МН49033

НА ДОМ НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР
МОСКОВСКОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА,
ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧИЛИЩЕ им. Н. Э. БАУМАНА

На правах рукописи

БАТЫРКАНОВ ЖЕНИШ ИСАКУНОВИЧ

УДК 681.511.46.037

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КЛАССОВ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Специальность 01. 01. 11 — Системный анализ и автоматическое управление

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва 1987

Работа выполнена во Фрунзенском политехническом институте на кафедре «Автоматика и телемеханика».

Научный руководитель — доктор технических наук, доцент
ШАРШЕНАЛИЕВ Ж. Ш.

Официальные оппоненты: — доктор технических наук, профессор
БИРЮКОВ В. Ф.
— кандидат технических наук, с. н. с.
КОЗЛОВ В. С.

Ведущая организация — научно-исследовательский институт вычислительной математики и процессов управления при Ленинградском Государственном Университете имени А. А. Жданова

Защита состоится « 23 » марта 1987 г. в часов на заседании специализированного совета Д 053. 15. 01 в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана по адресу: 107005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библи... высшего технического учи...

Автореферат ... 1987 ...

Ученый с...
специализирова...
к. т. н., д... В. Н.

МН49033

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. "... шире исследовать проблемы механики, вопросы теории автоматизации производства"
(из Основных направлений экономического и социального развития СССР на 1986-1990 годы и на период до 2000 года)

В связи с тем фактом, что необходимым условием нормального функционирования любой системы управления является ее устойчивость, при разработке и исследовании конкретных систем автоматического управления на практике сталкиваются с проблемой анализа устойчивости. При этом проблема анализа устойчивости систем управления в силу отсутствия к настоящему времени ее полного решения остается одной из наиболее актуальных проблем в теории управления.

М4Ч9033

Исследование устойчивости нелинейных систем управления осложняется тем обстоятельством, что к настоящему времени нет универсальных и в то же время эффективных методов исследования устойчивости "в большом" и "в целом". При этом устойчивость "в большом" и "в целом" для большинства современных систем управления является необходимым условием их нормального функционирования. Поэтому проблема исследования устойчивости "в большом" и "в целом" для систем управления имеет важное практическое значение.

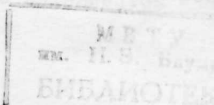
Наибольшее распространение к настоящему времени получили следующие подходы к исследованию устойчивости нелинейных систем "в большом" и "в целом": подход на основе прямого метода Ляпунова; частотный подход теории абсолютной устойчивости; подход на основе понятия устойчивости по входам и выходам.

Широкое применение частотных методов теории абсолютной устойчивости, которые разработаны в трудах В.М.Попова, Б.Н.Наумова, Я.З.Цыпкина, А.А.Воронова, В.А.Якубовича, Р.Калмана, Е.С.Пятницкого, С.А.Айсагалиева и других авторов, ограничивается тем обстоятельством, что эти методы применимы только для ограниченного класса нелинейных систем, которые принадлежат к так называемым системам прямого и непрямого регулирования и их модификациям.

Теорема Е.А.Барбашина-Н.Н.Красовского позволяет применять

НТБ МГТУ им.Н.Э.Баумана





прямой метод Ляпунова для исследования устойчивости нелинейных систем при любых начальных возмущениях фазовых переменных. Хотя прямой метод Ляпунова является универсальным методом исследования устойчивости любых динамических систем, однако эффективность его применения ограничивается системами прямого и непрямого регулирования и определенными типами систем частного характера. Это связано с тем, что к настоящему времени нет каких-либо универсальных приемов построения функций Ляпунова для произвольных нелинейных систем.

Подход на основе понятия устойчивости по отношениям входы-выходы начал разрабатываться с 70-х годов. Однако недостаточная разработанность вычислительных методов и алгоритмов данного подхода ограничивает ее возможность к исследованию устойчивости нелинейных систем.

