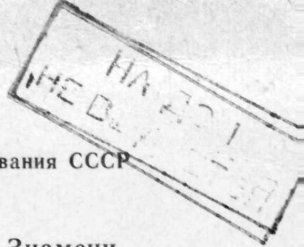


М357221



Министерство высшего и среднего специального образования СССР

Московское
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи

ФИЛИМОНОВ Николай Борисович

**УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫМИ ПРОЦЕССАМИ
В ЛИНЕЙНЫХ КОНЕЧНОМЕРНЫХ ОБЪЕКТАХ**

Специальность 05.13.02 — Теория систем,
теория автоматического регулирования
и управления и системный анализ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Министерство высшего и среднего специального
образования СССР

— • —
МОСКОВСКОЕ
ОРДЕНА ЛЕНИНА И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

ФИЛИМОНОВ Николай Борисович

УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫМИ ПРОЦЕССАМИ
В ЛИНЕЙНЫХ КОНЕЧНОМЕРНЫХ
ОБЪЕКТАХ

Специальность 05.13.02 — Теория систем, теория автоматического регулирования и управления и системный анализ

АВТОРЕФЕРАТ

Диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва — 1979

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1357221

Филимонов Н.Б. Управление

М 357221

Работа выполнена на кафедре "Системы автоматического управления"
МВТУ им. Н.Э.Баумана

Научный руководитель - Засл. деятель науки и техники РСФСР,
Лауреат государственной премии,
д.т.н., профессор СОЛОДОВНИКОВ В.В.

Официальные оппоненты:

д.т.н., старший научный сотрудник КЛУБНИКИН П.Ф.
к.т.н., старший научный сотрудник ~~МАКСИМОВ А.И.~~
ВЕРЕЩАГИН А.Ф.

Ведущая организация указана в решении специализированного
совета

Защита диссертации состоится "17" декабря 1979г.
в "14³⁰" на заседании специализированного совета К-33.12
при МВТУ им. Н.Э.Баумана по адресу: 107005, Москва, Е-5,
2-я Бауманская ул., д.5.

Справки по телефону 267-03-23.

Отзывы в 2-х экз. с подписью, заверенной печатью, просьба
высылать по указанному адресу.

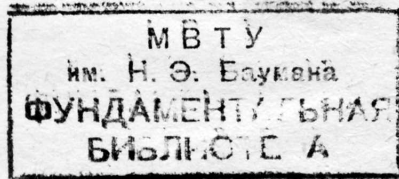
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института.

Автореферат разослан "17" ноября 1979г.

Ученый секретарь
специализированного совета

к.т.н., доцент

ЯКОВЛЕВ А.В.



ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Работа актуальна для теории и практики линейного синтеза автоматических систем управления с заданными первичными показателями качества переходных процессов. Сюда относятся следующие системы, высокоточные системы регулирования, системы стабилизации, системы управления движущимися объектами и др.

Актуальность диссертационной работы обусловлена следующими обстоятельствами.

Во-первых, качество процессов управления определяется не только функциональными возможностями применяемых схем управления, но и техническими возможностями применяемых средств управления и, в особенности, динамическими свойствами самого объекта. Поэтому требования к качеству переходных процессов синтезируемой системы могут противоречить требованиям ее устойчивости и технической реализуемости, так что поставленная задача синтеза может оказаться неразрешимой. Этот недостаточно изученный теоретический вопрос важен для разработчиков современных систем автоматического управления.

Во-вторых, существующие регулярные методы синтеза линейных стационарных систем управления либо имеют недостаточно широкую область применимости, либо односторонне учитывают динамическое качество синтезированной системы.

Так, например, частотные методы, в частности, пользующийся большой популярностью метод ЛАЧХ (В.В.Солодовников) и методы передаточной функции оказываются неприменимыми к неустойчивым либо с малой степенью устойчивости объектам управления. Методы же модального управления (Б.Портер, Т.Кроссли, Д.Люенбергер и др.), эффективно оперируя с характеристическими корнями, или модами системы, не позволяют воздействовать на ее передаточные нули, от которых существенно зависит реакция системы на внешние воздействия.

В-третьих, в современной теории линейных нестационарных систем управления среди регулярных методов синтеза наибольшее развитие получили оптимизационные методы: метод аналитического конструирования оптимальных регуляторов (Р.Калман, А.М.Летов, А.А.Красовский и др.), метод моментов (Н.Н.Красовский и др.) и т.д., в которых о динамическом совершенстве синтезируемой системы судят по интегральным квадратичным критериям. Последние, как правило, лишены прямого физического смысла, т.е. оторваны от инженерной интуиции проектировщика, что снижает практическую

ценность данных методов.

Формальным оптимизационным методам идейно противостоит новое теоретическое направление, провозглашающее геометризацию задач управления, суть которого состоит в том, чтобы сначала осуществлять геометрическое конструирование переходных процессов, отвечающих поставленной цели управления, а затем определять соответствующие управления. Это направление развивается в работах, в основном посвященных управлению движущимися объектами (Дж.Донигер, Бельский, Г.Рейнольдс, Б.Ханисч и А.Флит, Г.В.Корнев, Г.С.Поспелов, Л.М.Бойчук, А.С.Востриков, А.С.Галиуллин и И.А.Мухаметьянов, А.П.Батенко, В.И.Толокнов, П.Д.Крутько и Е.П.Попов и др.). Однако, вследствие недостаточной разработанности, — в частности, отсутствует адекватный математический аппарат — в рамках данного направления не сложились регулярные методы синтеза.

