривать U_{0i} как матрицу.

Предложенный метод может быть использован и для формирования модели несобственного ЛМДО. В этом случае соотношение (6) запишется следующим образом:

$$C(p_i^t I - A)^{-1} BU_{0i} + DU_{0i} = 0, \quad (11)$$

Записав условие (11) для каждого передаточного нуля, получим:

$$C \left[(p_1^t I - A)^{-1} BU_{01} \quad \dots \quad (p_\mu^t I - A)^{-1} BU_{0\mu} \right] + D \left[U_{01} \quad \dots \quad U_{0\mu} \right] = 0. \quad (12)$$

Обозначим

$$F_U = \left[(p_1^t I - A)^{-1} BU_{01} \quad \dots \quad (p_\mu^t I - A)^{-1} BU_{0\mu} \right].$$

Уравнение (12) имеет решение:

$$C = -D \left[U_{01} \quad U_{02} \quad \dots \quad U_{0\mu} \right] \widetilde{F}_U + \eta \overline{F}_U^L,$$

где η – произвольная матрица полного ранга соответствующей размерности, если выполняется условие разрешимости:

$$-D \left[U_{01} \quad U_{02} \quad \dots \quad U_{0\mu} \right] \overline{F}_U^R = 0.$$

Если необходимо найти решение задачи в виде матричной конструкции, обладающей определёнными свойствами, то можно воспользоваться следующими доказанными в работе утверждениями.

Утверждение 1: Для того чтобы передаточная матрица теряла ранг при заданном значении p_i^t , не совпадающим ни с одним из собственных чисел матрицы A , достаточно выполнения условия $C_j = \overline{\eta(p_i^t I - A)^{-1} B}^L$, где C_j – j -я строка матрицы выхода, η – тождественно не равный нулю вектор-строка соответствующей размерности.

Утверждение 2: Для того чтобы передаточная матрица теряла ранг при заданном значении p_i^t , не совпадающим ни с одним из собственных чисел матрицы A , достаточно выполнения условия $B_j = \overline{C(p_i^t I - A)^{-1} \eta}^R$, где B_j – j -й столбец матрицы входа, η – тождественно не равный нулю вектор-столбец соответствующей размерности.

На основе приведённых утверждений может быть сформулирован общий алгоритм формирования модели ЛМДО, обеспечивающий требуемый спектр системных нулей.

1. Определить матрицы $F_i = (p_i^t I - A)^{-1} B$, $i = \overline{1, \mu}$.
2. Сгруппировать из матриц F_i блочные матрицы F_j^* максимального размера, имеющие левый делитель нуля.
3. Сформировать k строк матрицы C^* по формуле $C_j^* = \overline{V_j F_j^*}^L$, $j = \overline{1, k}$.
4. Выбрать оставшиеся $s - k$ строк матрицы C^* .
5. Сформировать искомую матрицу выхода $C = \eta C^*$, где η – произвольная обратимая матрица.

Полученное выражение для матрицы выхода включает в себя неизвестные вектора V_j и C_j^* ($j = \overline{1, s - k}$), при условии $V_j \neq 0$, $\text{rank}(C^* B) = \min(m, s)$, а также матрицу η . Задавая конкретные значения V_j , C_j^* , η можно получить одно из множества решений поставленной задачи. При этом возможно наложение дополнительных ограничений на величину коэффициентов или структуру матрицы-решения. В этом случае полученная матрица выхода будет иметь заданные или близкие к ним значения некоторых коэффициентов, один или несколько нулевых столбцов (соответствуют переменным состояниям, непосредственно наблюдать которые по физическим причинам невозможно или затруднительно), заданные значения в одной или нескольких строках (некоторое количество выходов не может быть изменено по каким-либо причинам).

Приведённый выше алгоритм после некоторых модификаций позволяет задавать спектр передаточных нулей путём изменения матрицы входа и при проведении операции квадрирования, а также задавать спектр передаточных нулей объекта с различным числом входов и выходов.

