

На правах рукописи

Вороной Вадим Владимирович

ПОЛИНОМИАЛЬНЫЙ МЕТОД РАСЧЕТА МНОГОКАНАЛЬНЫХ
РЕГУЛЯТОРОВ ПОНИЖЕННОГО ПОРЯДКА

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(промышленность)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2013

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Воевода Александр Александрович

Официальные оппоненты: Куцый Николай Николаевич,
доктор технических наук, профессор;
Иркутский государственный университет
путей сообщения, профессор кафедры
управления техническими системами.

Малышенко Александр Максимович,
доктор технических наук, профессор;
Национальный исследовательский Томский
политехнический университет, профессор
кафедры интегрированных компьютерных
систем управления.

Ведущая организация: Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону

Защита состоится «22» октября 2013 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан « » сентября 2013 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Юркевич Валерий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. В теории автоматического управления задача синтеза систем автоматического управления занимает очень важное место, так как она позволяет создавать системы, обеспечивающие, например, заданный переходный процесс изменения контролируемой величины или основные качественные показатели в различных технических системах. Наличие адекватных методов расчета определяет успех проектирования реальных технических систем. Сложность задачи синтеза заключается в том, что заданный переходный процесс в той или иной степени могут обеспечить многие системы автоматического управления.

Огромный вклад в решение задач синтеза регуляторов внесли следующие зарубежные и отечественные авторы: Айзерман М. А., Алесандров А. А., Андреев Ю. Н., Бесеккерский В. А., Бондарко В. А., Востриков А. С., Воронов В. В., Гайдук А. Р., Грязина Е. Н., Зайцев Г. Ф. Квакернаак Х., Ким Д. П., Первозванский А. А., Поляк Б. Т., Попов Е. П., Сиван Р., Страшинин Е. Э., Antsaklis P. J., Astrem K. J., Chen C. T., Dahleh M., Doyle J. C., Michel A. N., Dorf R. C., Bishop R. H., Wang Q. G., Wolovich W. A. и др.

Большинство реальных технических систем являются многоканальными. А в связи с постоянным развитием технических систем и их усложнением, применяемые для них регуляторы становятся гораздо более сложными, а, следовательно, и более дорогими по стоимости и эксплуатации. Поэтому обычно разработчики систем автоматического управления стараются «разбивать» систему на отдельные контуры и применять более простые и привычные им П, ПИ, ПИД и другого вида простые регуляторы. Однако разработанные к настоящему времени алгоритмы управления не всегда отвечают поставленным требованиям. Таким образом, создание регулярных процедур синтеза систем с расчетом, по возможности, более простых регуляторов, и, в частности, пониженного порядка является достаточно актуальной задачей.

Диссертация посвящена анализу существующих методик синтеза многоканальных регуляторов полного и пониженного порядка. На основе полученного анализа предлагаются собственные методики синтеза многоканальных регуляторов, в частности, пониженного порядка с использованием полиномиального разложения матричной передаточной функции объекта. Для синтеза регуляторов пониженного порядка предлагается использовать операцию «обратного» дифференцирования характеристического полинома замкнутой системы управления.

Объектом исследований являются линейные многоканальные системы. В качестве тестовых примеров рассматриваются двухмассовые и трёхмассовые системы, а также «перевернутый маятник на каретке». На основе последнего рассматривается возможность распространения полиномиальной методики модального метода синтеза для нелинейных систем, описание которых представлено в виде нелинейных дифференциальных уравнений. В качестве реальных

физических объектов рассматриваются системы стабилизации температурного режима в камере полимерной покраски и колонне синтеза аммиака.

Предметом исследований является модальная методика синтеза многоканальных регуляторов пониженного порядка на основе матричного полиномиального разложения, использующая оптимизационную процедуру расположения полюсов системы в заданную область при обратном дифференцировании характеристического полинома замкнутой системы.

Цель и задачи диссертационной работы. Целью работы является разработка методик синтеза регуляторов полного и пониженного порядка для многоканальных систем, представленных в виде полиномиального разложения. Предлагается на основе известных методик создать универсальную процедуру, с помощью которой можно также синтезировать регуляторы пониженного порядка. Кроме того, для синтеза регуляторов пониженного порядка предлагается использовать операцию «обратного» дифференцирования матричного характеристического полинома замкнутой системы и при помощи оптимизационной процедуры обеспечивать расположение полюсов замкнутой системы в заданную область. При синтезе регуляторов для объектов, у которых не все нули лежат в левой открытой полуплоскости, часто получаются системы, которые не удовлетворяют предъявляемым к ним требованиям, в связи с этим ставится задача разработки специальных диаграмм зависимости показателей качества переходных процессов от расположения полюсов в системе при наличии нуля, лежащего в правой полуплоскости комплексной плоскости. Для оценки возможности задания полюсов системы при синтезе регуляторов пониженного порядка предлагается использовать расширенные диаграммы Вышнеградского, позволяющие анализировать более широкий спектр расположения полюсов.

Методы исследования. При выполнении исследовательской работы и решении поставленных задач использовались методы теории автоматического регулирования одноканальных и многоканальных систем, теории устойчивости, теории полиномиальных матриц, некоторые разделы линейной алгебры и математического анализа. При исследовании алгоритмов управления, моделей и свойств систем применялись стандартные математические пакеты программ.

Достоверность и обоснованность результатов подтверждается применением разработанных методик для синтеза технологических процессов и ряда тестовых объектов, многочисленными экспериментами, публикациями полученных результатов в различных журналах, в том числе и в изданиях из перечня российских рецензируемых журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание степеней доктора и кандидата наук. Расчеты и моделирование проводились при помощи программных продуктов *Matlab* и *Mathcad*.

Научная новизна. В диссертационной работе можно выделить следующие основные результаты, характеризующие ее научную новизну:

- разработана методика синтеза многоканальных регуляторов с использованием матрицы Сильвестра, которая позволяет синтезировать как регулятор полного порядка, так и пониженного;

- разработана итерационная методика синтеза многоканальных регуляторов пониженного порядка с использованием матрицы Сильвестра и обратного дифференцирования матричного характеристического уравнения;

- дополнены диаграммы Вышнеградского, позволяющие анализировать более широкий спектр расположения полюсов в системе, для систем 4-го порядка представлена интерпретация границы устойчивости на диаграмме Вышнеградского, предложено обобщение диаграмм Вышнеградского с помощью проективной сферы;

- представлены диаграммы зависимости показателей качества переходных процессов от расположения полюсов при наличии в системе нуля «справа»;

- представлена возможность распространения полиномиальной методики модального метода синтеза на примере расчета нелинейных регуляторов для объектов, модель которых представлена в виде нелинейных дифференциальных уравнений;

- совместно с тремя авторами создан и зарегистрирован пакет функций в *Mathcad* для выполнения операций с полиномиальными матрицами. После чего автором были внесены дополнения и исправления.

На защиту выносятся следующие положения:

- методика синтеза многоканальных регуляторов с использованием полиномиального разложения, позволяющая синтезировать регуляторы как полного, так и пониженного порядка;

- оптимизационная методика синтеза многоканальных регуляторов пониженного порядка с использованием матрицы Сильвестра и обратного дифференцирования матричного характеристического уравнения;

- модифицированные диаграммы Вышнеградского, позволяющие анализировать более широкий спектр полюсов системы управления;

- диаграммы зависимости показателей качества переходных процессов от расположения полюсов при наличии в системе нуля «справа»;

- синтез нелинейного регулятора полиномиальной методикой модального метода синтеза для нелинейной системы «качетка – перевернутый маятник».