Цель работы состоит в том, чтобы

- исследовать переходные процессы в линейных системах управления: определить ограничения, накладываемые динамическими свойствами объекта на управляемые переходные процессы, установить условия и получить критерии разрешимости соответствующих задач синтеза;

- разработать методы линейного синтеза одноканальных стационарных систем управления, действенные для широкого класса устойчивых и неустойчивых объектов;

- разработать регулярные методы управления переходными процессами в линейных нестационарных объектах с конечным временем функционирования.

Методы исследования. В работе активно использовались достижения современной теории управления.

Для вывода, обоснования и доказательства основных теоретических результатов применялся математический аппарат общей теории систем, теории устойчивости движений и теории обыкновенных дифференциальных уравнений.

Для подтверждения работоспособности и эффективности разработанных систем управления проводились модельные эксперименты на ЭЦМ.

Научная новизна. В диссертационной работе:

Впервые ставится и решается вопрос о том, какие переходные процессы возможно, а какие невозможно получать в замкнутых линейных конечномерных системах управления.

Предложены новые функциональные схемы линейных стационарных систем управления, объединяющие достоинства классических компенсационных схем и современных схем модального управления, которые позволяют управлять передаточными нулями и полюсами системы. На базе предложенных схем для широкого класса устойчивых и неустойчивых объектов разработаны аналитические методы синтеза систем с желаемыми переходными процессами.

Предложен новый подход к управлению переходными процессами линейных нестационарных объектов, основанный на разработанном в работе формализме фазового пространства. Суть подхода состоит в том, что сначала для объекта строится фазовое пространство, затем из геометрических соображений конструируются фазовые траектории, обеспечивающие выполнение поставленной цели управления, и, наконец, определяются управления, навязывающие объекту данные траектории. На базе предложенного подхода разработаны регулярные аналитические методы синтеза систем управления с конечным временем функционирования и, в частности, терминальных систем управления.

Практическая ценность. Результаты работы дают возможность создавать эффективные системы автоматического управления, для которых первостепенное значение имеют первичные показатели качества переходных процессов: следящие системы, высокоточные системы регулирования, системы управления движущимися объектами и т.п.

Реализация результатов работы. Материалы диссертационной работы были использованы при выполнении кафедрой "Системы автоматического управления" МВТУ им. Н.Э.Баумана научно-исследовательских работ по госбюджетным и хоздоговорным темам.

Практическая часть диссертации связана с разработкой новых перспективных систем автоматического управления летательными аппаратами (САУЛА). Предложенные автором методы управления ориентированы на применение БУЦВМ в контуре управления аппаратом и реализованы соответствующими алгоритмами управления движением ЛА.

Целесообразность практического использования найденных технических решений подтверждается актом о внедрении и справке о целесообразности использования результатов работы.

Апробация работы. Основные положения работы были доложены и обсуждены на научно-техническом совещании "Программное и алгоритмическое обеспечение АСУ ТП" (г.Новгород, июнь 1976); на

Городском семинаре молодых ученых и специалистов "Алгоритмизация и программирование задач управления" (МВТУ, июнь 1977); на III научно-технической конференции "Приборостроение" (МВТУ, сентябрь 1977); на I Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Математическое, алгоритмическое и техническое обеспечение АСУ ТП" (г. Ленинград, ноябрь 1978); на Втором Ленинградском симпозиуме "Теория чувствительности и ее применение" (г. Ленинград, июль 1979); на заседаниях научных семинаров кавф. "САУ" МВТУ им. Н. Э. Баумана в 1975-79 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 10 печатных работ, перечень 6-и из которых приведен в конце автореферата.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из основной части, содержащей введение, пять глав и заключение, 26 приложений, дополняющих и поясняющих основную часть работы, и списка цитируемой литературы из 190 наименований. В приложениях включен обзор научной литературы по теме диссертации. Основная часть работы изложена на 147 страницах машинописного текста и включает 36 рисунков, 5 таблиц и 2 номограммы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во ВВЕДЕНИИ отмечается, что многие динамические свойства системы раскрываются в тех ее переходных процессах, которые возникают при определенных внешних и внутренних условиях функционирования: при отработке ступенчатых задающих воздействий, при реагировании на ступенчатые возмущающие воздействия, при эволюции из возмущенного начального состояния и т.д. Поэтому в ряде задач синтеза на первый план выносятся именно требования к первичным показателям качества переходных процессов, достоинства которых — наглядность и простота.

В ОБЗОРЕ ЛИТЕРАТУРЫ, вынесенном в приложение I, обсуждаются работы, существенные по мнению автора для темы диссертации:

во-первых, обсуждаются существующие оценки качества переходных процессов в системах управления: прямые показатели качества переходных процессов, их модальный состав и интегральные квадратичные оценки;

во-вторых, анализируются известные подходы к управлению переходными процессами в линейных конечномерных объектах, причем критический анализ основных современных методов синтеза линейных систем управления таких как: частотные методы, методы передаточной функции, корневые методы, методы модального управ-

ления, методы АКОР и методы параметрической настройки, проводится исходя из таких ключевых компонентов метода как применяемые условия качества, структурная организация системы, реализуемый принцип управления объектом и вид расчетной процедуры.