В четвертой главе разработаны методы формирования обратной связи, обеспечивающие требуемый спектр системных нулей несобственного динамического объекта. Предложены алгоритмы расчёта коэффициентов статической обратной связи по состоянию, обеспечивающие одновременную устойчивость и минимально-фазовость замкнутой системы. Предложен алгоритм аналитического синтеза системы управления ЛМДО с требуемым спектром системных

нулей. На основе полученных теоретических результатов проведён расчёт матрицы наблюдения, обеспечивающей построение астатического наблюдающего устройства состояния и внешних возмущений в комбинированной САУ много-связным техническим объектом.

Пусть ЛМДО вида (1) имеет равное количество входов и выходов, а определитель его матрицы Розенброка не равен тождественно нулю. Обозначим матрицу коэффициентов обратной связи K .

Если матрица D является обратимой, то, обозначив $A^* = A - BD^{-1}C$, можно определить системные нули объекта как корни уравнения:

$$\det(pI - (A^* - BK)) = 0. \quad (13)$$

Если матрица D является квадратной, $\det(D) = 0$ и $\det\left(\begin{matrix} \overline{BD}^R & \overline{D}^L & \overline{C}^R \end{matrix}\right) \neq 0$, то

системные нули объекта можно определить как корни уравнения:

$$\det(pI - (A_1^* - B_1^* K C_1^*)) = 0. \quad (14)$$

Здесь

$$\begin{cases} A_1^* = \left(\overline{BD}^R & \overline{D}^L & \overline{C}^R\right)^{-1} \overline{BD}^R (A - B\tilde{D}C) \overline{D}^L \overline{C}^R; \\ B_1^* = \left(\overline{BD}^R & \overline{D}^L & \overline{C}^R\right)^{-1} \overline{BD}^R B; C_1^* = \overline{D}^L \overline{C}^R. \end{cases} \quad (15)$$

Таким образом, при выполнении ряда условий процедура расчёта обратной связи, обеспечивающей требуемый спектр системных нулей ЛМДО, может быть сведена к решению задачи модального управления по состоянию или по располагаемому выходу (в случае, когда пара (A^*, B) или (A_1^*, B_1^*) является управляемой). Для остальных вариантов в настоящее время не получено конструктивных условий разрешимости задачи.

Полученные результаты могут быть использованы для расчёта обратной связи, обеспечивающей требуемый спектр полюсов и системных нулей.

Если $\exists \det(D) \wedge \det(D) \neq 0$, то с учётом соотношения (13) задача обеспечения требуемых полюсов и системных нулей сводится к обеспечению требуемых полюсов двух объектов с помощью одного регулятора по состоянию.

$$\text{Если } \exists \det(D) \wedge \det(D) = 0 \wedge \det\left(\begin{matrix} \overline{BD}^R & \overline{D}^L & \overline{C}^R \end{matrix}\right) \neq 0, \text{ то с учётом соотношения (14)}$$

можно сформулировать следующий алгоритм расчёта обратной связи, обеспечивающий требуемый спектр полюсов и системных нулей.

1. По формулам (15) определить A_1^*, B_1^*, C_1^* .
2. Найти матрицу K_1 , обеспечивающую заданные собственные числа матрицы $A_1^* - B_1^* K_1 C_1^*$ (желаемые системные нули).
3. Найти матрицу K_2 , обеспечивающую заданные собственные числа матрицы $A - BK_1 - \overline{BD}^R K_2$ (желаемые полюса).
4. Найти искомую матрицу обратной связи $K = K_1 + \overline{BD}^R K_2$.

Обобщая полученные в работе результаты, можно сформулировать алгоритм аналитического синтеза системы управления ЛМДО с требуемым спектром системных нулей. Блок-схема обобщённого алгоритма представлена на рисунке 2.