Теоретическая и практическая значимость. Разработаны новые методики синтеза многоканальных регуляторов полного и пониженного порядка, использующие полиномиальное разложение объекта и регулятора. Для систем с нулями, лежащими в правой полуплоскости комплексной плоскости, предложены диаграммы, позволяющие по предъявляемым к системе требованиям выбирать желаемое расположение полюсов. Примененные подходы позволяют ре-

ализовывать процедуру синтеза многоканальных регуляторов на базе современных средств автоматизации и управления технологическими процессами, применяемыми в промышленности. Кроме того, предлагаемые методики поддержаны зарегистрированной программой для ЭВМ (свидетельство № 2013614151).

Следует отметить, что диссертационная работа поддержана грантом по заданию Министерства образования и науки по проекту «Исследование предельных точностей оптических методов измерения параметров движения и мехатронных методов управления движением и разработка новых робототехнических и электромеханических систем», темплан, проект № 7.559.2011, гос. рег. номер НИР №01201255056.

Реализация результатов работы. Работа выполнялась на кафедре автоматки Новосибирского государственного технического университета. Результаты исследований применены при создании алгоритмов управления в различных отраслях промышленности, что подтверждается соответствующими актами о внедрении, а именно: при разработке системы управления температурным режимом в камере полимерной покраски, а также в системе стабилизации колонны синтеза аммиака. Полученные результаты также внедрены в учебном процессе в курсе лекций и лабораторных работ «Теория автоматического управления и многоканальные системы управления», читаемые для студентов специальностей 2204011.65 (Управление и информатика в технических системах), что также подтверждается соответствующим актом.

Результаты диссертационной работы были использованы при разработке и внедрении регулятора для стабилизации температурного режима камеры полимерной покраски на базе промышленного ПК (*Cortex V7*) на ООО ППК «Эссанлифтэк» (г. Новосибирск). Предложенный алгоритм поиска регулятора пониженного порядка в настоящее время активно внедряется в ЗАО «СИНЕТИК» (г. Новосибирск) при разработке программного обеспечения (на базе программного обеспечения *WINCC* и *PCS7*) управления технологическими процессами в химической промышленности на производстве ООО «СаянскХимПласт» (г. Саянск), а также ООО «Сода-Хлорат» (г. Березники).

Личный вклад. Все результаты, приведенные в диссертационной работе, за исключением идеи использования обратного дифференцирования для синтеза регуляторов пониженного порядка, которая была разработана в соавторстве с Шобой Е. В. и нашедшая отражение в его диссертационной работе¹ (с. 100-109), получены автором лично. В дальнейшем идея использования обратного дифференцирования автором была переработана и модифицирована.

¹ Шоба Е.В. Модальный метод синтеза многоканальных динамических систем с использованием полиномиального разложения: дис. ... канд. техн. наук. – Новосибирск: НГТУ, 2013. – 192 с.

Апробация работы. Основные положения диссертации представлялись на The second Russian-Indian Join Workshop on computational Intelligence and Heuristics in Automation And Robotics, CIMHAR-2011 (Novosibirsk, NSTU, 10–13 September, 2011), на одиннадцатой международной научно-технической конференции АПЭП-2012 (Новосибирск, НГТУ, октябрь 2012 г.), VIII международной научно-практической конференция «Теория и практика со временной науки» (г. Москва, 26–27 декабря 2012 г.), VII международная научно-практическая конференция "Тенденции и инновации современной науки" (Краснодар, апрель 2013 г.), IV международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты» (Новосибирск, 8 мая 2013 г.), XII международная научно-практическая конференция «Перспективы развития информационных технологий» (Новосибирск, 23 апреля 2013 г.), всероссийской научной конференции молодых учёных «НАУКА. ТЕХНОЛОГИИ. ИННОВАЦИИ» НТИ-2012 (Новосибирск, НГТУ, ноябрь 2012 г.), городской научной конференции по теории автоматического управления и регулирования (Новосибирск, НГТУ, май 2011 г.), городской научной конференции по теории автоматического управления и регулирования (Новосибирск, НГТУ, май 2011 г.), в школе молодых учёных САИТ-2011 секции №2 «Информационные технологии в системах автоматического и автоматизированного управления» (Новосибирск, 12–16 сентября 2011 г.), научных семинарах кафедры «Автоматики» НГТУ (2011–2013 г.).

Публикации. Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 27 работах, в том числе: 4 статьи в изданиях из перечня российских рецензируемых журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание степеней доктора и кандидата наук; получено свидетельство о регистрации программы для ЭВМ; 16 статей в сборниках научных трудов и 6 статей в сборниках трудов и материалах международных и российских конференций.

Структура и объём работы. Работа изложена на 173 страницах машинописного текста. Состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 124 наименования и пяти приложений. Основное содержание диссертации изложено на 150 страницах, включая 65 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во *введении* дается общая характеристика работы, обсуждается актуальность решаемых задач, сформулированы цель и задачи работы, а также ее научная новизна.

Первая глава посвящена обзору модальных методов синтеза с использованием описания многоканальных объектов управления в пространстве состояний,

матричных передаточных функций и полиномиального разложения. Рассматривается существующая терминология в области синтеза регуляторов пониженного порядка, приводится определение и актуальность решения задач поиска таких регуляторов. Выделяется два основных направления их синтеза и анализируются некоторые методики по каждому из направлений.

Модальный метод синтеза в *пространстве состояний* применяется, по большей части, для систем, работающих в режиме отработки начальных условий. Модель замкнутой системы управления представляется в следующем виде: $\dot{x} = Ax + Bu$, $y = Cx$. При этом предполагается пропорциональный закон управления $u = -Kx + v$, где K – матрица неизвестных коэффициентов, которые обеспечивают требуемое расположение корней характеристического полинома замкнутой системы. При этом уравнение системы преобразуется к виду $\dot{x} = (A - BK)x + Bv$, $y = Cx$. Если вектор состояния объекта не доступен измерению, то в систему необходимо вводить *наблюдатель полного порядка*. Управляющее воздействие формируется в виде $u = -K\tilde{x} + v$, где \tilde{x} – оценка вектора состояния объекта управления. А уравнение вводимого в систему наблюдателя полного порядка: $\dot{\tilde{x}} = A\tilde{x} + Bu + L(y - C\tilde{x})$, где L – матрица наблюдателя, определяется из условия того, что процессы в наблюдателе должны быть быстрее процессов объекта. Можно также использовать *наблюдатель пониженного порядка*, тогда оценка вектора состояния определяется как $\dot{z} = Fz + G_1y + G_2u$, $\tilde{x} = Hz + Gy$, где $\dim F = (n - m) \times (n - m)$, $\dim G = n \times m$, $\dim G_1 = (n - m) \times m$, $\dim G_2 = (n - m) \times m$, $\dim H = n \times (n - m)$, а матрица T , связывающая переменные z и $x - z = Tx$, имеет размеры $(n - m) \times n$. Поиск наблюдателя пониженного порядка сводится к вычислению матриц F , G , G_1 , G_2 , F и T .

Часто при синтезе систем модальным методом используется описание объекта в виде *матричной передаточной функции*, которая характеризует передачу взаимодействий в многомерной системе управления (*multivariable control system*) и взаимосвязь между ее каналами. Такой подход удобно использовать, когда измерению доступен не весь вектор состояния объекта, а только его выходная переменная. Матричное звено с n входами и n выходами описывается системой уравнений относительно выходных координат: $y = W(s)x$, где $x = [x_1, \dots, x_n]^T$ и $y = [y_1, \dots, y_n]^T$ – n -мерные векторы, а $W(s) = [w_{ij}(s)]_{i,j=1,n}$ – матричная передаточная функция системы. Элементы, стоящие на главной диагонали матричной передаточной функции – это собственные передаточные функции каналов (i -й вход и i -й выход). Недиагональные элементы характеризуют перекрестные связи многоканальной системы автоматического управления, иначе говоря, они характеризуют степень влияния j -го входа на i -й выход. Иногда от матричной передаточной функции переходят к описанию, использующего *присоединенную матрицу*.