В частности, делается вывод, что наиболее результативными в смысле управления переходными процессами в линейных стационарных системах являются частотные методы и методы модального управления. Если в первой группе методов функциональные свойства динамических систем описываются в частотной области посредством математического аппарата операционного исчисления, то во второй группе методов, основанных на концепции состояния, динамика систем описывается во временной области обыкновенными дифференциальными уравнениями, а расчетным математическим аппаратом является матричная алгебра. Кроме указанных формальных различий, стоящих во главе идеи противопоставления (И.Горовиц, А.МакФарлэй и др.) этих методов, имеется более существенное их различие: в частотных методах осуществляется компенсация нежелательных передаточных нулей и полюсов объекта, достигаемая включением в контур управления последовательных и/или параллельных корректирующих устройств, а в методах модального управления осуществляется управление характеристическими корнями (модами) замкнутой системы, достигаемое модальной обратной связью. Следовательно, эти методы не подменяют друг друга, а предлагают принципиально иные решения задачи синтеза. В связи с этим крайнему противопоставлению данных методов в диссертации предлагается более разумная альтернатива – синтетический подход, учитывающий достоинства и компенсационных и модальных схем управления.

Глава I. УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕДАТОЧНОЙ ФУНКЦИЕЙ ЗАМКНУТОЙ СТАЦИОНАРНОЙ СИСТЕМЫ. Задача, рассматриваемая в главе, заключается в том, чтобы, прежде всего, ответить на вопрос о возможности навязывания замкнутой системе управления заданным объектом произвольной наперед заданной передаточной функции, далее, указать структуры системы управления, позволяющие проектировщику целенаправленно и эффективно воздействовать на вид и коэффициенты передаточной функции системы и, наконец, разработать методику построения необходимых для этого технически реализуемых управляющих устройств.

Техническая реализуемость означает, что управляющее устройство состоит из элементов нефорсирующего типа, функционирование которых описывается конечными и/или обыкновенными диффе-

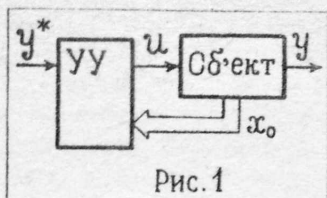


Рис. 1

ренциальными уравнениями.

Одноканальные САУ в наиболее общем виде могут быть представлены укрупненной блок-схемой, изображенной на рис. 1. Здесь y^* - задающий вход системы, u - управляющий вход, y - управляемый выход и x_0 - измеряемый выход объекта.

В блоке "объект" объединена вся неизменяемая часть системы, а в блоке "управляющее устройство" (УУ) - вся изменяемая часть.

Оказывается, что ответ на вопрос о возможности управления передаточной функцией замкнутой системы определяется исключительно передаточными нулями объекта управления.

Так, в случае неминимально-фазовых объектов вопрос этот решается однозначно отрицательно в силу следующей доказанной автором теоремы.

Теорема 1. Неминимально-фазовые передаточные нули объекта обладают свойством инвариантности - являются также передаточными нулями технически реализуемой устойчивой замкнутой системы управления этим объектом.

Иначе обстоит дело в случае минимально-фазовых объектов, для которых справедлива следующая

Теорема 2. Пусть объект управления является конечномерной линейной стационарной динамической системой, вполне управляемой по управляющей входной и вполне наблюдаемой по управляемой, а также измеряемым выходным переменным, причем все нули его передаточной функции по каналу "управляющий вход - управляемый выход" - левые.

Зададимся любой дробно-рациональной передаточной функцией $W_{\text{жс}}(s)$ вида

$$W_{\text{жс}}(s) = \frac{M_{\text{жс}}(s)}{D_{\text{жс}}(s)},$$

знаменатель которой $D_{\text{жс}}(s)$ является гурвицевым полиномом комплексной частоты s , причем разность степеней полиномов числителя $M_{\text{жс}}(s)$ и знаменателя $D_{\text{жс}}(s)$ ее не превышает разности числа передаточных нулей и числа передаточных полюсов объекта.

Тогда существует асимптотически устойчивая и технически реализуемая замкнутая система управления этим объектом с блок-схемой, представленной на рис. 1, передаточная функция $W(s)$

которой равна $W_{\text{жс}}(s)$:

$$W(s) = W_{\text{жс}}(s).$$

В основу конструктивного доказательства данной теоремы положена

Теорема 3. Пусть система управления образована замыканием объекта модальной обратной связью (МОС) так, как это показано на рис.2, или, иначе, корректирующая добавка U формируется по закону

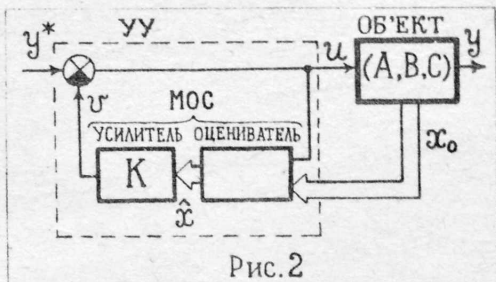


Рис.2

$$U(t) = K \hat{x}(t),$$

где в случае неполной информации о состоянии объекта $\hat{x}(t)$ — текущая оценка состояния объекта $x(t)$, генерируемая асимптотическим оценщиком Лвенбергера, а при полной информации $\hat{x}(t) = x(t)$.