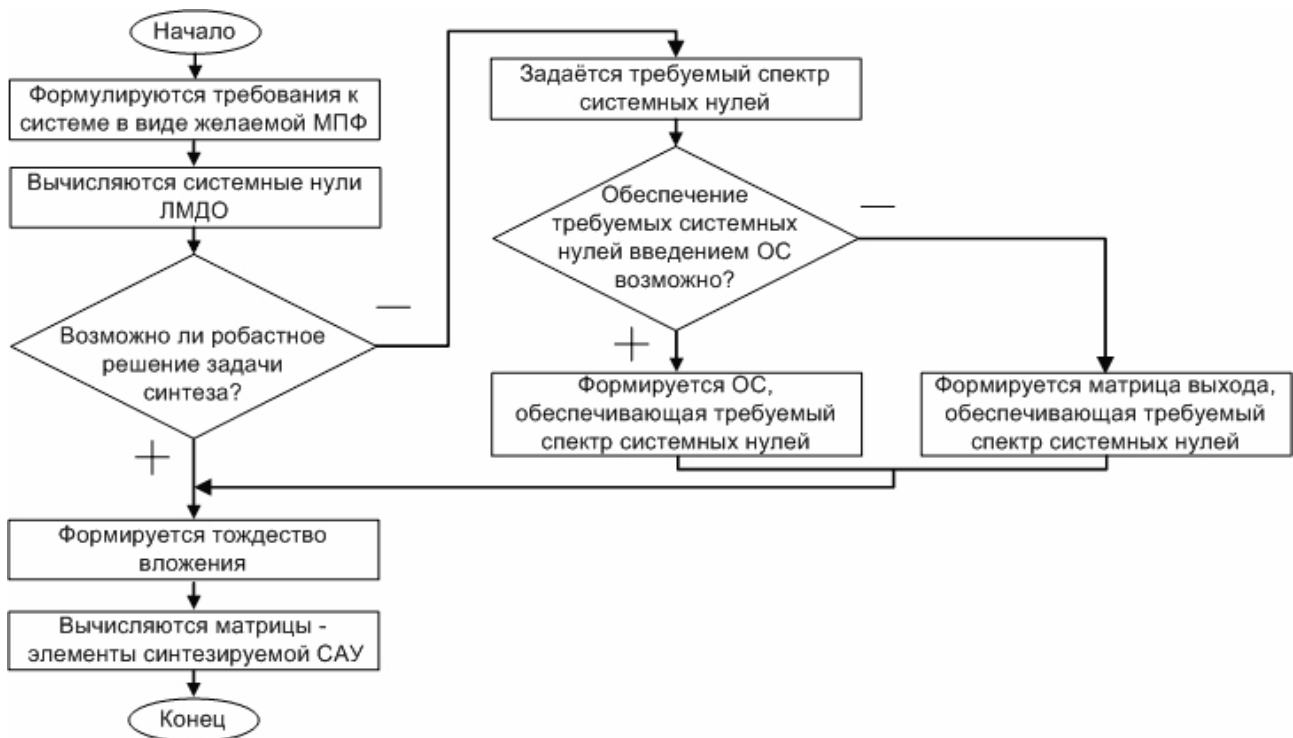


Рисунок 2 – Блок-схема обобщённого алгоритма аналитического синтеза САУ.

Полученные в работе результаты были использованы при синтезе комбинированной МСАУ технологическим оборудованием, в частности, при выборе матрицы наблюдения, обеспечивающей возможность построения астатического наблюдателя внешних возмущений с заданной динамикой.

Особенностью проектируемой МСАУ технологическим оборудованием (обрабатывающий центр) является управление по полному вектору состояния и возмущающих воздействий. Применение подобной схемы позволяет обеспечить эффективное управление, повысить быстродействие и динамическую точность. При этом для восстановления вектора внешних возмущений используется астатическое наблюдающее устройство, характеризующееся заданной динамикой процесса оценивания (непосредственное измерение внешних возмущений невозможно по техническим причинам).

Известно, что наличие неминимально-фазовых системных нулей по каналу «возмущение – выход» не позволяет произвольным образом задавать динамику процесса оценивания, так как синтезированное наблюдающее устройство может при этом не обладать свойством робастности (грубости) – малые изменения параметров приводят к неограниченному росту ошибки оценивания. Следовательно, обязательным этапом построения астатического наблюдающего устройства является вычисление системных нулей и, при необходимости, формирование такой матрицы наблюдений, которая бы обеспечивала отсутствие неминимально-фазовых системных нулей по каналу «возмущение – выход».