От описания системы в матричном виде несложно перейти к описанию в виде *полиномиального разложения* в следующем виде:

$$G(s) = D_l^{-1}(s)N_l(s) = N_r(s)D_r^{-1}(s),$$

где $D_l(s)$, $N_l(s)$, $N_r(s)$, $D_r(s)$ – полиномиальные матрицы, соответствующие левому и правому описанию объекта соответственно. В таком случае задача синтеза (т.е. расположения полюсов замкнутой системы) сводится к решению матричного полиномиального уравнения (*polynomial matrix equation*):

$$Y(s)D(s) + X(s)N(s) = F(s),$$

где $F(s)$ – желаемая характеристическая матрица замкнутой системы. С математической точки зрения проблема решения этого полиномиального уравнения эквивалентна решению уравнения $YD + XN = F$, где Y , X – числовые матрицы неизвестных, а D , N и F – заданные числовые матрицы. Решение этого уравнения является достаточно старой математической проблемой, которую обычно связывают с такими математиками как Диофант, Безу и Ариаббата.

Одной из важнейших задач в теории автоматического регулирования является синтез регуляторов как можно более простой структуры. В настоящее время существует огромное количество работ посвященных синтезу таких регуляторов. Следует отметить, что нет единства в терминологии относительно регуляторов пониженного порядка. Так, например, в различных источниках применяются следующие термины: *регулятор пониженного порядка*, *регулятор с заданной структурой*, *фиксированного порядка* или *низкого порядка*.

Проблема синтеза регуляторов пониженного порядка становится все более актуальной, что обусловлено сложностью и практической нецелесообразностью реализации регуляторов полного порядка. А имеющиеся методы их расчета зачастую довольно сложны с вычислительной точки зрения. Следует отметить, что в некоторых работах поиск регулятора пониженного порядка относят к так называемым NP – сложным задачам. Сама же задача поиска регулятора пониженного порядка является невыпуклой и многоэкстремальной. Поэтому предлагаемые методы решения таких задач обычно исходят из достаточных условий. В ряде случаев задача может не иметь решения, в связи с недостаточным количеством параметров регулятора или исходных данных для ее решения.

В общем случае методы синтеза регуляторов пониженного порядка можно разделить на два класса: *прямые* и *косвенные*. В первом случае неизвестные параметры регулятора вычисляются при помощи некоторой оптимизационной (или какой-либо другой) процедуры. Во втором случае используется редуционный подход, т.е. вначале проводится редукция модели, для которой синтезируется регулятор, а далее регулятор применяется для исходного объекта. Редуционный подход рассматривает также синтез регуляторов полного порядка, которые в дальнейшем упрощаются. Особое внимание уделяется методам, использующих дифференцирование (в том числе и обратное) и решающих задачи D -стабилизации.

Как известно, на качество переходных процессов в системе влияет не точечное расположение желаемых полюсов, а их расположение в заранее заданной определенной области. Следует отметить, что для системы с регулятором пониженного порядка не имеется возможности точного назначения полюсов. Но если потребовать расположение корней в желаемой области, то такая задача может быть решена с помощью регулятора пониженного порядка.

Во *второй главе* приводится формализация существующих полиномиальных методик синтеза многоканальных регуляторов, представленных в различных источниках в неявном и затрудненном для понимания виде. Все методики доводятся до уровня пошаговых процедур расчета, многие моменты получены путем самостоятельной доработки и изучения дополнительной литературы.

В разделе 2.1 предлагается формализованная пошаговая методика синтеза многоканальных регуляторов полного порядка модальным методом при описании объекта в виде правого полиномиального разложения. Синтез регулятора возможен если описание объекта представлено строго правильной матричной передаточной функцией в виде правого полиномиального разложения $W_o(s) = N(s)D^{-1}(s)$, где матрицы $D(s)$ и $N(s)$ взаимно-простые справа, а матрица $D(s)$ столбцово приведенная. В общем случае методику можно разбить на несколько пунктов:

1) Формирование матрицы Сильвестра:

$$S = \begin{bmatrix} D_0 & D_1 & \dots & D_\mu & 0 & 0 & \dots & 0 \\ N_0 & N_1 & \dots & N_\mu & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & \dots & 0 & D_0 & D_1 & \dots & D_\mu \\ 0 & 0 & \dots & 0 & N_0 & N_1 & \dots & N_\mu \end{bmatrix},$$

где $\mu := \max(\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_p)$ – максимальная столбцовая степень матрицы $D(s)$.

2) Выбор столбцовых степеней параметров регулятора $m_i \geq v - 1$, где $v := \max(v_1, v_2, \dots, v_q)$ – строчный индекс матрицы Сильвестра.

3) Выбор и проверка желаемой характеристической матрицы.

4) Составление и решение матричного уравнения $RS = F$, где $R = [Y_0 \ X_0 \ Y_1 \ X_1 \ \dots \ Y_m \ X_m]$, а $F = [F_0 \ F_1 \ \dots \ F_{m+\mu}]$.

5) Проверка решения и моделирование (при необходимости). ■

Представленную методику не совсем удобно применять для синтеза систем, когда регулятор имеет заданную структуру, так как возникают проблемы, связанные, например, с невозможностью задания точного распределения полюсов системы. В связи с этим, в следующем разделе рассматривается формализованная методика, позволяющая синтезировать регулятор заданной структуры. Методика изложена в принятых в данной работе обозначениях, а некоторые пункты частично дополнены. К сожалению, в ней не проработаны способы расчета порядка регулятора и полиномов желаемой характеристической матрицы.

Далее приводится методика синтеза многоканального регулятора на основе декомпозирующего управления (раздел 2.3). В отличие от ранее представленных методик, описание объекта рассматривается в виде присоединенной матрицы и полинома, представляющего собой детерминант исходной матрицы. Она также предложена в неявном виде, поэтому в диссертации представлена ее формализация до удобной в применении пошаговой процедуры. Применение

декомпозирующей матрицы, возможно, если исходный объект асимптотически устойчив, т.е. $A(s) = \det(sI - A) \in \Omega$. Если это условие не выполняется, то вначале предлагается вводить в систему дополнительное устройство стабилизации объекта, что значительно усложняет задачу синтеза.

Как было показано в первой главе применение дифференцирования для расчета регулятора приводит к потере его коэффициентов, стоящих при младших степенях. Для исключения этого явления предлагается использовать обратное дифференцирование, свойства которого рассматриваются в разделе 2.4.

Определение 1. Обратное дифференцирование полинома $p(s)$ – это дифференцирование его «справа»² $d\bar{p}(s)/ds = d(s^n p(1/s))/ds$, с дальнейшим возвратом к старой переменной s . В разделе получены ряд важных утверждений и свойств обратного дифференцирования. Например, если $p(s)$ полином Гурвица, то и полином $\bar{p}(s) = dp(s) \setminus ds = s^n \tilde{p}'(s^{-1})$ есть полином Гурвица.

При осуществлении над полиномом операции «обратного» дифференцирования, происходит «сдвиг» полученной выпуклой области корней влево, относительно выпуклой корневой области исходного полинома. Еще одним полезным для синтеза свойством является следующее полученное утверждение.

Утверждение 1. Операция обратного дифференцирования над матричным полиномом степени n , представленным в матричном виде, сводится к «вычеркиванию» первого столбца (соответствующего старшей степени n) с последующим умножением всех блочных коэффициентов i -го столбца на число $i = \overline{1, n-1}$, равное номеру этого столбца (при нумерации слева-направо).

