

1184223
МОСКОВСКИЙ ОРДЕНА ЛЕНИНА, ОРДЕНА ОКТЯБРЬСКОЙ РЕВОЛЮЦИИ
И ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Э.БАУМАНА

На правах рукописи

УДК 681.335:62-83-626

ЧХЕИДЗЕ Георгий Алаксандрович

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЕМ СЛЕДЯЩИХ ПРИВОДОВ
ВЫСОКОЙ ДИНАМИЧЕСКОЙ ТОЧНОСТИ И МАЛОЙ ПАРАМЕТРИ-
ЧЕСКОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ

05.02.03 - Системы приводов

05.02.05 - Роботы, манипуляторы и робототехнические
системы

А в т о р е ф е р а т
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1993

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана

Научный руководитель - доктор технических наук,
профессор Крутько Петр Дмитриевич

Официальные оппоненты - доктор технических наук,
профессор Аскапов Юрий Михайлович
кандидат технических наук,
Орлов Владимир Борисович

Ведущая организация - Центральный научно-исследовательский
технологический институт

Защита диссертации состоится " _____ " 1993 г. на заседании специализированного совета К053.15.06 в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и Ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н.Э.Баумана _____ кая улица, д.5.

Ваш _____
печатью, _____ заверенный

С д _____ ту.

Авто

Учен
специ
канд

М 84223

ВКСИМОБ

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

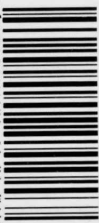
Актуальность работы. Развитие техники и усложнение технологических процессов привело к ужесточению требований, предъявляемых к динамическим характеристикам следящих приводов. В связи с этим большую актуальность приобретают методики синтеза алгоритмов управления движением следящих приводов высокой динамической точности и малой параметрической чувствительности. Важность темы подтверждается многочисленностью публикаций по этой проблеме, проявляющихся в настоящее время в отечественных и зарубежных научных изданиях.

Применение традиционных методов синтеза корректирующих цепей при управлении движением многомассовых систем с упругими механизмами передачи движений и с переменными параметрами не только встречает значительные трудности, но часто не приводит к желаемым результатам. Со второй половины 1950-х годов в теории автоматического управления развивается раздел самонастраивающихся систем. В этом направлении были предложены различные принципы, схемы и алгоритмы адаптивного управления. Однако их практическое применение остается скромным. Это обусловлено главным образом техническими трудностями их аппаратной реализации, в первую очередь - большим объемом требуемой информации, недоступной для измерения. Поэтому остается актуальной задача разработки новых структур алгоритмов управления, обладающих свойствами адаптивности.

В настоящей диссертации развивается новый подход к решению задач синтеза алгоритмов управления. Он основан на применении концепций обратных задач динамики в сочетании с идеями управления по старшим производным. Синтезированные таким образом алгоритмы придают системам свойства слабой параметрической и структурной чувствительности, а также слабой чувствительности к возмущающим силам. Для аппаратной реализации алгоритмов предлагаемой структуры требуется минимальный объем измеряемой информации.

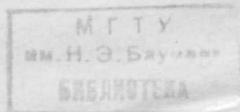
М 84 223

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1087223

Хранение алгоритмы управления



Цель работы. Целью диссертационной работы является разработка теоретических и методических основ синтеза алгоритмов управления движением следящих приводов высокой динамической точности и малой параметрической чувствительности с использованием минимального объема измеряемой информации.

Задачи исследования. В диссертации определены следующие задачи:

разработать методику формирования структуры адаптивных алгоритмов управления, реализующих требования задания на проектирование;

разработать методику расчета параметров алгоритмов управления;

разработать методику синтеза алгоритмов гашения автоколебаний в существенно нелинейных системах;

разработать методику синтеза алгоритмов управления движением в скользящих режимах;

разработать методику синтеза алгоритмов управления, субоптимальных по быстродействию.

решить прикладные задачи управления движением электромеханических и гидравлических следящих приводов.