Тогда, если передаточная функция канала "управление-выход" объекта равна

$$W_o(s) = \frac{M_o(s)}{D_o(s)} = C(Is - A)^{-1}B,$$

где $D_o(s) = \det(Is - A)$ — характеристический полином объекта, то передаточная функция канала "задание-выход" системы будет иметь вид

$$W(s) = \frac{M_o(s)}{D(s)} = C(Is - A + BK)^{-1}B,$$

где $D(s) = \det(Is - A + BK)$ — характеристический полином системы, т.е. передаточные нули объекта инвариантны по отношению к замыканию его модальной обратной связью.

При этом, если оценщик будет иметь характеристический полином $D_e(s)$, то характеристический полином $\chi(s)$ замкнутой системы будет равен

$$\chi(s) = D(s)D_e(s).$$

Управление передаточной функцией системы предлагается осуществлять по одной из разработанных в диссертации схем, две из которых показаны на рис.3 а,б, включающих ПКУ — технически реа-

лизуемое последовательное корректирующее устройство и МОС - модальную обратную связь, имеющую структуру "оценитель Лвенбергера X матричный усилитель". Функциональное назначение ПКУ, прежде всего - добавлять в канал "задание-выход" системы желаемые передаточные нули, а МОС - компенсировать нежелательные левые передаточные нули канала "управление-выход" объекта и навязывать желаемые передаточные полюса каналу "задание-выход" системы.

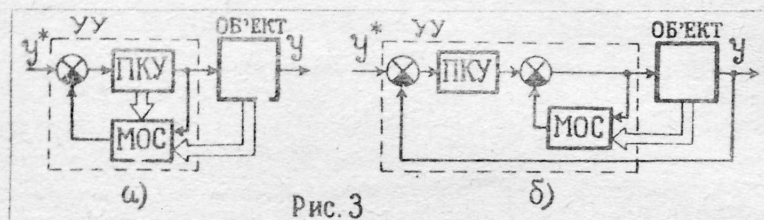


Рис. 3

Если желаемый коэффициент передачи системы равен единице: $W_{\text{жс}}(0) = 1$, то функциональная схема на рис. 3 б позволяет к тому же наделять выход системы астатизмом I-го порядка по отношению к внешним возмущающим воздействиям на объект.

Таким образом, разработанный метод управления передаточными функциями в идейном плане зиждется на результатах теорем 1+3, схемно реализуется посредством совместного применения ПКУ и МОС в структуре системы управления, а расчетной основой метода служат известные вычислительные процедуры теории модального управления.

Глава II. ЗАДАЧА В.В.СОЛОДОВНИКОВА - КАК ЗАДАЧА УПРАВЛЕНИЯ ПЕРЕХОДНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ЛИНЕЙНЫХ СТАЦИОНАРНЫХ СИСТЕМАХ. Динамическое поведение системы в режиме отработки задания определяется переходной характеристикой (=функцией) канала "задание-выход", т.е. реакцией выхода $y = h(t)$ на единичный скачок задания $y^* = 1(t)$.

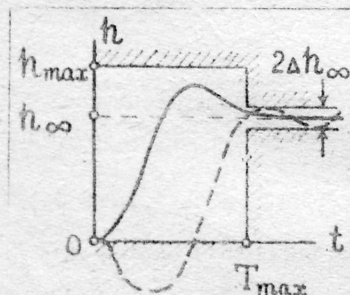


Рис. 4

Требования к переходным характеристикам синтезируемых систем удобно формулировать в виде так называемой "ограничивающей коробочки" - области в плоскости $t \times h$, определяющей семейство допустимых переходных характеристик $h(t)$.

Параметрами "коробочки", выделенной на рис. 4 штриховкой, являются: $h_{\infty} = W(0)$ - установившееся от-

клонение процесса, или коэффициент передачи системы; $\sigma_{\max} = (h_{\max} - h_{\infty})/h_{\infty}$ - максимально допустимое перерегулирование; $T_{\max}$ - максимально допустимая длительность переходных процессов, причем, как правило, $\Delta = 0,05$.

Соответствующая классическая задача синтеза (В.В.Солодовников, 1939+41гг.) в современной редакции имеет следующую формулировку.

Задача. Для заданного линейного стационарного динамического объекта, исходя из технических реализуемых элементов, требуется построить линейную стационарную устойчивую систему управления, переходная характеристика которой по каналу "задание-выход" удовлетворяет заданным ограничениям типа "коробочки".

Структура полученной системы должна быть достаточно простой.

Возникает естественный вопрос: для всяких ли объектов управления данная задача разрешима?

Результаты исследования автором данного вопроса отражены в доказанных им теоремах 4+7.

Теорема 4. Поставленная задача всегда разрешима для объектов, удовлетворяющих условиям теоремы 2, т.е. минимально-фазовых по каналу "управляющий вход - управляемый выход".