Применение разработанных методов и алгоритмов позволило сформировать матрицу наблюдений, обеспечивающую требуемый спектр системных нулей, что, в свою очередь, позволило построить робастное астатическое наблюдающее устройство с заданной динамикой процесса оценивания. На рисунке 3 представлены результаты цифрового моделирования процессов оценивания внешних возмущений для построенного астатического (а) и статического (б) наблюдающих устройств.

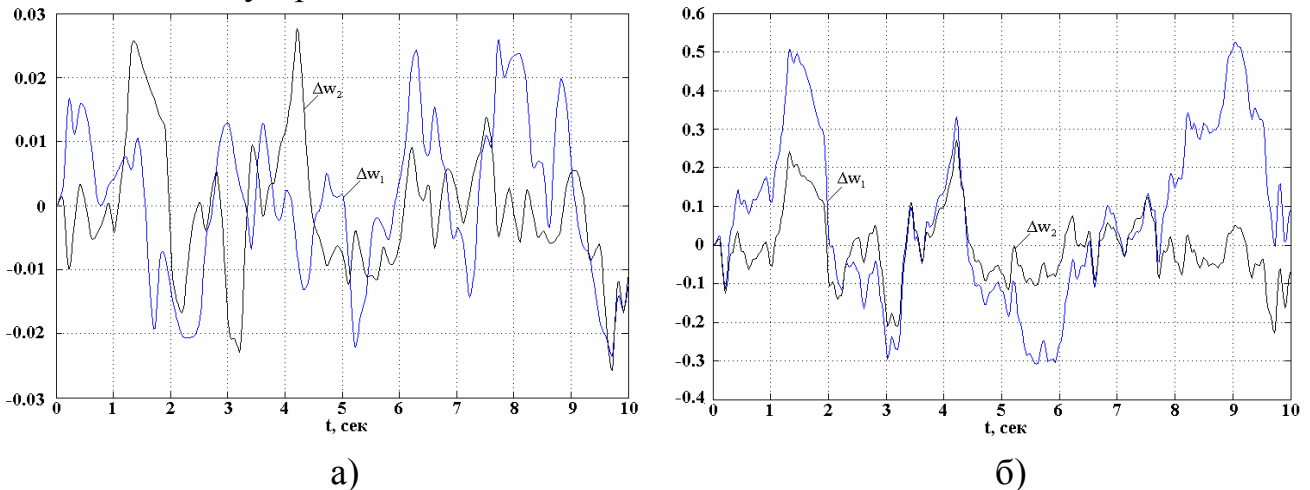


Рисунок 3 – График ошибки оценивания внешних возмущений.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. На основе технологии канонизации матриц разработан метод вычисления системных нулей ЛМДО, заключающийся в циклической редукции матрицы Розенброка. Получены формулы пересчёта, позволяющие последовательно уменьшать размерность задачи и свести её к нахождению собственных значений специальным образом сформированной матрицы. Неединственность делителей нуля в расчётных соотношениях позволяет формировать хорошо обусловленную систему уравнений и облегчает программную реализацию метода.

2. Разработаны методы формирования модели ЛМДО, обеспечивающие требуемый спектр системных нулей путем изменения входной или выходной матрицы, позволяющие получить множество решений в аналитической форме без использования специальных канонических форм или обработки символьных матриц. Указанные методы позволяют задавать количество конечных системных нулей и их расположение на комплексной плоскости.

3. Разработаны методы формирования модели ЛМДО, обеспечивающие требуемый спектр системных нулей при наличии технических ограничений. Сущность предлагаемых методов заключается в факторизации передаточной матрицы и представлении матрицы входа или выхода динамического объекта в виде совокупности делителей нуля второй матрицы-сомножителя при заданных значениях комплексной переменной. Получаемые при этом матричные конструкции могут иметь наперед заданную структуру или заданные значения части коэффициентов. Предложенные методы могут быть использованы в том случае, когда допускается изменение лишь части входной или выходной матрицы динамического объекта, а также при проведении операции квадрирования.