Методы исследования. В работе использовались: методы математического анализа, теории устойчивости, теории оптимального управления, численного интегрирования дифференциальных уравнений, а также методика гармонической линеаризации. Кроме того проводилось математическое моделирование на ПЭВМ типа IBM PC с использованием прикладных программ: TAR, MDS, MODS и ROBOT.

Достоверность полученных результатов базируется на строгом и обоснованном использовании математического аппарата и методов теории управления, а также на сравнении результатов компьютерного моделирования с теоретическими выводами.

Научная новизна работы. В диссертации разработана принципиально новая методика синтеза алгоритмов управления движением следящих приводов высокой динамической точности, малой параметрической и структурной чувствительности. От традиционных процедур синтеза она отличается методической простотой, а также простотой реализации алгоритмов.

Сформулированы и доказаны необходимые и достаточные условия гашения автоколебаний в существенно нелинейных системах. Приведена новая классификация нелинейных характеристик.

Найдено эффективное решение задачи управления в скользящих режимах, позволяющее избежать трудностей математического характера, связанных с определением гиперповерхности переключения и границ области, в которой возникает управляемый скользящий процесс.

Разработаны новые подходы для синтеза субоптимальных по быстродействию алгоритмов управления объектами, движение которых описывается дифференциальными уравнениями высокого порядка.

Решен ряд сложных прикладных задач управления движением электромеханических и гидравлических систем, в том числе при ограничениях на величину фазовых координат управляемого объекта.

Практическая ценность работы. Теоретические результаты диссертации, а также содержащиеся в ней методики синтеза алгоритмов и расчета параметров могут быть непосредственно использованы при проектировании высокоточных систем управления объектами, движение которых описывается сложными уравнениями высокого порядка. Они позволяют до минимума сократить время, затрачиваемое на проектирование системы управления или полностью автоматизировать этот процесс путем создания специальных САПР. Существенно при этом, что синтез алгоритмов можно проводить при наличии неполной информации о математической модели управляемого объекта.

Реализация работы. Основные результаты диссертационной работы использовались в исследованиях Центрального научно-исследовательского технологического института при разработке структуры системы управления технологическим оборудованием, а так же в научно-исследовательском институте специального машиностроения МГТУ при разработке системы управления движением манипулятора типа УЭР-2.5.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались: на научно-технической конференции молодежи / г. Москва, 1989 г./, на семинаре "Проектирование алгоритмического обеспечения систем автоматического управления" / г. Москва, 1990 г./.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 6 научных работ, в том числе 4 статьи в центральных научных журналах академии наук.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 71 наименования и приложения.

Объем диссертационной работы 239 страниц, из них 143 страницы машинописного текста. Работа содержит 109 рисунков и 7 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы и излагается краткое содержание работы.

В первой главе изложены теоретические и методические основы синтеза алгоритмов управления, реализующих в системах высокую динамическую точность и малую чувствительность к изменению параметров и внешним возмущающим силам. Структура алгоритмов синтезируется на основе концепции обратных задач

динамики в сочетании с идеями управления по старшим производным управляемых переменных. Рассмотрены вопросы информационного обеспечения алгоритмов управления и предложены схемы их аппаратной или программной реализации, исключающие необходимость измерения старших производных.

В п.1.1 формулируется задача синтеза алгоритма управления применительно к математической модели объекта

$$x^{(n)} + \sum_{\nu=0}^{n-1} a_{\nu} x^{(\nu)} = \sum_{\mu=0}^m b_{\mu} u^{(\mu)}, \quad (1)$$

где x - управляемая переменная, u - управляющая функция. Требованиям задания на проектирование соответствуют эталонная система, движение которой описывается дифференциальным уравнением

$$y^{(r)} + \sum_{s=0}^{r-1} \alpha_s y^{(s)} = \sum_{j=0}^1 \beta_j x_{ex}^{(j)}, \quad (2)$$

где x_{ex} , y - входной сигнал и выходная переменная.