При синтезе регуляторов невысокого порядка (до 3-го включительно) можно пользоваться известными диаграммами Вышнеградского, так как задача синтеза регулятора пониженного порядка сводится не к точному заданию полюсов системы, а к их расположению в определенной области. А для удобства анализа переходов между различными возможными распределениями корней на диаграмме Вышнеградского (рисунок 1) можно применить аппарат симплектических графов, разработанный А. В. Чехонадским (рисунок 2).

При анализе представленных выше подходов возникает вопрос о переносе модальных методик синтеза на нелинейные системы. В связи с чем, в разделе 2.7. приводится краткий обзор существующих методов синтеза нелинейных систем, выделяются классические (метод локализации, больших коэффициентов, скользящих режимов и др.) и новые подходы (САОМ³, пассивации и др.) особое внимание уделяется методу аналитического решения задачи синтеза на основе квазилинейной формы уравнений объекта, так как он разработан на основе *модального метода синтеза линейных систем*.

² Немировский, А. С. Необходимые условия устойчивости полиномов и их использование / А. С. Немировский, Б. Т. Поляк // *АиТ*. – 1994. – №11. – С. 113–119.

³ Метод сигнально адаптивных обратных моделей, разработанный профессором Панкратовым В. В.

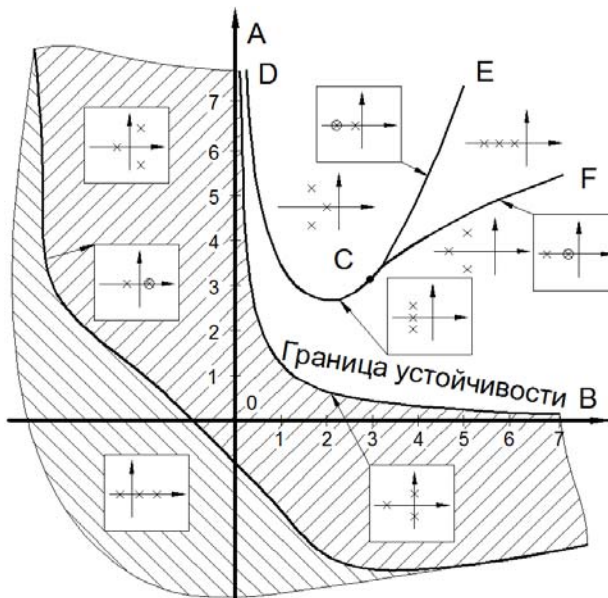


Рисунок 1 – Модифицированная диаграмма Вышнеградского

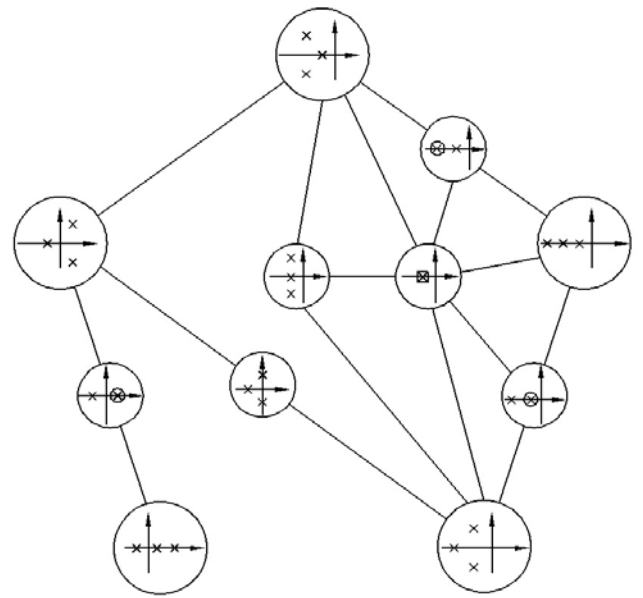


Рисунок 2 – Симплектический граф для диаграммы Вышнеградского

Рассмотренные методики синтеза решают задачу расположения полюсов замкнутой системы, для задания желаемого расположения которых обычно используются соотношения: $\eta \geq 3/t_n^*$, $\mu^* = -\pi / \ln 0,01\sigma^*$, $\beta = \eta\mu^*$ или стандартные распределения корней: по биному Ньютона, Баттерворта, Чебышева и Бесселя. Возникает вопрос о связи расположения полюсов на переходные процессы в системе при наличии нулей у объекта, особенно нулей «справа». Синтезируемые регуляторы могут содержать в своем составе нули, которые в совокупности с нулями объекта значительно влияют на характер переходных процессов.

В конце главы ставятся следующие задачи диссертационного исследования: создание универсальной методики синтеза многоканальных регуляторов полного и пониженного порядка, разработка модифицированной методики синтеза с использованием принципов оптимизации и обратного дифференцирования, разработка диаграмм зависимости показателей качества переходных процессов при наличии в системе нулей справа, модификация диаграмм Вышнеградского для более полного оценивания корневых портретов системы, а также рассмотрение возможности распространения полиномиальной методики модального синтеза линейных систем на нелинейные объекты.

В *третьей главе* на основе методик, представленных ранее, предлагается универсальная методика, позволяющая решать задачу поиска регуляторов полного и пониженного порядка. Методика основана на решении матричного характеристического уравнения при частично заданной структуре регулятора:

1) *Формирование математической модели объекта.* Суть пункта заключается в получении математической модели объекта в виде правого взаимного простого матричного полиномиального разложения.

2) *Формирование матрицы Сильвестра.* В отличие от работ *Antsaklis, Wang, Chen* и др. предлагается формировать матрицу Сильвестра в виде, более удобном для определения линейно независимых N_i строк.

3) *Масштабирование*. В зависимости от значения обусловленности или детерминанта матрицы Сильвестра предлагается использовать либо параметрическое масштабирование, либо масштабирование по времени.

4) *Выбор параметров регулятора*. На основе полученного в 2) строчного индекса матрицы «знаменателя» рассчитывается степень регулятора полного порядка и выбирается необходимая структура регулятора.

5) *Выбор и проверка желаемой характеристической матрицы*. Рассчитывается степень и выбирается структура желаемой характеристической матрицы.

6) *Формирование и решение матричного уравнения $RS = F$* . Заключается в удалении нулевых и линейно зависимых строк и столбцов правой и левой частей уравнения.

7) *Проверка решения и моделирование (при необходимости)*. ■

Методика синтеза регуляторов пониженного порядка, в основу которой заложена оптимизационная процедура сдвига полюсов замкнутой системы в желаемую область предлагается в разделе 3.2. Для уменьшения количества решаемых уравнений предлагается обратно дифференцировать характеристическое матричное уравнение замкнутой системы, матрицу соответствующую желаемому распределению корней предлагается задавать для обратно продифференцированной системы уравнений, а «попадание» полюсов полной системы можно отслеживать при помощи корневых годографов. Методика:

1) *Формирование математической модели объекта*.

2) *Выбор желаемой области расположения полюсов*. Исходя из требований к показателям качества переходных процессов в системы, задается желаемая область расположения полюсов системы Ω_D .

3) *Формирование матрицы Сильвестра*.

4) *Масштабирование (при необходимости)*.

5) *Выбор параметров регулятора*. Расчет столбцовых степеней $m_i \geq v - 1$ и составление матрицы $R = [Y_m \ Y_{m-1} \ \dots \ Y_0 \ X_m \ X_{m-1} \ \dots \ X_0]$. Выбор необходимой структуры регулятора, задавая некоторые матрицы $Y_i, X_i, i = \overline{0, m}$ нулевыми.

6) *Обратное дифференцирование характеристической матрицы*. Выписывается левая часть диофантова уравнения $\bar{Y}(s)D(s) + \bar{X}(s)N(s)$ и обратно дифференцируется l раз $d^l(\bar{Y}(s)D(s) + \bar{X}(s)N(s)) \setminus ds^l$.