4. Разработаны методы формирования обратной связи, обеспечивающие требуемый спектр системных нулей несобственного ЛМДО. Получены соотношения, позволяющие свести исходную задачу к управлению собственными значениями специальным образом сформированной матрицы и решить ее, используя методы модального управления. Предложенные методы позволяют строить статическую обратную связь по состоянию, обеспечивающую как требуемые системные нули, так и полюса несобственного динамического объекта.

5. Разработан алгоритм аналитического синтеза системы управления многосвязным динамическим объектом с требуемым спектром системных нулей. Сущность данного алгоритма заключается в предварительном исследовании спектра системных нулей, коррекции неминимально-фазовости динамического объекта путем применения одного из разработанных методов, и построении системы управления с использованием технологии вложения систем. Применение предложенного алгоритма позволяет обойти ограничения существующих методов аналитического синтеза систем управления сложными техническими объектами и осуществлять проектирование качественных систем управления, в том числе и неминимально-фазовыми объектами.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых журналах из списка ВАК

1. Формирование требуемого расположения передаточных нулей многосвязной динамической системы / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2008. № 2. С. 17–22.

2. Формирование заданного спектра передаточных нулей многосвязной динамической системы / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Вестник УГАТУ. Серия “Управление, вычислительная техника и информатика”: науч. журнал УГАТУ. 2008. Т. 10, № 2 (27). С. 25–34.

3. Синтез вход/выходных матриц многосвязной динамической системы по заданным передаточным нулям / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Известия РАН. Теория и системы управления. 2008. № 6. С. 5–18.

4. Задание передаточных нулей для обеспечения функциональной управляемости по выходу динамической системы / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Мехатроника, автоматизация, управление. 2009. № 4. С. 11–15.

5. Вопросы анализа и синтеза несобственных динамических систем с учётом передаточных нулей / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2009. № 2. С. 24–28.

6. Вопросы выбора оптимальной структуры выходной матрицы при изменении спектра передаточных нулей многосвязной динамической системы / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Вестник УГАТУ. Серия “Управление, вычислительная техника и информатика”: науч. журнал УГАТУ. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 11–17.

7. Вычисление развязанных нулей многосвязной динамической системы / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Изв. вузов. Авиационная техника. 2010. № 2. С. 38–43.

8. Задание совокупности передаточных нулей многосвязных динамических объектов при проведении операции квадрирования / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Вестник УГАТУ. Серия “Управление, вычислительная техника и информатика”: науч. журнал УГАТУ. 2010. Т. 14, № 2 (37). С. 146–150.

В других изданиях

9. Нули линейной многомерной динамической системы и их расчёт в инструментальной среде MatLab / А. З. Асанов, А. Н. Асанова, Д. Н. Демьянов // Проектирование и исследование технических систем : межвуз. науч. сб. Наб. Челны : Камский гос. политехн. ин-т, 2004. Вып. 4. С. 38–47.

10. Вычисление нулей линейной многомерной динамической системы средствами MatLab / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MatLab : тр. II Всерос. науч. конф. М. : ИПУ РАН, 2004. С. 473–482.

11. Вычисление нулей многосвязных квазиадаптивных систем средствами MatLab / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MatLab : тр. III Всерос. науч. конф. СПб. : СПбГУ, 2007. С. 926–935.

12. К вопросу о формировании нулей многосвязной квазиадаптивной мехатронной системы / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Мехатроника, автоматизация, управление – 2007 : матер. Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2007. С. 20–25.

13. Метод вычисления нулей многомерных систем на основе матрицы связности / Д. Н. Демьянов // XV Туполевские чтения : матер. Междунар. молодежн. науч. конф. Казань : КГТУ, 2007. Т. II. С. 174–176.

14. Концепция управления распределением нулей многосвязных динамических систем на основе технологии канонизации матриц / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Наука, технологии и коммуникации в современном обществе : матер. Респ. научн.-практ. конф. Набережные Челны : фил. Казанск. гос. ун-та, 2008. С. 97–98.