Необходимо синтезировать такой алгоритм управления $u = u(t, x, \dot{x}, \dots)$, при котором движение управляемой системы осуществляется в малой окрестности с назначенной траектории, т.е. $|x - y| \leq \sigma$ при $t \geq 0$.

В п.1.2 определена структура алгоритмов управления. Сформулированная задача решается на основе пропорционального закона управления

$$u = k [y^{(n-1)} - x^{(n-1)}], \quad (3)$$

где k - коэффициент усиления в контуре старшей производной.

Требуемое значение производной $y^{(n-1)}$ вычисляется по соотношению

$$y^{(n-1)} = \int \dots \int \left[\sum_{j=0}^1 \beta_j x_{ex}^{(j)} - \sum_{s=0}^{r-1} \alpha_s x^{(s)} \right] dt \dots dt, \quad (4)$$

которые получаются из уравнения эталонной модели (2) после

замены переменных $y^{(s)} = x^{(s)}$, $s = 0, 1, \dots, n-2$. Это соответствует требованию осуществления движения по назначенной траектории.

Для конкретных значений порядков дифференциальных операторов ($l=2, r=5$) структура замкнутой системы выглядит так, как показано на рис.1. В структуре системы содержится контур управления старшей производной. Задающим сигналом этого контура является требуемое значение $y^{(n-1)}$, которое формируется внешними контурами. Существенно при этом, что при вычислениях не выполняется операция дифференцирования входного сигнала. Это достигается благодаря определенному соотношению ($r \geq n+1$) порядков дифференциальных операторов модели и объекта.

В работе проведено детальное исследование свойств алгоритмов рассматриваемой структуры.

Доказано, что всегда существует такое конечное значение коэффициента усиления k , при котором обеспечивается устойчивость. При этом с увеличением усиления степень устойчивости повышается. Доказательство проведено с помощью принципа аргумента. Найдена аналитическая формула для определения граничного значения усиления

$$k > k^* = |R(i\omega^*)| = \left| \frac{A(i\omega^*)(i\omega^*)^{r-n+1}}{b_0 \alpha(i\omega^*)} \right|,$$

$$A(i\omega) = (i\omega)^n + \sum_{v=0}^{n-1} a_v (i\omega)^v, \quad \alpha(i\omega) = (i\omega)^r + \sum_{s=0}^{r-1} \alpha_s (i\omega)^s,$$

где ω^* — максимальная частота, на которой годограф характеристики $R(i\omega)$ пересекает отрицательную полуось действительной оси комплексной плоскости. Если такое пересечение отсутствует, то $k^* = 0$.

При исследованиях асимптотических свойств показано, что алгоритмы рассматриваемой структуры допускают теоретически неограниченное увеличение коэффициента усиления в контуре старшей производной. В асимптотике уравнение замкнутой системы

вырождается в уравнение эталонной модели (2). Следовательно, управление по старшей производной теоретически обеспечивает сколь угодно высокую точность приближения управляемого процесса к эталонному. Это справедливо независимо от изменения параметров объекта. Следствием такого свойства является слабая параметрическая чувствительность системы.

В п.1.3 приведена методика расчета параметров алгоритма управления. Расчетным параметром является коэффициент усиления в контуре старшей производной. Он рассчитывается из условия, чтобы процессы в этом контуре протекали существенно быстрее, чем в эталонной модели. Практически рекомендуется величину коэффициента усиления рассчитывать по неравенствам

$$k \geq \frac{(3-5)\omega_c}{b_0} \quad \text{или} \quad k \geq \frac{(3-5)\omega_\pi}{b_0} ,$$

где ω_c - частота среза характеристики эталонной модели, ω_π - максимальная частота, на которой фазовая характеристика эталонной системы пересекает линию $\varphi = -\pi$ сверху вниз.

В п.1.4 приведены алгоритмы информационного обеспечения.