Проблема стабилизации тесно связана с проблемой анализа устойчивости, и каждое продвижение на пути к решению проблемы анализа устойчивости дает возможности отыскания решений соответствующих новых задач синтеза стабилизирующего управления. Неоднозначность решения проблемы стабилизации привела к постановке различных классов задач. Среди этих классов задач особое место занимают задачи оптимальной стабилизации, аналитического конструирования. К отдельному классу задач стабилизации относятся задачи качественной стабилизации нелинейных систем управления. К настоящему времени задача аналитического конструирования решена для некоторых классов линейных систем, и основные результаты впервые получены А.М.Летовым, Н.Н.Красовским, А.А.Красовским, Р.Калманом, В.И.Зубовым. Что касается решения проблемы стабилизации для нелинейных систем, то на пути к решению этой проблемы, трудной в теоретическом и очень важной в прикладном отношении, в настоящее время сделаны лишь первые шаги. К сегодняшнему дню имеются отдельные решения проблемы стабилизации лишь для некоторых классов нелинейных систем, и проблема стабилизации для нелинейных систем в общем случае не решена.

Из вышеизложенного следует, что к сегодняшнему дню существующие методы исследования устойчивости и стабилизации "в большом" применимы только к определенным классам нелинейных систем управления (системы прямого и непрямого регулирования, некоторые типы нелинейных систем второго и третьего порядков). В то же время на практике встречается большое количество примеров от-

дельных типов нелинейных систем управления, в частности, электро-механические системы с двигателями постоянного тока с полюсным или комбинированным управлением, электромеханические системы с бесконтактными (бесколлекторными) двигателями постоянного тока, электроэнергетические системы с синхронными машинами, по отношению к которым применение существующих методов исследования устойчивости и стабилизации "в большом" принципиально невозможно или практически затруднительно. В связи с этим для таких систем становится актуальной и практически значимой проблема исследования устойчивости и стабилизации "в большом" и "в целом".

Целью работы является разработка методов анализа устойчивости и стабилизации "в большом" и "в целом" классов нелинейных объектов и систем управления, описываемых следующими уравнениями:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = a x_1 + \varphi(x_2); \end{cases} \qquad (1)$$

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = f_1(x_1, x_2, \dots, x_n), \\ \dot{x}_2 = f_2(x_2, \dots, x_n), \\ \dot{x}_n = f_n(x_n); \end{cases} \qquad (2)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x), \\ \left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^* \frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial f}{\partial x}\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^*, \end{cases} \qquad (3)$$

где $\frac{\partial f}{\partial x}$ – матрица Якоби, $\left(\frac{\partial f}{\partial x}\right)^*$ – сопряженная матрица;

$$\dot{x}_i = f_i(x, u), \quad f_i(0,0) = 0, \quad i = \overline{1,n}; \qquad (4)$$

$$\dot{x} = F(x) + G(x) \cdot u, \qquad (5)$$

где x – вектор состояния, u – вектор управления.

Общая методика исследования, проводимого в данной работе, опирается на аппарат функций Ляпунова, на методы теории автоматического управления, дифференциальных уравнений и функционального анализа.

Теоретические исследования заключались в решении следующих

основных задач:

Разработки метода анализа устойчивости "в большом", "в целом" вышеотмеченных классов нелинейных автономных систем, когда применение существующих методов анализа устойчивости "в большом и "в целом" принципиально невозможно или практически затруднительно;

разработки метода синтеза законов стабилизации для произвольных автономных нелинейных объектов управления из условия получения заданных дифференциальных уравнений замкнутой системы;

разработки метода синтеза оптимального закона стабилизации для нелинейного объекта управления с выделенным управлением (с линейно входящим управлением).

Экспериментальные исследования сводились к анализу качественного поведения рассматриваемых нелинейных систем при помощи ЭВМ, а также путем натурных испытаний разработанных нелинейных электромеханических систем управления.

Научная новизна работы заключается:

в разработке нового алгебраического метода анализа устойчивости "в большом" для рассматриваемых классов нелинейных систем;

в получении условий существования устойчивого предельного цикла в заданной области фазового пространства для исследуемых классов нелинейных систем;

в постановке и разработке метода синтеза законов стабилизации из условия получения заданных дифференциальных уравнений замкнутой системы;

в разработке метода синтеза оптимального закона стабилизации для нелинейных объектов управления с выделенным управлением.

Практическая ценность работы состоит в том, что разработанные методы анализа устойчивости и стабилизации "в большом" позволяют создавать системы автоматического управления для рассматриваемых классов нелинейных систем в случаях, когда использование известных методов либо затруднительно, либо неэффективно. Полученные алгоритмы анализа и синтеза допускают эффективное применение вычислительных машин и могут служить алгоритмической основой построения подсистем автоматизированного проектирования систем автоматического управления.