Доказательство теоремы основано на рассмотрении апериодического переходного процесса $h_{\text{ст}}(t)$, отвечающего передаточной функции стандартного вида

$$W_{\text{ст}}(s) = \frac{K(\tau s + 1)}{(Ts + 1)^q},$$

где $q \geq 2$ - натуральное, а $K > 0, \tau \geq 0$ и $T > 0$ - действительные числа.

Нетрудно показать, что соответствующим выбором параметров K, τ и T всегда можно получить переходный процесс

$h_{\text{ст}}(t) = \mathcal{L}^{-1}\{1/s W_{\text{ст}}(s)\}$ с любыми наперед заданными показателями качества $h_{\infty} > 0, \sigma \geq 0$ и $T_{\text{рег}} > 0$, в частности, можно добиться того, чтобы график процесса (сплошная кривая на рис.4) лежал внутри "ограничивающей коробочки".

Если положить q равным разности между числом передаточных полюсов объекта и числом его передаточных нулей, то, согласно теореме 2, можно технически реализовать устойчивую замкнутую систему управления этим объектом с передаточной функцией

$W_{\text{зс}}(s) = W_{\text{ст}}(s)$, т.е. получить переходной процесс, удовлетворяющий критерию качества "ограничивающая коробочка".

Таким образом, решение поставленной задачи синтеза сводится к управлению передаточной функцией замкнутой системы методом, разработанным в предыдущей главе. В этом — суть предлагаемого подхода к управлению переходными процессами в стационарных динамических системах, который, в отличие от классических компенсационных подходов, позволяет навязывать желаемые переходные процессы любым минимально — фазовым, в том числе неустойчивым и с малой степенью устойчивости, объектам управления.

Неразрешимость задачи для объектов, имеющих положительный действительный передаточный нуль, вытекает из следующей теоремы.

Теорема 5. Пусть в асимптотически устойчивой замкнутой системе управления, построенной из технически реализуемых элементов, коэффициент передачи положительный и равен K , а длительность переходного процесса равна $T_{\text{рег}}$ и, кроме того, объект управления — инерционный, имеющий по крайней мере один положительный действительный передаточный нуль λ .

Тогда переходная характеристика $h(t)$ системы обязательно имеет отрицательный выброс (см. пунктирную кривую на рис. 4), для величины которого справедлива следующая оценка:

$$\min_{0 \leq t < +\infty} h(t) \leq - \frac{(1-\Delta)K}{\exp(\lambda T_{\text{рег}}) - 1}.$$

Если в передаточной функции объекта неминимально-фазовые нули являются строго комплексными, то ответ на поставленный вопрос зависит от дополнительных условий.

Теорема 6. Пусть объект управления имеет неминимально-фазовые передаточные нули, причем последние строго комплексные, и их число равно $2m^+$.

Тогда задача Солодовникова для такого объекта разрешима, если все эти неминимально-фазовые нули лежат на плоскости комплексной частоты S за пределами полосы

$$|\text{Im } S| \leq 4\pi m^+ / T_{\text{max}}.$$

Здесь T_{max} — максимально допустимая длительность переходного процесса в системе.

Теорема 7. Пусть в передаточной функции $W_o(s)$ объекта имеется по крайней мере одна пара комплексно-сопряженных нулей $\lambda, \bar{\lambda} = \delta \pm j\omega$, где $\delta > 0$ и $\omega > 0$ причем выполняется неравенство

$$\sqrt{2\Delta} < \frac{\delta}{\omega} < \frac{1}{\sqrt{2\Delta}}.$$

Тогда, если максимально допустимое время переходного процесса $T_{\max}$ в замкнутой системе, заданное "ограничивающей корбочкой", удовлетворяет соотношению

$$T_{\max} < \frac{\pi}{2\omega},$$

то поставленная задача синтеза для такого объекта неразрешима.

В главе III. УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫМИ ПРОЦЕССАМИ В ЛИНЕЙНЫХ ОБЪЕКТАХ С КОНЕЧНЫМ ВРЕМЕНЕМ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ предлагается новый подход к управлению динамикой нестационарных объектов, основанный на управлении фазовым потоком этих объектов, согласно которому сначала конструируются реализуемые фазовые траектории, обеспечивающие выполнение цели управления, а затем определяются те управления, которые навязывают объекту данные траектории.

В главе доказывается теорема о существовании и единственности фазового пространства для объектов с одномерным управляющим входом, являющихся равномерно управляемыми и кусочно-гладкими динамическими системами. Согласно теореме пространство состояний X такого объекта неособым линейным преобразованием $Z(t): Z \rightarrow X$ может быть и притом единственным образом преобразовано в фазовое пространство Z так, что в текущий момент времени $t \in J$ вектор состояния $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)^T \in X$ объекта будет связан с его фазовым вектором $\xi = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T \in Z$ соотношением

$$x(t) = Z(t)\xi(t)$$

и уравнение динамики объекта в этом пространстве примет вид

$$S: \quad \frac{d}{dt}\xi(t) = A_0(t)\xi(t) + B_0 u(t) + Z^{-1}(t)f(t),$$

где матрицы $A_0(t)$ и B_0 имеют следующую структуру

$$A_0(t) = \begin{bmatrix} 0 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & 1 \\ -\alpha_0(t) & -\alpha_1(t) & \dots & -\alpha_{n-1}(t) \end{bmatrix} \quad \text{и} \quad B_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}.$$

Автором разработан алгоритм приведения объекта к фазовым координатам.