Производные выходной переменной до порядка $n-1$ предлагается вычислять по уравнению управляемого процесса (1). Возможны два варианта алгоритма вычисления. Первый вариант реализует разомкнутую схему вычислений. Второй вариант основан на реализации замкнутой схемы

$$x_p^{(n)} = b_0 u - a_0 x - \sum_{\nu=1}^{n-1} a_\nu x_p^{(\nu)} ,$$

$$x_p^{(\nu-1)} = \int_0^t x_p^{(\nu)} d\tau , \quad \nu = 2, 3, \dots, n .$$

Ему соответствует структура, изображенная на рис.2. Здесь порядок управляемого объекта $n = 4$. По простоте реализации и динамическим свойствам предпочтение отдается второй схеме. В обоих случаях для вычисления всех производных достаточно измерений только выходной переменной. При этом нет необходимости выполнять операции дифференцирования.

Структура системы с алгоритмом информационного обеспечения показана на рис.3. По виду она напоминает классическую структуру системы с последовательно - параллельной коррекцией, где роль последовательной корректирующей цепи играет модель эталонной системы, а параллельной - модель алгоритма вычислений.

В п.1.5 показано, что алгоритмы управления по старшим производным представляют собой асимптотическую форму классических алгоритмов, оптимальных по переходным процессам.

В п.1.6 приведены основные выводы по главе 1.

Вторая глава посвящена исследованиям динамики существенно нелинейных систем, управляемых по старшим производным.

Предполагается, что в прямой цепи системы имеется один нелинейный элемент с характеристикой $F(u)$ произвольного вида. В работе проведена классификация нелинейных характеристик по расположению на комплексной плоскости годографов гармонически линеаризованных характеристик:

- к первому классу относятся однозначные характеристики, годографы которых полностью расположены на отрицательной полуоси действительной оси ;
- ко второму классу относятся характеристики, годографы которых полностью расположены в третьем квадранте ;
- наконец, в третий класс входят характеристики, годографы которых расположены во втором квадранте.

Установлено, что предлагаемые алгоритмы обеспечивают гашение автоколебаний в существенно нелинейных системах, если степень дифференциального оператора в правой части уравнения эталонной модели (2) удовлетворяет условиям:

$$1 \leq \begin{cases} 2 - \mu, & \text{для нел. элементов 1,3 класса;} \\ 1 - \mu, & \text{для нел. элементов 2 класса,} \end{cases}$$

где μ - число нулевых полюсов в передаточной функции объекта.

В п.2.2 рассмотрен модельный пример и синтезирован

алгоритм гашения автоколебаний, основанный на предлагаемой методике, в том случае, когда традиционные методы синтеза не могут привести к желаемому результату.

В п.2.3 получено новое решение задачи управления движением в скользящих режимах.

Показано, что гиперповерхность переключения формируется эталонной моделью совместно с объектом управления. При этом движение изображающей точки в скользящем режиме происходит в окрестности фазовой траектории эталонной системы.

Установлено, что в системах для которых выполняются необходимые и достаточные условия гашения автоколебаний, изображающая точка из любых начальных состояний попадает в такую область фазового пространства, в которой неизбежно возникает управляемый скользящий режим. Получено аналитическое выражение границы такой области.

Таким образом, предложенные алгоритмы позволяют избежать трудностей математического характера, связанных с построением гиперповерхности переключения управляющей функции и определением области состояний, в которой происходит скольжение.

В п.2.4 приведены выводы по главе 2.

В третьей главе изложены результаты решения прикладных задач управления движением электромеханических систем.

В п.3.1 рассмотрена задача управления двухмассовой упругой системой. Объект управления представляет собой слабодемпфированную колебательную систему, частотная характеристика которой имеет резонансный пик в окрестности частоты среза эталонной модели. В силу этой особенности имеют место известные затруднения при синтезе корректирующих цепей частотными методами. В данном случае алгоритм синтезировался по методике, приведенной в главе 1.

Показано, что при умеренных значениях коэффициента усиления в контуре старшей производной ($k = 10^4$) доминирующие полюса передаточной функции замкнутой системы мало

отличаются от соответствующих полюсов эталонной модели.

