

На правах рукописи

Новокшенов Сергей Владимирович

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ ИНТЕРВАЛЬНЫХ СИСТЕМ
С ГАРАНТИРУЕМОЙ ДИНАМИКОЙ НА ОСНОВЕ
РОБАСТНЫХ И АДАПТИВНЫХ АЛГОРИТМОВ**

05.13.01 – Системный анализ, управление и обработка информации
(по отраслям: информация и информационные системы,
энергетика, экономика)

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

Томск – 2003

Работа выполнена в Томском политехническом университете

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор **Г.П. Цапко**

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор **В.И. Гончаров**

кандидат технических наук **В.И. Катков**

Ведущая организация:

Новосибирский государственный технический университет,
г. Новосибирск

Защита состоится «3» декабря 2003 г. в ____ часов
на заседании диссертационного совета Д 212.269.06 при Томском политехническом университете по адресу: 634034, г. Томск, ул. Советская, 84, институт «Кибернетический центр» ТПУ, ауд. 214.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Томского политехнического университета по адресу: 634034, г. Томск, ул. Белинского, 53.

Автореферат разослан «31» октября 2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного Совета
к. т. н., доцент



М. А. Сонькин

Общая характеристика работы

Актуальность работы. Одним из направлений современной теории автоматического управления является исследование систем с интервально-неопределенными параметрами. Интервальная неопределенность может быть обусловлена неточным знанием значений постоянных параметров или изменением нестабильных параметров по заранее неизвестным законам в определенных пределах. Исследованию подобных систем (названных интервальными), посвящено большое число публикаций отечественных и зарубежных ученых. Значительная часть их работ основана на детерминированном подходе к интервальной неопределенности параметров и использует при этом робастные и адаптивные методы.

При решении задач анализа и синтеза робастных систем в настоящее время основное внимание уделяется не столько робастной устойчивости, сколько обеспечению в интервальных системах (ИС) гарантируемой динамики. При этом актуальным является анализ робастной региональной устойчивости, соответствующей определенному робастному качеству управления, а также синтез робастного регулятора пониженного порядка, гарантирующего допустимые значения показателей качества интервальной системы.

Однако широко используемый робастный подход, реализуемый с помощью линейного жесткого регулятора, не всегда позволяет обеспечить желаемую динамику в интервальной системе. Причиной этому может быть наличие в системе упругих связей, наделяющих ее резонансными свойствами в области низких и средних частот. В таких случаях актуальна разработка адаптивных алгоритмов управления, способных демпфировать колебания от частотно-нестабильных резонансов без сужения полосы пропускания, а, следовательно, без ухудшения быстродействия системы.

Для получения желаемой динамики в ИС с широкими пределами изменения параметров актуальна задача комбинирования робастного и адаптивного управления. Такой способ управления, сочетающий достоинства робастного и адаптивного подходов, основан на анализе динамической ситуации в системе и переключении с одного типа управления на другой.

Специфика рассматриваемых систем обуславливает необходимость проведения теоретических исследований по разработке методик анализа и синтеза интервальных систем с робастными и адаптивными регуляторами, доведению отдельных их этапов до рабочих алгоритмов и программ для ЭВМ. Практическую значимость имеют разработки специальных технических средств, включаемых в контур регулирования и обеспечивающих желаемое качество функционирования интервальных систем.

Таким образом, **целью работы** является разработка методик анализа и синтеза интервальных систем с применением робастного и адаптивного подходов на основе решения следующих задач:

1) реберная маршрутизация параметрического многогранника системы для определения границ областей локализации корней характеристического полинома;

2) анализ робастного качества линейной ИС на основе отображения реберного маршрута на корневую плоскость;

3) параметрический синтез линейных регуляторов на основе робастного и адаптивного алгоритмов, обеспечивающих гарантируемую динамику в ИС на основе доминантного расположения полюсов ИС;

4) структурно-параметрический синтез псевдолинейных компенсаторов упругих частотно-нестабильных колебаний ИС на основе робастного и адаптивного алгоритмов.

Методы исследования. При решении поставленных задач использовались как теоретические, так и экспериментальные методы исследования. Теоретические исследования проводились с применением методов теории робастного и адаптивного управления. Экспериментальные исследования синтезируемых систем проводились путем программного моделирования на ЭВМ в пакете MathCad.

Научную новизну работы определяют:

- алгоритм реберной маршрутизации параметрического многогранника системы на основе свойств корневого годографа, позволяющей определить образы границ областей локализации корней интервального характеристического полинома;

- методика анализа региональной робастной устойчивости интервальных систем на основе реберной маршрутизации с применением методов корневого годографа, D-разбиения, уравнения Теодорчика-Эванса;

- методика синтеза адаптивного и робастного линейных регуляторов для региональной локализации и стабилизации доминирующих полюсов ИС;

- способ компенсации частотно-нестабильных резонансов в интервальных системах;

- структуры адаптивного и робастного псевдолинейных компенсаторов, демпфирующих упругие частотно-нестабильные колебания в интервальных системах.