7) *Расчет и проверка желаемой характеристической матрицы для обратно продифференцированной системы*. Вычисляются столбцовые степени $f_i, i = \overline{1, p}$ и выбирается $f_{\max} = (f_1, \dots, f_i), i = \overline{1, p}$. Вычисляются степени $\bar{f}_j = f_j - l, j = \overline{1, k}$, где k – количество столбцов матрицы \bar{F} со столбцовыми степенями равными f_{\max} . Выбирается структура (диагональная⁴ или не диагональная) и формируется характеристическая матрица системы в виде матрично-

⁴ Диагонализация «знаменателя» облегчает решение задачи автономного управления или задачи И. Н. Вознесенского.

го полинома. Задаются желаемые корни⁵ для обратного проинтегрированной системы (с учетом масштабирования), рассчитывается каждый полином и составляется матрица $\bar{F} = [\bar{F}_{m+\mu} \ \bar{F}_{m+\mu-1} \ \dots \ \bar{F}_0]$.

8) *Формирование и решение матричного уравнения.* Выписывается система уравнений в матричном виде: $\bar{R}\bar{S} = \bar{F}$, дальнейшее решение которой заключается в удалении нулевых и линейно зависимых строк и столбцов правой и левой частей уравнения. Восстанавливается матрица R и выписываются полиномиальные матрицы регулятора $Y(s)$ и $X(s)$.

9) *Анализ полученного решения.* Находится характеристическая матрица системы, и вычисляются полюса замкнутой системы. Если хоть один полюс не попал в желаемую область устойчивости, то необходимо вернуться назад к 7), задать новое значение для желаемого полинома \bar{F} и повторить расчеты. Если все полюса попали в желаемую область, то процедура синтеза регулятора заканчивается.

10) *Проверка решения и моделирование (при необходимости).* ■

Для систем с правыми нулями в разделе 3.3 предлагаются диаграммы зависимости показателей качества переходных процессов от расположения полюсов в системе (рисунок 3). Диаграммы можно использовать при задании желаемого расположения полюсов системы на основе требований к показателям качества переходных процессов.

В качестве примера синтеза регулятора с использованием диаграмм рассматривается объект: $W_o(s) = (-s + 1) / (s + 1)$. Регулятор предлагается: $W_r(s) = k / (s + \alpha)$. Требования к поведению замкнутой системы предлагается формировать в виде оценок переходного процесса. Перерегулирование $\sigma^* \leq 10\%$, время переходного процесса $t_n^* \leq 0,5$ сек., выброс $\xi \leq 50\%$. Графическая интерпретация требований представлена рисунках 4 и 5. В результате расчетов удалось обеспечить требуемые показатели. Далее рассматривался объект второго порядка: $W_o(s) = (-s + 1) / (s^2 + 1)$. Требования к качеству процессов предъявлялись аналогичные. Однако, в результате расчетов в структуре регулятора появилась пара комплексно сопряженных нулей, с положительной вещественной частью. И как следствие – неудовлетворительные переходные процессы в замкнутой системе.

⁵ В соответствии с теорией графов, разработанной А. В. Чехонадских, предлагается на первоначальном этапе задавать желаемые корни кратными с мнимой частью равной нулю. А далее при достижении некоторого оптимального значения расположения полюсов системы, задавать не нулевые мнимые части желаемых корней обратного проинтегрированного полинома.

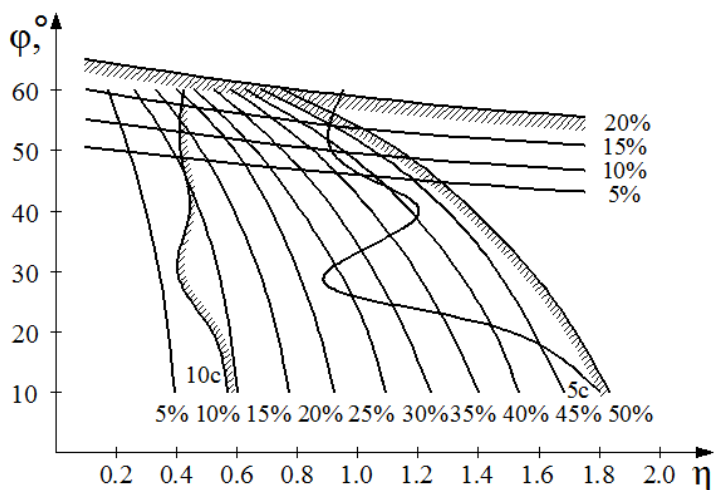


Рисунок 3 – Совмещенная диаграмма

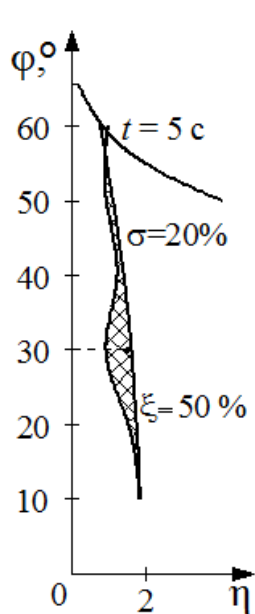


Рисунок 4 – Совмещенная диаграмма ($t_n^* \leq 5$ с.)

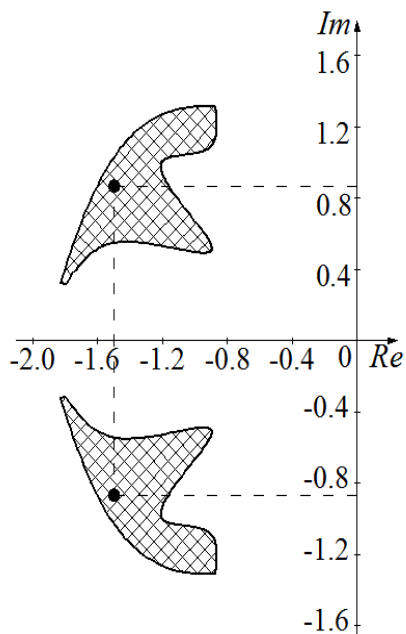


Рисунок 5 – Корневой портрет для совмещенной диаграммы



Рисунок 6 – Граница устойчивости ($C = 3$)

Для решения данной проблемы можно предложить два возможных пути. В первом случае нужно выбирать регулятор без нулей, либо с заранее заданными «левыми» нулями. Во втором случае нужно построить семейства диаграмм зависимости показателей качества переходных процессов при наличии в системе двух и более положительных нулей.

Расширенные диаграммы Вышнеградского, учитывающие случаи, когда один из полюсов строго равен нулю ($q^3 + Aq^2 + Bq = 0$) или когда коэффициент при старшей степени равен минус единице ($-q^3 + Aq^2 + Bq + 1 = 0$) предлагаются в разделе 3.4. Также приводится граница устойчивости для случая, когда степень характеристического полинома равна четырем (рисунок 6) $q^4 + Aq^3 + Bq^2 + Cq + 1 = 0$.

Дается их интерпретация в виде проективной сферы (рисунок 7). На сфере области с различным расположением корней имеют конечные размеры. Кроме того, она позволяет исследовать всевозможные комбинации корней. Приводится пример синтеза одноканального регулятора пониженного порядка на основе модифицированных диаграмм Вышнеградского.

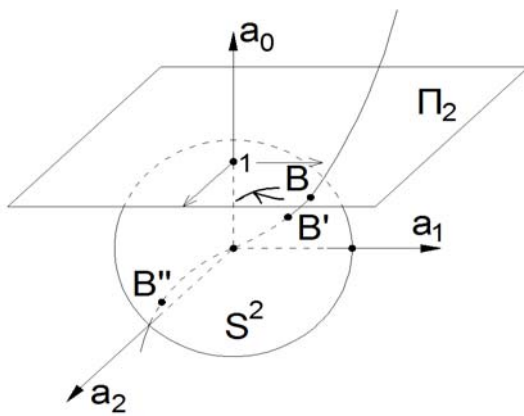


Рисунок 7 – Пространство (a_2, a_1, a_0) .