Исследована зависимость интегральной квадратичной оценки отклонения $y(t) - x(t)$ от величины коэффициента усиления в контуре старшей производной и от изменения момента инерции нагрузки. Так, при его изменении в 10 раз величина ИКО остается малой. Это означает, что система обладает слабой чувствительностью к изменению нагрузки.

Система является нечувствительной также к внешнему возмущающему моменту. Так, при амплитуде возмущающего момента, составляющего 20% от максимального, величина моментной ошибки на порядок меньше допустимой динамической ошибки.

В п.3.2 решена задача управления антенной системой слежения за искусственным спутником Земли.

Модель объекта управления имеет пятый порядок. Система характеризуется большим моментом инерции (порядка $14 \text{ т} \cdot \text{м}^2$). В ее структуре содержится высокودинамичный элемент — электромашинный усилитель. В силу этого передаточная функция замкнутой системы допускает аппроксимацию.

Алгоритмы управления синтезированы по аппроксимирующим передаточным функциям третьего и четвертого порядков, а также по полной модели.

Исследования показали, что алгоритм управления, синтезированный по аппроксимирующей модели третьего порядка, обеспечивает высокие динамические характеристики и точность системы.

Таким образом установлено, что благодаря слабой параметрической чувствительности алгоритмов оказывается возможным проектировать алгоритмическое обеспечение сложных систем по упрощенным моделям. Это свойство иллюстрирует и структурную нечувствительность предлагаемых алгоритмов.

В п.3.3 синтезированы алгоритмы управления движением манипуляторов двух кинематических схем: один из них с тремя степенями свободы, а другой — 6-ти степенной типа УЭР-2.5.

По каждой степени свободы алгоритмы управления имеют одновходовую структуру. Их синтез выполняется по отдельным

моделям, что оказывается возможным благодаря слабой параметрической и структурной чувствительности алгоритмов. При достаточном уровне усиления каналы управления оказываются независимыми.

В обоих случаях коэффициент жесткости механизмов передачи движения принят равным $3 \cdot 10^4$ Н·м·рад⁻¹, что на порядок меньше значений жесткости применяемых на практике конструктивных материалов.

При таких неблагоприятных условиях алгоритмы обеспечивают высокую точность слежения за траекториями сложной формы.

В п.3.4 приведены основные выводы по главе 3.

В четвертой главе решены прикладные задачи управления движением существенно нелинейных систем.

В п.4.1 приведена принципиально новая методика проектирования систем, субоптимальных по быстродействию.

Идея предлагаемой методики синтеза алгоритма субоптимального быстродействия основана на декомпозиции исходной задачи на две:

- для упрощенной модели объекта формируется оптимальная траектория движения;
- для полной модели синтезируется алгоритм управления, обеспечивающий слежение за оптимальной траекторией.

Эффективность алгоритмов управления, субоптимальных по быстродействию, исследована применительно к двум задачам: торможение двухмассовой упругой системы и управление положением этой системы с последующим гашением упругих колебаний. Передаточная функция управляемого объекта имеет четвертый порядок, управляющая функция ограничена постоянной величиной.

Развитая методика синтеза субоптимальных по быстродействию алгоритмов позволяет строить замкнутые контуры управления, эффективно работающие при произвольном начальном состоянии объекта и при изменении его параметров.

Отметим, что применение классических алгоритмов управления оптимального быстродействия для решения рассмотренной задачи

требует построения поверхностей переключения управляющей функции в многомерном пространстве состояний. Аппаретная реализация таких алгоритмов сопряжена с большими техническими трудностями.

В п.4.2 исследована эффективность алгоритмов предлагаемой структуры применительно к задаче управления двохвостым электрогидравлическим рулевым приводом типа РА-62.

Динамика привода описывается тремя группами существенно нелинейных уравнений: уравнения электрогидравлического усилителя; расходов жидкости и динамики нагрузки.