15. О ранге произведения некоторых типов числовых матриц / Д. Н. Демьянов // Наука, технологии и коммуникации в современном обществе : матер. Респ. научн.-практ. конф. Набережные Челны : фил. Казанск. гос. ун-та, 2008. С. 101–103.

16. Методы вычисления нулей несобственных динамических систем / Д. Н. Демьянов // XVI Туполевские чтения : матер. Междунар. молодежн. науч. конф. Казань : КГТУ, 2008. Т. II. С. 265–267.

17. Обеспечение заданного спектра передаточных нулей многосвязной динамической системы путём формирования выходной матрицы / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. X Междунар. конф. Самара : СНЦ РАН, 2008. С. 226–231.

18. О задаче обеспечения функциональной управляемости по выходу мехатронной системы / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Мехатроника, автоматизация, управление – 2008 : матер. Междунар. науч.-техн. конф. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ “Электроприбор”, 2008. С. 29–32.

19. Конструирование входных/выходных матриц модели многосвязной динамической системы с заданием некоторых инвариантов / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Идентификация систем и задачи управления SICPRO'09 : тр. VIII Междунар. конф. М. : ИПУ РАН, 2009. С. 1390–1421.

20. Сравнительный анализ различных подходов к построению выходной матрицы многосвязной динамической системы с заданием её передаточных нулей / Д. Н. Демьянов // Наука, технологии и коммуникации в современном обществе : матер. Респ. научн.-практ. конф. Набережные Челны : фил. Казанск. гос. ун-та, 2009. Т. 2. С. 73–74.

21. Реализация вычислений системных нулей для объектов большой размерности на основе канонизации матриц в среде MatLab / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MatLab : тр. IV Всерос. науч. конф. Астрахань : Астрахан. гос. ун-т, 2009. С. 434–443.

22. Модификация части входной или выходной матрицы для управления спектром передаточных нулей системы / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XI Междунар. конф. Самара : СНЦ РАН, 2009. С. 124–131.

23. Алгоритм обращения полиномиальных матриц и его использование в задаче динамической развязки каналов / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Мехатроника, автоматизация, управление – 2009 : матер. Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2009. С. 24–27.

24. Одновременная стабилизация и обеспечение минимально-фазовости многосвязного динамического объекта / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Мехатроника, автоматизация, управление – 2009 : матер. Междунар. науч.-техн. конф. Таганрог : ТТИ ЮФУ, 2009. С. 27–30.

25. Алгоритм формирования совокупности передаточных нулей многосвязного динамического объекта при проведении операции квадрирования / Д. Н. Демьянов // 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. 271–274.

26. Аналитическое конструирование систем управления многосвязными динамическими объектами с учётом передаточных нулей / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Проблемы управления и моделирования в сложных системах : тр. XII Междунар. конф. Самара : СНЦ РАН, 2010. С. 218–223.

27. Алгоритм вычисления инвариантных нулей на основе циклической редукции матрицы Розенброка / А. З. Асанов, Д. Н. Демьянов // Мехатроника, автоматизация, управление – 2010 : матер. Междунар. науч.-техн. конф. СПб. : ГНЦ РФ ЦНИИ "Электроприбор", 2010. С. 60–63.

ДЕМЬЯНОВ Дмитрий Николаевич

**УПРАВЛЕНИЕ
МНОГОСВЯЗНЫМИ ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
С ЗАДАНИЕМ ТРЕБУЕМОГО СПЕКТРА СИСТЕМНЫХ НУЛЕЙ**

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

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано к печати 28.06.2011. Формат 60x84 1/16.
Печать плоская. Гарнитура Times New Roman Cyt.
Усл. печ. л. 1,0. Уч.-изд. л. 0,97.
Тираж 120 экз. Заказ № 84.

Отпечатано в ФГБОУ ВПО «Набережночелнинский институт
социально-педагогических технологий и ресурсов»
423806 г. Набережные Челны, ул. Низаметдинова, 28