Реализация результатов работы. Разработанные методы и алгоритмы анализа устойчивости и стабилизации внедрены в разработках ОКБ ИКИ АН СССР (г. Фрунзе) при создании систем управления ска-

нирующими устройствами с экономическим эффектом 14 тыс.рублей в год и использованы в разработках ВНИИКАмелиорация (г.Фрунзе) по созданию контуров регулирования подсистемы обработки аэрокосмической информации.

Разработанная система управления угловой скоростью двигателя постоянного тока внедрена в учебный процесс Фрунзенского политехнического института и позволяет проводить НИРС на изготовленном стенде.

Апробация результатов. Основные результаты диссертационной работы были доложены:

на Московской городской конференции молодых ученых и специалистов по повышению надежности, экономичности и мощности энергетического и электротехнического оборудования, г.Москва, 9-16 апреля 1974 г.;

на XX-XXII научно-технических конференциях профессорско-преподавательского состава, инженерно-технических работников и аспирантов Фрунзенского политехнического института, г.Фрунзе, 25-28 июня 1974 г., 19-22 мая 1975 г., 12-15 апреля 1976г.;

на республиканской научно-технической конференции "Состояние и перспективы развития технических наук в Киргизии", г.Фрунзе, 29-31 января 1980 г.;

на II Всесоюзной межвузовской научно-технической конференции "Математическое, алгоритмическое и техническое обеспечение АСУТП", г. Ташкент, 24-26 сентября 1980 г.;

на координационном совещании по проблемам адаптации и XI Всесоюзной школе-семинаре по адаптивным системам г.Фрунзе, 16-25 апреля 1982 г.;

на XXУ общеинститутской научной конференции ФПИ, посвященной 60-летию образования Кирг.ССР, г. Фрунзе, 16-18 октября 1984 г.;

на XXУI общеинститутской научно-практической конференции ФПИ, посвященной вопросам ускорения научно-технического прогресса, г.Фрунзе, 22-24 октября 1985 г.

Публикации. По результатам выполненных научных исследований опубликовано 13 работ. Работы написаны без соавторства.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа изложена на 157 страницах машинописного текста, содержит 1 таблицу и 15 рисунков. Работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка цитируемой литературы из 123 наименования и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность и практическое значение исследований. Указаны цель, научная новизна и практическая ценность результатов диссертационной работы.

В первой главе анализируется современное состояние проблем анализа устойчивости и стабилизации нелинейных систем управления. Отмечается, что к сегодняшнему дню существующие методы исследования устойчивости и стабилизации "в большом" и "в целом" применимы только к определенным, достаточно узким классам нелинейных систем управления.

В конце главы приведена постановка задач анализа устойчивости и стабилизации отдельных классов нелинейных автономных систем управления.

Во второй главе решается задача анализа устойчивости "в большом" нулевого положения равновесия нелинейных систем рассматриваемых классов (I)+(3). В параграфе 2.I формулируется и доказывается следующая теорема об устойчивости.

Теорема I. Если вещественные части собственных значений матрицы Якоби от правых частей исследуемых систем (I)+(3) в некоторой области фазового пространства G отрицательны и выполняется условие $\|f\| \to \infty$ при $\|x\| \to \infty$, то нулевые положения равновесия исследуемых систем (I)+(3) асимптотически устойчивы в области G.

Доказательство теоремы осуществляется на основе прямого метода Ляпунова путем построения специальных функций Ляпунова. Для систем (I) и (2) функция Ляпунова берется в виде

$$V(x) = f^T \cdot B \cdot f,$$

где f – вектор-столбец правых частей исследуемой системы, $B = diag[b_1, \ldots, b_n]$ – положительно определенная числовая диагональная матрица, элементы которой определяются по специальной процедуре. Для системы (3) функция Ляпунова берется в виде

$$V(x) = f^T \cdot f > 0.$$

В параграфе 2.2. на основе доказанной теоремы об устойчивости для нелинейных систем рассматриваемых классов (I)+(3) сформулированы соответствующие алгебраические условия (критерии)

устойчивости нулевого положения равновесия. Для нелинейных систем, описываемых уравнениями (I), алгебраические условия устойчивости представляются в виде следующих неравенств:

$$\begin{cases} a < 0, \\ \dfrac{\partial \varphi}{\partial x_2} < 0, \end{cases} \tag{6}$$

Для нелинейных систем вида (2) алгебраические условия устойчивости записываются в виде

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_i} < 0, \quad i = \overline{1, n}, \tag{7}$$

где f_i – правые части уравнений системы (2).