Практическая ценность работы определяется:

- доведенными до уровня инженерного проектирования с использованием ЭВМ в интерактивном режиме методиками анализа и синтеза робастных и адаптивных линейных регуляторов, обеспечивающих гарантируемую динамику в интервальных системах;

- практической разработкой робастного и адаптивного псевдолинейных компенсаторов, техническая новизна и оригинальность которых подтверждена патентом на изобретение;

- возможностью использования результатов работы при решении соответствующих задач управления промышленными упругими электромеханическими системами (бумагоделательными машинами, подъемно-спускными меха-

низмами шахт и шлюзов, приводами манипуляторов и металлообрабатывающих станков, антенными установками), в объектах управления которых имеются нестабильные параметры.

Внедрение работы. Результаты исследований и разработок, описанных в диссертационной работе, использованы в учебном процессе кафедры автоматизации и компьютерных систем Томского политехнического университета.

Разработанные в диссертации методики, алгоритмы и корректирующие устройства использованы в проектной деятельности ОАО «Сибхимпроект» (г. Новосибирск), ЗАО «СибКОТЭС» (г. Новосибирск).

Практическое использование результатов диссертационных исследований подтверждается соответствующими актами о внедрении.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Русско-Корейской международной конференции KORUS'99 III. (Россия, г. Новосибирск, 1999г.), на международной конференции «Информационные системы и технологии» (г. Новосибирск, 2000г.), на VI международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2000), на VII международной научно-практической конференции «Современные техника и технологии» (г. Томск, 2001г.), на X международной научно-технической конференции «Состояние и перспективы развития электротехнологии» (г. Иваново, ИГЭУ, 2001г.), на VII Международной научно-технической конференции «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (г. Москва, МЭИ, 2001г.).

Публикации. По теме диссертационной работы опубликовано 10 работ, получен 1 патент на изобретение.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы, включающего 111 наименований, и приложений; содержит 131 печатную страницу основного текста, 43 рисунка и 1 таблицу.

Автор выражает глубокую признательность **научному консультанту** к.т.н., доценту **Гайворонскому С. А.** за помощь при проведении научных исследований по теме диссертационной работы.

Содержание работы

Во введении раскрыта актуальность задач анализа и синтеза интервальных систем, обладающих гарантированными показателями качества.

На основе обзора существующих методов исследования устойчивости ИС для решения задачи анализа региональной робастной устойчивости предложено использовать робастное расширение известного метода корневого годографа. Установлено, что для применения данного подхода достаточно отображения на комплексной плоскости корней только определенных ребер параметрического многогранника, образы которых являются границами области локализации полюсов ИС.

Исходя из возможных упругих свойств ИС произведена декомпозиция задачи синтеза ИС с гарантируемой динамикой на две задачи:

1) синтез линейного регулятора на основе принципа доминирования корней характеристического полинома ИС, если она является жесткой или упругой с интервалом неопределенности частоты резонанса в области высоких частот.

2) синтез компенсатора нестабильных резонансов, сохраняющего полосу пропускания ИС, если она является упругой системой с интервалом неопределенности частоты резонанса в области средних или низких частот.

Для решения данных задач предложено использовать робастный и адаптивный подходы.

На основе литературного обзора проведено уточнение указанных задач и выбраны методы их решения.

В первой главе получены алгоритмы определения набора существенных ребер (реберного маршрута) для параметрического многогранника (ПМ) ИС по имеющейся информации о структуре характеристического полинома ИС и интервалах неопределенности ее параметров. Установлено что, образы этих ребер отображаются на границы областей локализации комплексных корней интервального характеристического полинома. Для этого поэтапно были решены следующие задачи.

Установлены основные свойства отображения ПМ на комплексную плоскость корней, при котором образами ребер ПМ являются реберные ветви, а образами вершин ПМ – корневые узлы. Сделан вывод о том, что реберные ветви могут входить в состав границы области локализации корня как полностью, так и частично, причем в последнем случае они пересекаются в особых корневых узлах U^* . Данное свойство необходимо учитывать при граничной маршрутизации ПМ, в связи с чем, представляется целесообразным заранее знать о возможности наличия U^* в областях локализации полюсов ИС. Для этого разработаны методики проверки плоскостей граней ПМ на наличие особых прямых для интервальной и аффинной неопределенности. Наличие таких прямых указывает на возможность существования U^* при построении границ областей локализации корней.

Установлено, что для нахождения реберного маршрута необходимо определить углы выхода всех реберных ветвей интервального корневого годографа из любого граничного корневого узла.

Если в области отображения ПМ нет U^* , то последовательность реберных ветвей, ограничивающих область локализации комплексного корня, будет соответствовать последовательности их углов выхода (в порядке убывания или возрастания) из граничного корневого узла. В этом случае реберный маршрут определяется последовательным соединением соответствующих ребер ПМ.

Если в области отображения какой либо грани ПМ возможно наличие U^* , то при движении по реберному маршруту необходимо полностью отображать все ребра этой грани. В этом случае реберный маршрут определяется последовательно-параллельным соединением соответствующих ребер ПМ.