Диаграмма Вышнеградского

моделированием, которое показало, что замкнутая нелинейная система приобрела линейные свойства.

В *четвертой главе* выполняется проверка предложенной в предыдущей главе методики вначале на тестовом примере, а далее предлагается расчет регуляторов для систем стабилизации температурным режимом колонны синтеза аммиака и камеры полимерной покраски. Кроме того для нелинейного объекта «каретка - перевернутый маятник» предлагается расчет нелинейного регулятора с использованием полиномиальной методики синтеза.

Для трехмассовой системы без демпфирования, в виде трех пружин и трех грузов, подвешенных последовательно, рассматривается синтез регулятора пониженного порядка. Требуется, чтобы все полюса по первому каналу удовлетворяли условию $\text{Re } s_i \leq -0,5$, а по второму каналу $\text{Re } s_j \leq -1$. Регулятор полного порядка можно представить в виде: $Y(s) = Y_3s^3 + Y_2s^2 + Y_1s + Y_0$ и $X(s) = X_3s^3 + X_2s^2 + X_1s + X_0$. Предлагается расчет астатического регулятора пониженного порядка, т.е. выбирается $Y_0 = [0]_{4 \times 4}$. Для выравнивания количества решаемых уравнений и переменных используется операция обратного дифференцирования матричного характеристического полинома системы. Желаемая характеристическая матрица для обратно продифференцированной системы выбирается диагонального вида со столбцовыми степенями $\bar{f}_1 = 5$, $\bar{f}_2 = 6$. В качестве диагональных полиномов выбираются полиномы с кратными корнями. Получили матрицу \bar{S} размерностью 14×14 и $\text{rank}(\bar{S}) = 12$. После удаления линейно зависимых строк в матрицах \bar{S} , \bar{R} и \bar{F} получили систему, решение которой ищется в виде $\bar{R}_1 = \bar{F}_1 \cdot \bar{S}_1^{-1}$. Если задавать кратные корни для желаемой характеристической полиномиальной матрицы \bar{F} в интервале от минус 0,38 до минус 1 с шагом минус 0,01, то корневые годографы «движения» полюсов по каждому из каналов выглядят так, как показано на рисунках 8, 9.

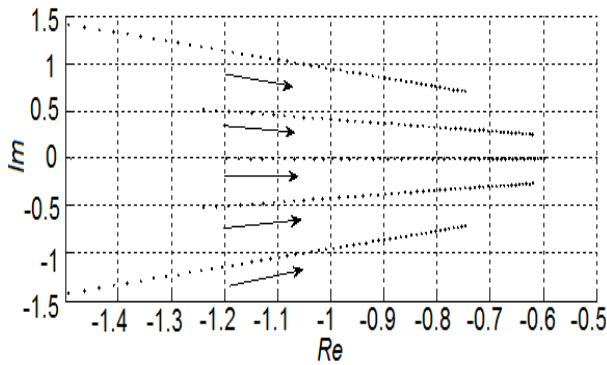


Рисунок 8 – Корневые годографы по первому каналу

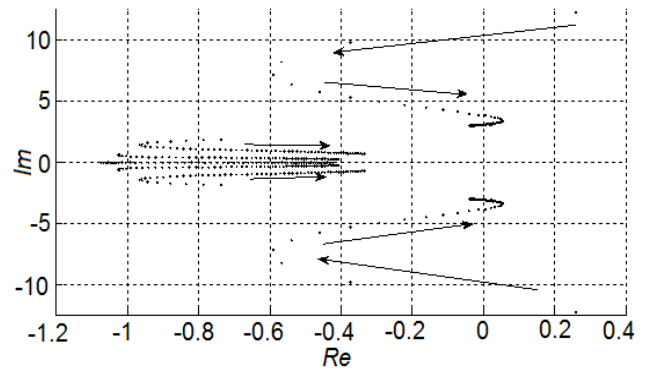


Рисунок 9 – Корневые годографы по второму каналу

При $\bar{s}_1 = \bar{s}_2 = -0,4$ предъявляемые к системе требования выполняются. Полюса исходной системы по первому каналу: $-1,266 \pm 1,199i$, $-1,051 \pm 0,436i$ и $-1,015$, а по второму каналу: $-0,568 \pm 8,215i$, $-0,8353 \pm 1,761i$, $-1,024 \pm 0,644i$ и $-1,06$. Рассчитанный регулятор пониженного порядка получили в виде: $Y(s) = Y_3s^3 + Y_2s^2 + Y_1s$ и $X(s) = X_2s^2 + X_1s + X_0$.

В разделе 4.2 в качестве объекта управления рассматривается камера полимерной покраски, в которой необходимо обеспечивать равномерный нагрев и время переходных процессов примерно 30 с. В качестве передаточных функций, характеризующих поведение отдельных секций, предложена аппроксимация процесса в виде апериодических звеньев второго порядка $W_i(s) = a_i \cdot (s + b_i)^{-2}$, $i = \overline{1,4}$. Предлагается рассчитывать многоканальный ПИ-регулятор. В работе приводится преобразование описания объекта к правому взаимно простому полиномиальному описанию. Регулятор выбирается в виде $W_r(s) = Y(s)^{-1} \cdot X(s)$, где $X(s) = X_1s + X_0$, $Y(s) = Y_1s$. Объект представляется матричными полиномами $D_r(s) = D_2s^2 + D_1s + D_0$ и $N_r(s) = N_2s^2 + N_1s + N_0$.

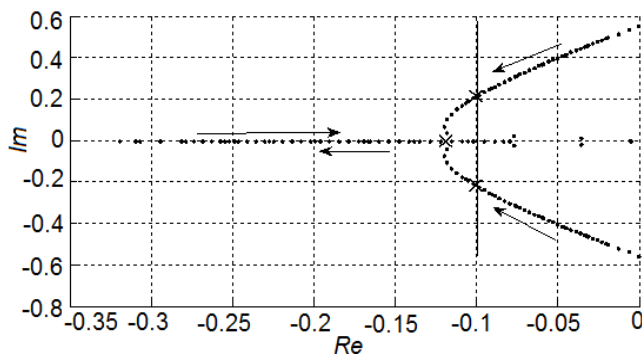


Рисунок 10 – Корневой годограф «движения» полюсов замкнутой системы

представлен на рисунке 10. В результате получили следующие матрицы регулятора:

После обратного дифференцирования матричного характеристического полинома, задавая желаемые полиномы с кратными корнями в интервале $[-0,1; -1]$ с шагом минус 0,01, решается система $\bar{R} = \bar{F}\bar{S}^{-1}$ и определяются полюса замкнутой системы, пока все они не попадут в желаемую область $\text{Re}s_i \leq -0,1$. Соответствующий корневой годограф

$$Y(s) = \begin{bmatrix} 3,1s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 3,1s & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 3,1s & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3,1s \end{bmatrix}, X(s) = \begin{bmatrix} 3,3s + 0,4 & 1,8s & 0 & 0 \\ -1,2s & 3,3s + 0,4 & 1,8s & 0 \\ 0 & -1,2s & 3,3s + 0,4 & -1,2s \\ 0 & 0 & 1,8s & 3,3s + 0,4 \end{bmatrix}.$$

Переходные процессы в системе, в сравнении с ранее предлагаемым регулятором, представлены на рисунках 11, 12.