Алгебраические условия устойчивости нелинейных систем вида (3) формируются следующим образом. Составляется характеристическое уравнение для матрицы Якоби.

$$\det\left(\frac{\partial f}{\partial x} - \lambda E\right) = \lambda^n + a_1(x)\lambda^{n-1} + a_2(x)\lambda^{n-2} + \ldots + a_n(x) = 0.$$

Далее для характеристического уравнения применяется любой алгебраический критерий знакоотрицательности вещественных частей корней характеристического уравнения, например, критерий Гурвица

$$\begin{cases} \Delta_1 = a_1(x) > \varepsilon, \\ \Delta_2 = a_1(x)a_2(x) - a_3(x) > \varepsilon, \\ \cdots\cdots\cdots\cdots \\ \Delta_n > \varepsilon, \end{cases} \tag{8}$$

где ε – малая положительная константа.

Система неравенств (8) и представляет собой критерий устойчивости нулевого положения равновесия нелинейных систем вида (3).

В параграфе 2.3. приведены примеры исследования устойчивости некоторых нелинейных систем на основе сформулированных критериев устойчивости.

В параграфе 2.4. решается задача оценки области устойчивос-

ти (притяжения) нулевого положения равновесия нелинейных систем вида (I)÷(3). При решении задачи оценки области устойчивости используются сформулированные алгебраические условия устойчивости (6)÷(8), которые связывают свойство устойчивости с одной стороны, с величинами начальных отклонений фазовых переменных с другой стороны. Процесс оценки области устойчивости для рассматриваемых нелинейных систем доведен до машинных алгоритмов. Приводится пример машинной оценки области устойчивости. При этом полученные результаты полностью согласуются с известными.

В параграфе 2.5 рассматриваются некоторые вопросы устойчивости нелинейных систем. Для исследуемых систем (I)÷(3) доказывается следующая теорема о существовании устойчивого предельного цикла (автоколебания).

Теорема 2. Если существуют такие две константы r_0 и r_1 что: в области $(x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2)\le r_0^2$ матрица Якоби исследуемой системы имеет хотя бы одно собственное значение с положительной вещественной частью, то есть $Re\lambda_K>0$; в области $(x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2)\ge r_1^2$ все $Re\lambda_i<0,\ i=\overline{1,n}$; в шаровом слое $r_0^2\le (x_1^2+x_2^2+\ldots+x_n^2)\le r_1^2$ нет положений равновесия, то в этом шаровом слое имеется устойчивый предельный цикл.

Доказательство этой теоремы опирается на теорему I и теорему Йосидзавы. В качестве апробации полученного результата рассматриваются известные системы Ван-дер-Поля и Рэлея. В этом же параграфе исследуется проблема Айзермана. Показывается, что для нелинейных систем вида (I)÷(3) гипотеза Калмана справедлива:

Третья глава посвящена проблеме стабилизации. В параграфе 3.I ставится и решается задача синтеза законов стабилизации из условия получения заранее заданных (требуемых) уравнений замкнутой системы. При этом для произвольного нелинейного объекта, описываемого уравнением

$$\dot{x}=f(x,u),\quad f(0,0)=0, \tag{9}$$

ставится задача синтеза закона стабилизации $u=\varphi(x)$ так, чтобы уравнение синтезируемой замкнутой системы

$$\dot{x}=f(x,\varphi(x)) \tag{10}$$

совпадало с заранее заданным уравнением

$$\dot{x}=\Phi(x),\quad \Phi(0)=0. \tag{11}$$

Учитывая тот факт, что для уравнений возмущенного движения по конкретно заданным дифференциальным уравнениям однозначно определяется ее матрица Якоби и наоборот, задание конкретных уравнений (II) осуществляется путем задания конкретных матриц Якоби

$$\frac{\partial \Phi}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \varphi_1}{\partial x_n} \\ \dots \dots \dots \\ \frac{\partial \varphi_n}{\partial x_1}, \dots, \frac{\partial \varphi_n}{\partial x_n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \Phi_{11}, \dots, \Phi_{1n} \\ \dots \dots \dots \\ \Phi_{n1}, \dots, \Phi_{nn} \end{pmatrix}. \qquad (12)$$