Основываясь на том, что алгоритмы управления по старшим производным придают системам свойства слабой параметрической и структурной чувствительности, синтезировать такие алгоритмы можно по аппроксимирующим передаточным функциям. Для рассматриваемой системы такая передаточная функция имеет четвертый порядок.

По заданию на проектирование к динамике системы предъявляются специфические требования. Жесткие ограничения накладываются на фазовые сдвиги и на величину запасов устойчивости. Кроме того, алгоритм управления должен обеспечивать высокую точность отработки микроперемещений выходного вала.

Показано, что этим требованиям соответствует эталонная модель, описываемая дифференциальным уравнением третьего порядка. По методике, приведенной в главе 1, синтезирован аналоговый алгоритм управления, а на его основе получены уравнения цифрового алгоритма. Исследования динамики выполнялись с учетом квантования сигналов по уровню в датчике положения и цифро-аналоговом преобразователе.

Синтезированная система с цифровым алгоритмом имеет частотную характеристику, которая соответствует требованиям задания на проектирование и не зависит от амплитуды входного воздействия.

Задача управления двохвостым ЭГП с учетом специфических требований не решается с помощью линейных корректирующих цепей

традиционной структуры. Она была решена на основе применения нелинейных корректирующих цепей. Однако, аппаратная реализация подобной системы управления требует измерения четырех переменных: положения, перепадов давлений в двух камерах и перемещения золотника.

Исследования показали, что применение алгоритмов предлагаемой структуры обеспечивает выполнение специфических требований при измерении только координаты положения выходного вала привода.

В п.4.3 показано, что развитая методика синтеза алгоритмов управления по старшим производным в сочетании с применением моделей эталонных процессов позволяет синтезировать эффективные структуры автоматических систем, обеспечивающих управление при ограничениях на управляющие функции и фазовые координаты.

Для сравнения приведен краткий анализ решения рассмотренной задачи методами теории оптимального управления и показано, что в классе линейных структур алгоритмы управления по старшим производным являются безусловно предпочтительными.

В п.4.4 излагаются краткие выводы по главе 4.

В заключении приведены основные выводы по диссертационной работе.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

I. Развита теоретические основы синтеза алгоритмов автоматического управления, реализующих в системах высокую динамическую точность и слабую чувствительность к параметрическим и координатным возмущениям. Определена общая структура алгоритмов на основе изменения эталонных моделей в сочетании с концепциями обратных задач динамики и идей управления по старшим производным. Предложены схемы аппаратной и программной реализации алгоритмов управления, исключающие необходимость измерения старших производных управляемых координат. При этом в алгоритмах управления и информационного

обеспечения не выполняются операции дифференцирования.

2. На основе применения алгоритмов управления предлагаемой структуры решена задача гашения автоколебаний в системах с однозначными и неоднозначными нелинейными элементами, включая типовые.

Получены необходимые и достаточные условия гашения автоколебаний.

3. Решена задача синтеза алгоритмов управления движением в скользящих режимах. Установлено, что линейей переключения управляющей функции является фазовая траектория эталонной модели. Найдены условия возникновения скользящих режимов и определена область начальных состояний, движение из которой проходит строго по назначенной траектории.

Этот результат позволяет избежать серьезные трудности математического характера, которые присущи известным методам построения гиперповерхностей переключения.

4. Исследованы задачи управления движением систем при ограничениях величин управляющих функций и фазовых координат. Разработана методика синтеза субоптимального по быстродействию управления. Она значительно упрощает процедуру синтеза алгоритмов, исключая известные трудности, присущие классическим методам оптимального управления. Кроме того, методика приводит к субоптимальным алгоритмам, которые имеют существенно более простую структуру по сравнению с известными оптимальными.

5. С помощью разработанных методик синтеза алгоритмов решены прикладные задачи управления движением различных по назначению и динамическим характеристикам объектов. В результате исследования динамики указанных систем установлена высокая эффективность алгоритмов управления предлагаемой структуры.