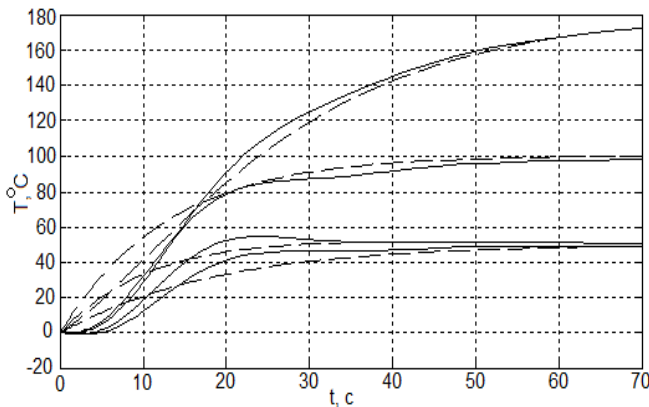


Рисунок 11 – Выход на заданный температурный режим

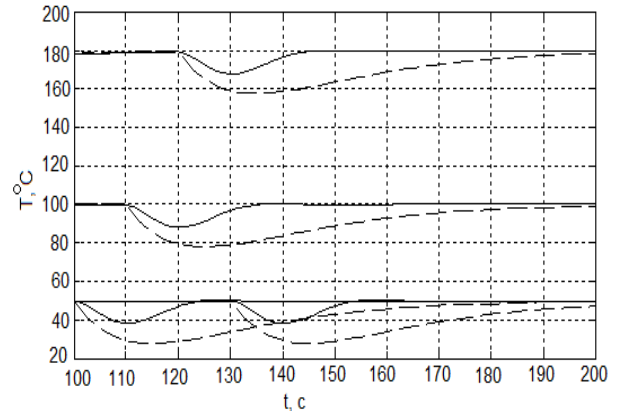


Рисунок 12 – Отработка температурных возмущений

Предложенный регулятор компенсирует возмущения быстрее (20 с, вместо 80 с) и с меньшим перерегулированием (примерно на 50%).

Синтез регулятора пониженного порядка для стабилизации четырехполочной колонны синтеза аммиака, математическая модель которой представляется в виде матричной передаточной функции:

$$W_o(s) = \begin{bmatrix} \frac{-1,5}{(1+1,9p)^2} & 0 & 0 \\ \frac{-1,5}{(1+2,9p)^2} & \frac{-0,7}{(1+2,9p)^2} & 0 \\ \frac{-1,4}{(1+4,3p)^2} & \frac{-0,7}{(1+3,7p)^2} & \frac{-0,4}{(1+3,7p)^2} \end{bmatrix}$$

приводится в разделе 4.3. В работе приводится расчет правого взаимно простого полиномиального разложения через матрицы преобразования. Предлагается использовать ПИ-регулятор взамен ПИД-регулятора, используемого в настоящее время. При этом при решении пришлось использовать параметрическое масштабирование матриц «числителя» и «знаменателя», а также трижды обратно дифференцировать исходную систему уравнений. Для расчета параметров регулятора была написана программа на языке программирования *Matlab* и составлена схема моделирования в *Simulink*. Получены графики переходных процессов представленные на рисунках 13, 14.

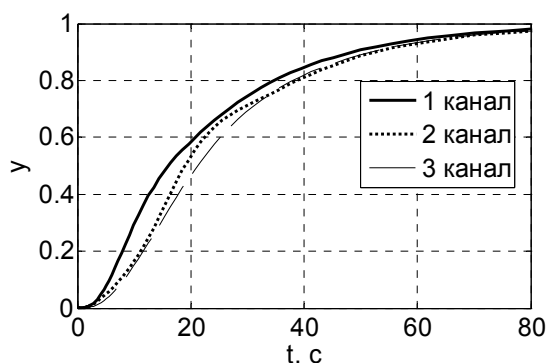


Рисунок 13 – Выход на режим

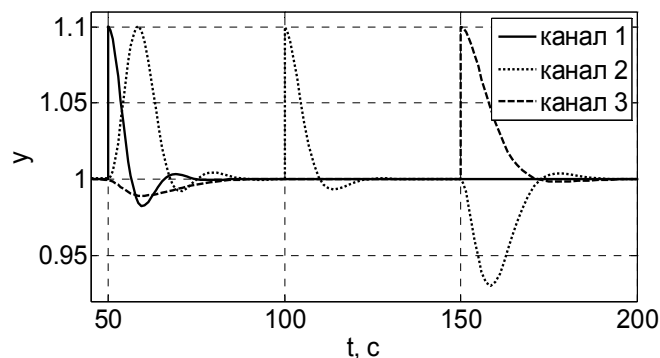


Рисунок 14 – Обработка возмущений

Предложенный регулятор обеспечивает выход на заданный режим без перерегулирования и достаточно быстро отрабатывает поступающие в систему возмущения. Кроме того, как показано в диссертации, действие помех связанных с зашумлением измеряемых сигналов не влияет на устойчивость системы.

В следующем разделе, в соответствии с алгоритмом, представленным в главе 3, приводится синтез нелинейного регулятора для перевернутого маятника, математическая модель которого представлена в виде нелинейного дифференциального уравнения:

$$(1 - ml(M_t L)^{-1} \cos^2 \theta) \ddot{\theta} - gL^{-1} \sin \theta + ml(M_t L)^{-1} \sin \theta \cos \theta \cdot \dot{\theta}^2 = -(M_t L)^{-1} \cos \theta \cdot u.$$

Расчет проводился при помощи полиномиальной методики модального метода синтеза, в предположении полной доступности вектора состояния, и состоял из двух этапов. На первом предлагается такой регулятор, при добавлении которого в систему нелинейная модель объекта будет аналогична линеаризованной (в окрестности точки $\theta = 0, \dot{\theta} = 0$): $0,3\ddot{\theta} - 10\theta = -0,01u$, то есть предлагается следующее уравнение регулятора $-0,01 \cos \theta u = \alpha \ddot{\theta} - \beta \dot{\theta} - \gamma \theta - \eta \ddot{\theta}$. Коэффициенты которого после соответствующих расчетов:

$$\alpha = -0,01, \beta = (10 \sin \theta) / \theta - 10; \gamma = -0,35 \sin 2\theta \cdot \dot{\theta}; \eta = 0,7 \cos^2 \theta - 0,7.$$

На втором этапе в систему вводится линейная стабилизирующая «добавка», уравнение которой выбирается в виде: $\ddot{u} = \chi \ddot{\theta} + \delta \dot{\theta} + \varepsilon \theta$. В итоге характеристический полином замкнутой системы:

$$s^3 + 0,033\chi s^2 + (0,033\delta - 33,33)s + 0,033\varepsilon = 0.$$

Уравнение желаемой динамики задаем $(s + 5)^3$. Коэффициенты регулятора получились следующие $\chi = 454,5; \delta = 3287,7; \varepsilon = 3787,9$.

В приложениях приведены: акты об использовании и внедрении результатов диссертационной работы, копия свидетельства о регистрации программы для ЭВМ № 2013614151, листинги программ расчета параметров регуляторов для трехмассовой системы, колонны синтеза аммиака и камеры полимерной покраски. Для перевернутого маятника представлены схемы моделирования в *Simulink*.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе, на основе обзора модальных методик синтеза, выбрано направление, использующее полиномиальное разложение матричной передаточной функции. Проанализированы существующие методы синтеза регуляторов пониженного порядка. Приводится формализация некоторых существующих полиномиальных методик синтеза многоканальных регуляторов полного порядка и на их основе предлагаются две полиномиальные методики синтеза регуляторов пониженного порядка.

Основные результаты диссертации:

1. Предложена универсальная методика синтеза многоканальных регуляторов как полного, так и пониженного порядка. В основу методики заложено решение матричного характеристического уравнения.

2. Предложена операция обратного дифференцирования полиномов, которая является развитием дифференцирования полиномов «справа».