Решение вышепоставленной задачи синтеза осуществляется следующим образом. Выписывается матрица Якоби объекта управления (9) с пока неопределенным искомым законом стабилизации $U_j = \varphi_j(x)$, $j = \overline{1, m}$, которая в общем случае имеет вид

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} + \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_j} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_1}; \dots; \frac{\partial f_1}{\partial x_n} + \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial f_1}{\partial \varphi_j} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_n} \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} + \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial f_n}{\partial \varphi_j} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_1}; \dots; \frac{\partial f_n}{\partial x_n} + \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial f_n}{\partial \varphi_j} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_n} \end{pmatrix}. \qquad (13)$$

Затем, приравнивая соответствующие элементы матриц (12) и (13), получают

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_s} + \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial f_i}{\partial \varphi_j} \frac{\partial \varphi_j}{\partial x_s} = \Phi_{is}, \quad i, s = \overline{1, n}, \qquad (14)$$

систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных относительно искомых функций $U_j = \varphi_j(x)$, $j = \overline{1, m}$.

Законы стабилизации $U_j = \varphi_j(x)$, $j = \overline{1, m}$, определяемые из (14), решают вышепоставленную задачу стабилизации, и уравнение синтезированной замкнутой системы совпадают с требуемым уравнением (II). Уравнение (14) представляют собой систему нелинейных дифференциальных уравнений в частных производных, поэтому в общем случае определение ее решения $\varphi_j(x)$, $j = \overline{1, m}$

практически невозможно. В связи с этим законы стабилизации $u_j = \varphi_j(x)$, $j = \overline{1,m}$ ищутся из определенных классов функций. Например, из класса полиномов

$$u_j = \varphi_j(x) = c_{j1}x_1 + c_{j2}x_2 + \ldots + c_{jn}x_n + c_{j12}x_1x_2 + \ldots , \quad j = \overline{1,m} \qquad (15)$$

или из класса показательных функций, или из класса дробно-рациональных выражений от фазовых переменных и т.д. Выбор того или иного класса функций зависит от структуры правых частей дифференциальных уравнений объекта управления и структуры элементов требуемой матрицы Якоби (I2). Например, если правые части дифференциальных уравнений объекта управления представляют собой некоторые полиномы от фазовых переменных и когда элементы требуемой матрицы Якоби также представляются в виде полиномов или постоянных чисел, то функции $\varphi_j(x)$ ищутся в классе полиномов (I5). Путем подстановки выражений (I5) в систему (I4) получают систему алгебраических уравнений для определения искомых коэффициентов $c_{11}, c_{12}, \ldots$. Процесс отыскания бесконечного числа постоянных коэффициентов $c_{11}, c_{12}, \ldots$ вряд ли имеет смысл как с вычислительной точки зрения, так и с точки зрения технической реализации полученного закона стабилизации. Поэтому предлагается следующая поэтапная процедура определения конечного числа искомых коэффициентов. На перво.. этапе закон стабилизации ищется в классе линейных форм

$$u_j = \varphi_j(x) = c_{j1}x_1 + \ldots + c_{jn}x_n , \quad j = \overline{1,m} . \qquad (16)$$

Подставляя (I6) в (I4), получают

$$\frac{\partial f_i}{\partial x_s} + \sum_{j=1}^{m} \frac{\partial f_i}{\partial \varphi_j} c_{js} = \varphi_{is} , \quad i,s = \overline{1,n} \qquad (17)$$

систему алгебраических уравнений относительно искомых c_{j1}, ..., c_{jn} . При этом имеется две возможности – система (I7) имеет решение относительно искомых числовых коэффициентов, либо не имеет решения. В первом случае процедура синтеза заканчивается и закон стабилизации найден в классе линейных форм (I6). Во втором случае переходят к следующему этапу процедуры синтеза, где закон стабилизации отыскивается в расширенном классе "линейные плюс квадратичные формы":

$$u_j = \varphi_j(x) = c_{j1}x_1 + \ldots + c_{jn}x_n + c_{j11}x_1^2 + \ldots + c_{jnn}x_n^2 . \qquad (18)$$

В дальнейшем процедура определения коэффициентов аналогична вышеописанному и, если процесс отыскания коэффициентов $C_{j1},\dots,$ C_{jnn} дал отрицательный результат, то переходят к следующему этапу процедуры синтеза, где закон стабилизации (I8) наращивается кубичной формой и вышеописанный процесс отыскания искомых коэффициентов повторяется. Процедура наращивания закона стабилизации высшими формами происходит до тех пор, пока не получают положительного решения процесса отыскания искомых коэффициентов. В данном параграфе рассмотрены процедуры синтеза для случаев, когда требуемые уравнения замкнутых систем (II) задаются в линейном классе и в классе уравнений вида (I)÷(3).