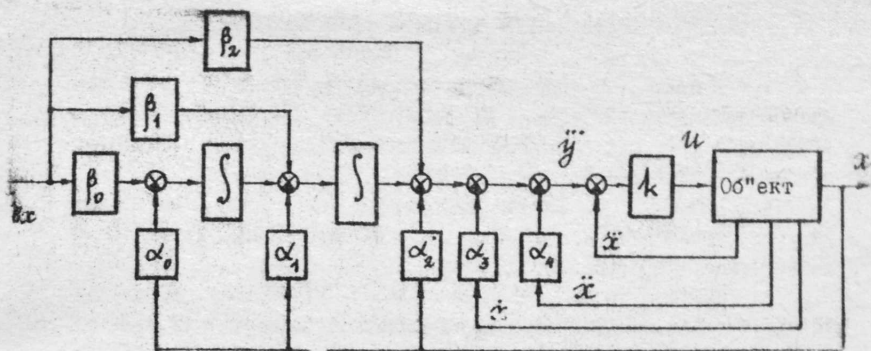


Рис.1. Структурная схема замкнутой системы

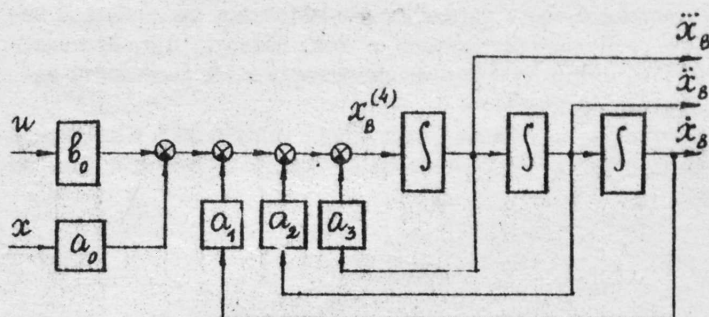


Рис.2. Структурная схема алгоритма информационного обеспечения

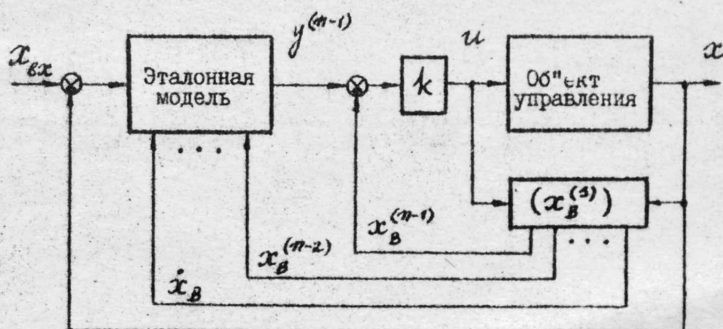


Рис.3. Структурная схема замкнутой системы общего вида.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Чхеидзе Г.А. Методика синтеза алгоритмов управления манипуляционными системами по ускорениям // Моделирование и управление в гибких автоматизированных производствах и системах автоматического управления. М.: МИРЭА, 1990.-С.48-55.
2. Чхеидзе Г.А. Синтез алгоритмов управления движением упругих механических систем // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика.-1991.-№1.-С.209-212.
3. Крутько П.Д., Чхеидзе Г.А. Алгоритмы управления автоматических систем высокой динамической точности // Изв. АН СССР. Техническая кибернетика.-1991.-№4.-С.13-34.
4. Крутько П.Д., Чхеидзе Г.А. Синтез алгоритмов управления следящих систем высокой динамической точности // Изв. Российской академии наук. Техническая кибернетика. -1992.-№2.-С.3-19.
5. Автоматическое регулирование натяжения при силовой намотке композиционных материалов / В.В. Назаров, П.Д. Крутько, Г.А. Чхеидзе и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин.-1992.-№2.-С.92-99.
6. Чхеидзе Г.А. Новые алгоритмы управления движением в скользящих режимах. // Вестник МГТУ. Приборостроение.-1992.- №4. С.55-62.

Зак 206 Псг. к нпг. 26.03.93.

Объем I п.л. Тираж 100 экз. Ротапринт МГТУ