В отсутствии помех управлению, т.е. при $f \equiv 0$ фазовый вектор ξ просто выражается через фазовую переменную $\xi \equiv \xi_1$:

$$\xi(t) = (\xi(t), \xi^{(1)}(t), \dots, \xi^{(n-1)}(t))^T, \quad (I)$$

причем динамика фазовой переменной ξ определяется опера-

торным уравнением

$$D(t, \frac{d}{dt}) \xi(t) = u(t),$$

где дифференциальный оператор $D(t, \frac{d}{dt})$ равен

$$D(t, \frac{d}{dt}) \equiv \frac{d^n}{dt^n} + \mathcal{L}_{n-1}(t) \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + \mathcal{L}_1(t) \frac{d}{dt} + \mathcal{L}_0(t).$$

В главе IV. ЛИНЕЙНЫЕ СИСТЕМЫ ТЕРМИНАЛЬНОГО УПРАВЛЕНИЯ: СИНТЕЗ УПРАВЛЕНИЯ, АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ И ГРУБОСТИ формализм фазового пространства, развитый в предыдущей главе, применяется для исследования динамики терминальных систем управления с особой точкой.

Фазовый поток можно определить математически как однопараметрическую группу $\{g^t\}$ линейных диффеоморфизмов фазового пространства Z .

Как построить фазовый поток заданной размерности, который, во-первых, отвечает поставленной цели управления и, во-вторых, имеет требуемое динамическое качество?

Для этого предлагается задаваться базисными функциями $\chi_1(t), \chi_2(t), \dots, \chi_n(t) \in C^{(n)}[T]$ и требовать, чтобы фазовая координата каждой точки фазового потока изменялась со временем как линейная комбинация этих функций:

$$\xi(t) = \sum_{i=1}^n C_i \chi_i(t), \quad (2)$$

положение точки потока определялось соотношением (1), а константы C_i — ее начальным положением.

Если цель управления состоит в переводе системы в равновесное положение $\xi_f = 0$ в терминальный момент времени $t = t_f$, то фазовый поток такой системы должен стягиваться в точку $\xi_f = 0$. Для этого необходимо выполнение следующих краевых условий

$$\lim_{t \rightarrow t_f - 0} \chi_i^{(j-1)}(t) = \chi_i^{(j-1)}(t_f) = 0 \quad (i, j = 1, 2, \dots, n). \quad (3)$$

Базисные функции $\chi_i(t)$, удовлетворяющие краевому условию (3), предлагается конструировать следующим образом:

$$\chi_i(t) = (t - t_f)^n \chi_i^*(t) \quad (i = 1, 2, \dots, n),$$

где функции $\chi_i^*(t) \in C^{(n)}[T]$ имеют отличный от нуля определитель Вронского на всем временном отрезке T .

Функции $\xi(t)$ вида (2) ÷ (3) являются решениями однород-

ного дифференциального уравнения с особой точкой

$$D\left(t, \frac{d}{dt}\right) \xi(t) = 0 \quad \text{при } t \in J = [t_0, t_f], \quad (4)$$

где линейный дифференциальный оператор

$$D\left(t, \frac{d}{dt}\right) \equiv \partial_n(t) \frac{d^n}{dt^n} + \partial_{n-1}(t) \frac{d^{n-1}}{dt^{n-1}} + \dots + \partial_1(t) \frac{d}{dt} + \partial_0(t)$$

определяется формулами

$$D\left(t, \frac{d}{dt}\right) = (t - t_f)^{2n} D^*\left(t, \frac{d}{dt}\right) (t - t_f)^{-n}$$

и

$$D^*(t, p) = \det \begin{bmatrix} \gamma_1^*(t) & \gamma_2^*(t) & \dots & \gamma_n^*(t) & 1 \\ \gamma_1^{*(1)}(t) & \gamma_2^{*(1)}(t) & \dots & \gamma_n^{*(1)}(t) & p \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_1^{*(n)}(t) & \gamma_2^{*(n)}(t) & \dots & \gamma_n^{*(n)}(t) & p^n \end{bmatrix},$$

причем $\sum_{i=0}^n |\partial_i(t)| > 0$ при $t \in J$, $\partial_n(t) \neq 0$ при $t_0 \leq t < t_f$ и $\partial_n(t_f) = 0$.

Чтобы динамика управляемого фазового потока объекта S подчинялась уравнению (4), сигнал управления $u(t)$ необходимо формировать по линейному закону

$$u(t) = u_{\text{нейт}}(t) + u_{\text{терм}}(t) = \sum_{i=1}^n (K_{\text{нейт}i}(t) + K_{\text{терм}i}(t)) \xi_i(t), \quad (5)$$

где составляющая $u_{\text{нейт}}(t)$ нейтрализует динамику объекта, а составляющая $u_{\text{терм}}(t)$ обеспечивает выполнение терминальной цели управления так, что

$$K_{\text{нейт}i+1}(t) = \mathcal{L}_i(t) \quad \text{и} \quad K_{\text{терм}i+1}(t) = -\frac{\partial_i(t)}{\partial_n(t)} \quad (i=0, 1, \dots, n-1).$$

Функциональная структура терминального регулятора, реализующего закон (5), показана на рис.5.