3. Предложена оптимизационная методика синтеза регуляторов пониженного порядка, использующая операцию обратного дифференцирования матричного характеристического полинома. В методиках предлагается использовать масштабирование (параметрическое или масштабирование по времени).

4. Предложены диаграммы зависимости показателей качества переходных процессов в системе от расположения полюсов при наличии у нее нуля, расположенного в правой полуплоскости комплексной плоскости.

5. Предложены модифицированные диаграммы Вышнеградского, граница устойчивости для системы 4-го порядка и интерпретация диаграмм при помощи проективной сферы, обобщающая возможные варианты корневых областей на диаграммах Вышнеградского.

6. Представлена возможность распространения полиномиальной методики модального метода синтеза на нелинейные системы, на примере расчета нелинейного регулятора для объекта «каретка – перевернутый маятник».

7. Алгоритм поиска регулятора пониженного порядка использован в ЗАО «СИНЕТИК» для разработки программного обеспечения управления технологическими процессами в химической промышленности на производстве ООО «СаянскХимПласт» и ООО «Сода-Хлорат». Внедрен регулятор стабилизации температуры камеры полимерной покраски на ООО ППК «Эссан-лифтэк».

Кроме того полученные результаты также внедрены в учебном процессе в курсе лекций и лабораторных работ «Теория автоматического управления и многоканальные системы управления», читаемые для студентов специальностей 2204011.65 (Управление и информатика в технических системах).

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Издания из перечня российских рецензируемых журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание степеней доктора и кандидата наук:

1. Воевода А.А., Вороной В.В., Шоба Е.В. Модальный синтез многоканального регулятора пониженного порядка с использованием «обратной» производной на примере трёхмассовой системы // Науч. вестник НГТУ. – 2012. – № 1(46). – С. 15 – 22.

2. Воевода А.А., Вороной В.В. Обобщение диаграммы Вышнеградского// Науч. вестник НГТУ. – 2012. – № 4(49). – С. 166 – 171.

3. Воевода А.А., Вороной В.В., Шоба Е.В. Синтез регулятора для системы «перевернутый маятник – тележка» // Научн. вестник НГТУ. – 2012. – №4(49). – С. 161 – 165.

4. Воевода А. А., Вороной В. В. Полиномиальный метод расчета многоканальных регуляторов заданной структуры // Научн. вестник НГТУ. – 2013. – №2(51). – С. 214 – 218.

Зарегистрированные программы для ЭВМ:

5. Вороной В. В., Воевода А. А., Марков А. В., Шоба Е. В. Расширение для пакета MATHCAD при решении задач полиномиального синтеза // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2013614151.

Другие издания:

6. Voevoda A.A., Voronoy V.V., Shoba E.V. Low order controllers synthesis using the «reverse derivative» // Proceedings of RFBR and DST Sponsored «The 2-nd Russian-Indian Joint Workshop on Computational Intelligence and Modern Heuristics in Automation and Robotics», 10–13 September, 2011. – P. 12–22. [Синтез регулятора пониженного порядка с использованием «обратного дифференцирования»].

7. Вороной В.В. Пример синтеза регулятора пониженного порядка с использованием диаграмм Вышнеградского// Фундаментальные и прикладные исследования: проблемы и результаты (ФПИ-4): материалы международной научно-практической конференции. – Новосибирск: ООО агентство «СИБПРИНТ», 2013. – С. 137-140.

8. Вороной В.В. Полиномиальный синтез многоканального регулятора для двухмассовой системы // Перспективы развития информационных технологий: сборник материалов XII Международной научно-практической конференции. – Новосибирск: ООО агентство «СИБПРИНТ», 2013. – С. 8-11.

9. Воевода А.А., Вороной В.В. Об обобщении диаграммы Вышнеградского // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2010. – №3(61). – С. 155-158.

10. Вороной В.В., Е.В. Шоба Синтез двухканального ПИД-регулятора для системы перевернутый маятник-тележка// Актуальные проблемы электронного приборостроения (АПЭП-2012): материалы XI Международной научно-практической конференции, г. Новосибирск, 2–4 октября 2012 г./ Изд. НГТУ. – Том 7. – С. 54 – 57.

11. Вороной В. В. Влияние «обратного» дифференцирования на смещение корней производных и преобразование корневых областей// Наука, Технологии, Инновации (НТИ-2012)/ Материалы всероссийской научной конференции молодых ученых, г. Новосибирск, 29 ноября – 2 декабря 2012 г./ Изд. НГТУ. – Ч. 2. – С. 3 – 7.

12. Вороной В.В. О методике синтеза регулятора «пониженного» порядка методом «обратного» дифференцирования // Теория и практика современной науки [Текст]: материалы VIII Международной научно-практической конференции, г. Москва, 26–27 декабря 2012 г. В 3 т.: т. I / Науч.-инф. издат. центр «Институт стратегических исследований». – Москва: Изд-во «Спецкнига», 2012. – С. 215 – 220.
13. Воевода А.А., Вороной В.В. Синтез нелинейного регулятора для динамического нелинейного объекта // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2013. – №1(71). – С. 3 – 12.
14. Воевода А.А., Вороной В.В. Новая интерпретация диаграммы Вышнеградского // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2010. – №1(63). – С. 137-142.
15. Вороной В.В., Шоба Е.В. Стабилизация трёхмассовой системы: двухканальный ПД-регулятор // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2010. – № 4(62). – С. 183–188.
16. Воевода А.А., Вороной В.В. Модальный синтез регуляторов пониженного порядка методом дифференцирования характеристического полинома // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2011. – № 1(63). – С. 3–12.
17. Воевода А.А., Вороной В.В. Модальный синтез многоканальных регуляторов пониженного порядка с использованием «обратного» дифференцирования характеристической матрицы// Сб. науч. тр. НГТУ. – 2011. – №3(65). – С. 3–10.
18. Воевода А.А., Вороной В.В. О смещении корней при «обратном» дифференцировании // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2012. – №3(69). – С. 11–22.
19. Воевода А.А., Вороной В.В. Отображение областей на плоскости комплексной переменной при использовании метода «обратного» дифференцирования// Сб. науч. тр. НГТУ. – 2012. – №3(69). – С. 23–32.
20. Вороной В.В. О дополнительном требовании к желаемой передаточной функции// Сб. науч. тр. НГТУ. – 2012. – №3(69). – С. 33–38.
21. Воевода А.А., Вороной В.В. Об управляемости и наблюдаемости объекта «перевернутый маятник - тележка» // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2012. – №4(70). – С. 3 – 12.
22. Вороной В.В. Краткий обзор методов синтеза регуляторов пониженного порядка // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2010. – №4(62). – С. 25 – 34.
23. Вороной В.В. О дифференцировании справа// Сб. науч. тр. НГТУ. – 2013. – №1(71). – С. 138 – 142.
24. Вороной В.В. Обобщенная диаграмма Вышнеградского для системы четвертого порядка // Сб. науч. тр. НГТУ. – 2010. – №4(62). – С. 161 – 166.
25. Вороной В.В., Иванов А. Е. Использование дифференцирующего фильтра при синтезе нелинейного регулятора// Сб. науч. тр. НГТУ. – 2013. – №1(71). – С. 13 – 21.
26. Вороной В. В. Синтез регулятора пониженного порядка для камеры полимерной покраски// Сб. науч. тр. НГТУ. – 2013. – №2(72). – С. 10 – 18.
27. Воевода А.А., Вороной В.В. О влиянии нулей «справа» на переходные процессы в системе// Сб. науч. тр. НГТУ. – 2013. – №2(72). – С. 19 – 29.

Отпечатано в типографии Новосибирского
государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20,
тел./факс (383) 346-08-57
Формат 60 X 84 1/16, объём _____ п.л. тираж 100 экз.
Заказ № ____ подписано в печать __. __. 2013 г.