Решение вышепоставленной задачи синтеза в том случае, когда динамика объекта описывается уравнением вида (5'), осуществляется следующим образом. Приравнивая правые части систем (5) и (II), получают выражение

$$F(x)+G(x)U=\Phi(x), \tag{19}$$

откуда искомый закон стабилизации определяется в виде

$$U=(G^{T}\cdot G)^{-1}\cdot G^{T}\left[\Phi(x)-F(x)\right]. \tag{20}$$

В случае квадратной матрицы G закон стабилизации имеет вид

$$U=G^{-1}\left[\Phi(x)-F(x)\right]. \tag{21}$$

В параграфе 3.2 для нелинейных объектов управления, описываемых уравнениями вида (5) на основе прямого метода Ляпунова решается задача оптимальной стабилизации. Оптимальность закона стабилизации понимается в смысле минимума нормы вектора управления $\|U\|=\sqrt{(U,U)}$. Доказывается, что оптимальный закон стабилизации для систем (5) выражается в виде

$$U_{G}(x)=-\left[\omega(x)+\left(\frac{\partial V}{\partial x},F(x)\right)\right]\cdot\left(G^{T}\frac{\partial V}{\partial x},G^{T}\frac{\partial V}{\partial x}\right)^{-1}G^{T}\frac{\partial V}{\partial x}, \tag{22}$$

где $V(x)$ – положительно определенная функция от переменных состояния (функция Ляпунова); $\omega(x)$ – положительно определенная функция; $(.,.)$ – обозначает знак скалярного произведения.

В четвертой главе приведены результаты практического приложения полученных теоретических результатов применительно к конкретным электромеханическим системам управления. В данной

главе, во-первых, проводится разработка и исследование системы стабилизации угловой скорости двигателя постоянного тока и, во-вторых, осуществляется разработка и исследование системы управления для электромеханической системы сканирования.

В параграфе 4.I решается задача стабилизации угловой скорости двигателя постоянного тока типа У-I8-2 при комбинированном управлении. На основании полученных нелинейных уравнений возмущенного движения осуществлен синтез нелинейного стабилизирующего регулятора, при котором замкнутая система имеет требуемую структуру дифференциальных уравнений, а тем самым обладает требуемыми качественными показателями.

В параграфе 4.2 синтезируется регулятор, который обеспечивает рабочему органу оптического зеркального дефлектора (ОЗД) движение по требуемому закону в пространстве и во времени. Для синтеза предварительно найдены дифференциальные уравнения замкнутой системы, при котором движение ОЗД происходит по требуемому закону. Синтез регулятора осуществляется согласно разработанному методу из условия обеспечения замкнутой системе конкретного требуемого вида дифференциальных уравнений.

В данной главе приведены также результаты моделирования и натурных экспериментов разработанных электромеханических систем. Результаты моделирования, натурных экспериментов полностью подтвердили полученные теоретические положения.

В приложении приведены документы, подтверждающие внедрения результатов диссертационной работы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования позволили решить актуальную задачу, связанную с разработкой методов стабилизации и анализа устойчивости "в большом" и "в целом" для отдельных классов нелинейных систем управления.

1. Разработан новый алгебраический метод анализа устойчивости "в большом", "в целом", позволяющий проводить эффективное исследование нелинейных систем управления вида (I)÷(3) путем анализа только знаков элементов матрицы Якоби.

2. Предложен критерий существования устойчивого предельного цикла (автоколебания) в заданной области фазового пространства, расширяющий возможности существующих методов применитель-

но к нелинейным системам (I) + (3) произвольного порядка.

3. Выявлен класс нелинейных систем управления, для которых гипотеза Калмана справедлива.