Терминальная цель управления – тенденция попадать в целевое множество пространства состояний в заданный момент времени – достигается терминальной обратной связью, бесконечно усиливающей сигнала в терминальный момент времени, вследствие чего последний и является особой точкой системы.

Достижению поставленной цели управления в системах терминального управления препятствуют помехи управлению и изме-

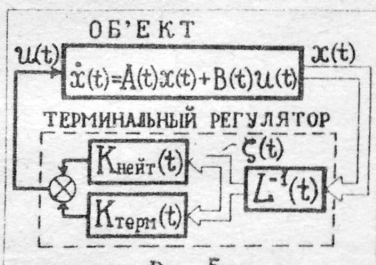


Рис. 5

рению. Возникает естественный вопрос об устойчивости функционирования подобных систем к действию этих помех: вытекает ли она из устойчивости системы к возмущениям ее начального состояния аналогично тому, как это — согласно известной теореме Малкина — имеет место для дифференциальных систем с бесконечным временем функционирования?

Оказывается, что устойчивость функционирования терминальных систем управления по отношению к действию внешней среды в значительной мере определяется собственно целью управления.

Установлено, что системы управления терминальным состоянием устойчивы к действию внешних возмущений, являющихся ограниченными и достаточно гладкими функциями времени в терминальной точке $t = t_f$.

В этом плане менее предпочтительны системы управления терминальным положением, у которых цель управления накладывает ограничения на некоторые — но не все! — координаты терминального состояния объекта — они неустойчивы по некоторым координатам состояния к действию внешних возмущений, являющихся как угодно гладкими функциями времени.

Наконец, все системы терминального управления порядка $n \geq 3$ резонансны, т.е. всегда найдутся такие возмущающие воздействия как угодно малые по эвклидовой норме в течение всего отрезка времени функционирования системы, но недостаточно гладкие в терминальный момент времени, которые вызовут реакцию системы, неограниченную в этот момент времени.

Вопрос о грубости терминальных систем управления с особой точкой, по-видимому, ставится и решается впервые.

В главе формулируется и доказывается теорема, гласящая, что системы терминального управления с особой точкой, вообще говоря, не являются грубыми по отношению к вариациям, пусть даже сколь угодно гладким, коэффициентных матриц объекта. Именно, посредством как угодно малых изменений параметров объекта

1) можно получить систему управления топологически неэквивалентную системе управления с исходным объектом;

2) в результате такого изменения свободное движение замкнутой системы управления может потерять устойчивость.

Глава V. УПРАВЛЕНИЕ В МАЛОМ ТРАЕКТОРИЯМИ ПРОДОЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА. Прикладная часть работы строится на возможностях и достоинствах использования БУЦВМ в САУДА. Бортовые вычислительные машины открывают большие возможности

перед проектировщиками систем управления, эпоха широкого внедрения вычислительных устройств в авиационную и ракетную технику только начинается, и этот факт автор пытался полнее учесть в настоящей главе.

Теоретические исследования предыдущих глав автор использует для решения двух технических задач - задачи управления в малом вертикальным движением ЛА по критерию качества "ограничивающая коробочка" и задачи управления в малом терминальным маневром ЛА в вертикальной плоскости.

В задаче синтеза контура управления высотой полета ЛА исходными были требования технической реализуемости, асимптотической устойчивости, астатизма I-ого порядка и динамического качества: изменение высоты полета $\Delta H = \Delta H(t)$ в переходном процессе, вызванном скачкообразным изменением задания на высоту $\Delta H^* = \Delta H^*(0) 1(t)$, должно подчиняться критерию качества "ограничивающая коробочка".

Для решения поставленной задачи синтеза выбиралась функциональная структура контура управления, представленная на рис. 3б, посредством которой каналу "задание-выход" навязывалась передаточная функция стандартного вида

$$W_{\text{эк}}(s) = \frac{(\tau s + 1)}{(Ts + 1)^5},$$

коэффициенты τ и T которой отвечают выбранным параметрам "коробочки". Так в машинных экспериментах на БЭСМ-4М над цифровой моделью управляемого движения ЛА полагалось $h_{\infty} = 1$, $T_{\text{max}} = 10$ и $\sigma_{\text{max}} \leq 0,3; 0,2; 0,1$.

В задаче синтеза контура управления терминальным маневром аппарата требовалось обеспечить выход в заданную точку программной траектории в заданный момент времени $t = t_f$:

$$\Delta H(t) = \Delta \dot{H}(t) = \Delta \ddot{H}(t) = \Delta \ddot{\dot{H}}(t) \Big|_{t=t_f} = 0$$

при условии монотонности и плавности движения аппарата.