4. Разработаны алгоритмы оценки областей устойчивости (притяжения) исследуемых классов нелинейных систем, допускающие эффективное использование вычислительных машин.

5. Разработан метод синтеза законов стабилизации для нелинейных автономных объектов управления, которая позволяет обеспечить замкнутой системе желаемую динамику.

6. Разработан метод синтеза оптимального закона стабилизации для нелинейных объектов с выделенным управлением (с линейно входящим управлением). Синтезированный закон стабилизации применительно к линейным управляемым объектам дает результаты, совпадающие с известными результатами аналитического конструирования, и реализация законов стабилизации в этом случае связана с решениями матричных уравнений Риккати.

7. Эффективность разработанных методов анализа устойчивости и стабилизации экспериментально подтверждена при решении практических задач разработки электромеханической системы сканирования и системы стабилизации угловой скорости.

Основное содержание диссертационной работы изложено в следующих публикациях:

I. Батырканов Ж.И. Оценка движения системы по энергетическому балансу с использованием функции Ляпунова // Труды МЭИ. – 1974. – Вып.181 – Прикладные вопросы технической кибернетики. – С.39–41.

2. Батырканов Ж.И. Энергетический подход к построению функций Ляпунова // Труды Фрунзенского политехнического института. – 1974. – Вып.81 – Техническая кибернетика. – С.71–7[illegible].

3. Батырканов Ж.И. О выводе выражений для отдельных видов энергий динамической системы по ее дифференциальным уравнениям // Труды Фрунзенского политехнического института. – 1974. – Вып 81 – Техническая кибернетика. – С.73–79.

4. Батырканов Ж.И. Исследование устойчивости нелинейных автономных систем на основе функций Ляпунова // Труды Фрунзенского политехнического института. – 1976. – Вып.95 – Техническая кибернетика. – С.164–168.

5. Батырканов Ж.И. Исследование проблемы Айзермана // Труды Фрунзенского политехнического института. - 1976. - Вып.95 - Техническая кибернетика. - С.158-163.

6. Батырканов Ж.И. Исследование устойчивости системы стабилизации угловой скорости двигателя постоянного тока по стороны обмотки возбуждения // Исследование и проектирование электромеханических преобразователей энергии. - Фрунзе: ФПИ, 1979. - С.117-120.

7. Батырканов Ж.И. К вопросу стабилизируемости и устойчивости одного класса летательных аппаратов // Состояние и перспективы развития технических наук в Киргизии: Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. Секция технической кибернетики. - Фрунзе. 1980. - С.12-13.

8. Батырканов Ж.И. О сшивании функций Ляпунова // Состояние и перспективы развития технических наук в Киргизии: Тезисы докладов республиканской научно-технической конференции. Секция технической кибернетики. - Фрунзе, 1980. - С.14-15.

9. Батырканов Ж.И. Об одном методе оптимальной стабилизации нелинейных автономных систем управления // Тезисы докл II Всесоюзной межвуз. научно-техн. конф. Математическое, алгоритмическое и техническое обеспечение АСУТП. - Ташкент, 1980. - С. 101-102.

10. Батырканов Ж.И. К вопросу построения функций Ляпунова для исследования устойчивости нелинейных автономных систем // Системы управления движением. - Фрунзе: ФПИ, 1981. - С.3-6.

11. Батырканов Ж.И. К синтезу программного регулятора для одного класса систем // Автоматические системы управления. - Фрунзе: ФПИ, 1984. - С.99-106.

12. Батырканов Ж.И. Исследование предельных циклов для одного класса систем управления // Анализ и синтез автоматического управления. - Фрунзе: ФПИ, 1986. - С.9-13.

13. Батырканов Ж.И. Исследование качественного поведения нелинейной системы стабилизации угловой скорости двигателя постоянного тока // Исследование и проектирование электромеханических систем. - Фрунзе: ФПИ, 1986. - С.89-94.

КГТУ им. И.Р. Раззакова БИБЛИОТЕКА

БАТЫРКАНОВ Кенеш Исакунович

ИССЛЕДОВАНИЕ УСТОЙЧИВОСТИ И СТАБИЛИЗАЦИИ КЛАССОВ НЕЛИНЕЙНЫХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Объем I п.л. Тираж I00 экз., зак. Д-01162
Бесплатно

Ротапринт типографии ФПИ , г.Фрунзе, пр.Мира 66