Заданным требованиям отвечает контур управления, динамика которого в отсутствие внешних возмущений подчиняется уравнению

$$D(t, \frac{d}{dt}) \Delta H(t) = 0,$$

где дифференциальный оператор имеет вид

$$D(t, \frac{d}{dt}) = (t - t_f)^8 \frac{d^4}{dt^4} \frac{1}{(t - t_f)^4}.$$

МВТУ
им. Н.С.П. 17
ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ
ИССЛЕДОВАНИЯ

М 354221

так что коэффициенты терминальной обратной связи (рис.5) равны:

$$K_{\text{терм}1}(t) = -840/(t_f - t)^4; \quad K_{\text{терм}2}(t) = -480/(t_f - t)^3;$$
$$K_{\text{терм}3}(t) = -120/(t_f - t)^2; \quad K_{\text{терм}4}(t) = -16/(t_f - t).$$

Поскольку в некоторой малой временной Δ -окрестности терминального момента времени $t = t_f$ замкнутая система становится негрубой, то предложенный способ управления, подчиненный терминальной цели управления, следует осуществлять лишь до момента времени $t_f - \Delta$ - далее параметры обратной связи следует "заморозить", т.е. не менять вплоть до конца маневра аппарата.

В предложенной нестационарной системе управления благодаря возрастанию усиления сигналов в контуре управления по мере приближения к терминальному моменту времени достигается значительно более высокая точность управления по сравнению с традиционными системами: заданное терминальное положение аппарата достигается как при импульсных, так и постоянно действующих возмущениях его движения со стороны неспокойной атмосферы.

Решения задач управления получены в замкнутой аналитической форме и потому пригодны для реализации на БУЦВМ. Предложенные системы управления допускают аналитическую самонастройку на случай изменения режима полета или динамических характеристик аппарата. Организуя посредством БУЦВМ контур самонастройки в САУЛА, мы сообщим системе новое качество - гибкость управления, выгодно отличающее ее от традиционных аналоговых систем с жестким управлением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе впервые проводится систематическое исследование проблемы управления переходными процессами в конечномерных линейных стационарных и нестационарных объектах.

Основные теоретические результаты работы состоят в следующем:

1. Показано, что требования к качеству переходных процессов синтезируемой линейной стационарной системы управления могут противоречить требованиям ее технической реализуемости и асимптотической устойчивости. С учетом этого выяснены условия и получены критерии разрешимости задачи линейного синтеза стационарных систем управления с заданными прямыми показателями качества переходных процессов.

2. Предложены функциональные схемы линейных стационарных систем управления, объединяющие достоинства классических компенсационных схем и современных схем модального управления, и на их основе разработаны аналитические методы синтеза систем управления по заданным первичным показателям качества, действенные для широкого класса минимально-фазовых как устойчивых, так и неустойчивых объектов.

3. Предложен новый подход к управлению линейными нестационарными объектами, основанный на управлении фазовым потоком этих объектов, на основе которого разработаны аналитические методы синтеза линейных систем управления с конечным отрезком функционирования, включая терминальные системы управления с особой точкой. В разработанных методах первостепенное значение отводится качеству переходных процессов замкнутой системы.

4. Проведены исследования устойчивости и грубости широкого класса терминальных систем управления с особой точкой.

ЛИТЕРАТУРА

1. Солодовников В.В., Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Игровые критерии качества систем регулирования и проблема аналитического конструирования регуляторов. - Изв. ВУЗов. Приборостроение, 1976, № 12, с.26+31.

2. Филимонов Н.Б. Круговой критерий устойчивости и аналитическое конструирование регуляторов. - Труды/МВТУ, № 238, Системы автоматического управления, вып.4, М., 1977, с.56+58.

3. Филимонов Н.Б. Аналитическое конструирование квазиоптимальной системы терминального управления. - В Межвузовск.научн. сб.: Аналитические методы синтеза регуляторов, вып.3, Саратов, СПИ - 1978, с.100+113.

4. Филимонов Н.Б. Новые результаты в проблеме качества систем регулирования технологических процессов. - Тезисы докладов/ I Всесоюзная межвузовск.научн.-техн. конференция "Математическое, алгоритмическое и техническое обеспечение АСУ ТП", Секция I, Л., 1978, с.26+27.

5. Филимонов Н.Б. Управление фазовыми траекториями в линейных конечномерных нестационарных объектах. - Труды/МВТУ, № 297, Системы автоматического управления, вып.6, М., 1979, с.11+17.

6. Солодовников В.В., Филимонов А.Б., Филимонов Н.Б. Анализ компенсационного подхода к синтезу систем управления. - Изв. ВУЗов. Приборостроение, 1979, № 2, с.27+32.

ФИЛИМОНОВ Николай Борисович

**УПРАВЛЕНИЕ ПЕРЕХОДНЫМИ ПРОЦЕССАМИ
В ЛИНЕЙНЫХ КОНЕЧНОМЕРНЫХ
ОБЪЕКТАХ**

**Автореферат кандидатской диссертации по специальности
05.13.01 – теория систем, теория автоматического регулиро-
вания и управления и системный анализ**

МВТУ им. Н.Э.Баумана

Подписано к печати 24.08.1979г.

Л-77626

Объем I п.л.

Тираж 100 экз.

Зак.1019

Бесплатно

**Ротапринт типографии МВТУ им. Н.Э.Баумана
107005, Москва, Б-5, 2-я Бауманская ул., 5**