Разработаны методики определения реберного маршрута ПМ в случаях аффинной и интервальной неопределенностей для левой полуплоскости корней.

Доказано, что реберный маршрут является единственным для построения областей локализации всех корней интервальной системы.

Сделан вывод о том, что по сравнению с реберной теоремой, требующей отображения всех ребер ПМ, полученные алгоритмы нахождения реберных маршрутов позволяют значительно упростить задачу анализа и синтеза робастных систем.

Приведены примеры, иллюстрирующие нахождение реберного маршрута для параметрических многогранников интервальных систем. На рис. 1 представлен реберный маршрут и его отображение на комплексную плоскость корней для системы с тремя интервальными параметрами.

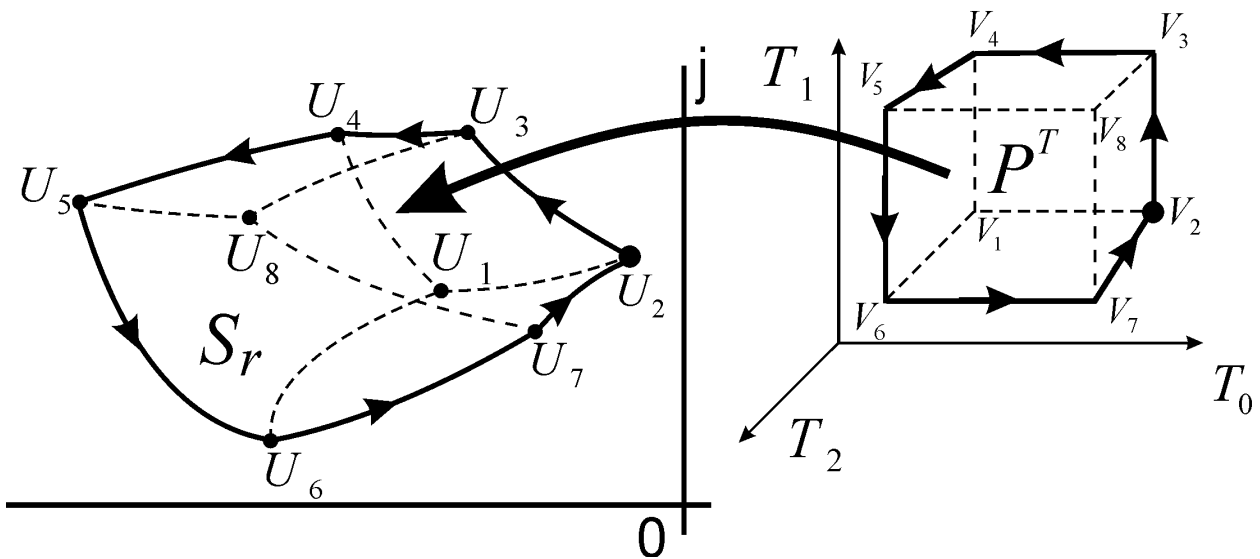


Рис.1. Отображение параметрического многогранника интервальной системы на комплексную плоскость корней

Во второй главе решаются задачи анализа региональной робастной устойчивости (робастного качества) интервальных систем с использованием алгоритмов реберной маршрутизации.

Пусть граница желаемого расположения полюсов ИС на комплексной плоскости корней, задающая гарантируемую динамику ИС, описывается в следующем виде

$$X(j\omega) = -\delta(\omega) + j\omega, -\infty < \omega < \infty \quad (1)$$

Для решения поставленной задачи разработаны три методики, основанные на различных способах проверки региональной робастной устойчивости ИС на ее реберном маршруте.

Первая методика – методика анализа робастной региональной устойчивости ИС путем построения по реберному маршруту многопараметрического интервального корневого годографа. Ее применение позволяет оценить гарантируемые корневые показатели качества ИС.

Вторая методика – методика анализа робастной региональной устойчивости ИС с использованием метода робастного D-разбиения по реберному маршруту. Характеристическое уравнение для построения D-разбиения по одному и двум ребрам соответственно имеют вид:

$$T_i \cdot A_i(s) + \sum_k T_k^q \cdot A_k(s) + B(s) = 0, \quad s = -\delta(\omega) + j\omega.$$

$$T_i \cdot A_i(s) + T_j \cdot A_j(s) + \sum_k T_k^q \cdot A_k(s) + B(s) = 0, \quad s = -\delta(\omega) + j\omega$$

где T_i, T_j - интервальные параметры, T_k^q - координаты вершины ПМ.

Согласно данной методике, ИС является робастно устойчивой в заданной области комплексной плоскости корней, если интервалы изменения параметров принадлежат соответствующим областям D-разбиения.

Предложенный подход не требует непосредственного вычисления корней ИС и поэтому менее трудоемок для проектировщика. С этих позиций предпочтение следует отдавать D-разбиению по одному параметру (реберному D-разбиению).

Третья методика – методика анализа робастной региональной устойчивости ИС на основе реберной маршрутизации ПМ с использованием уравнения Теодорчика-Эванса.

Пусть характеристический полином ИС записывается в виде

$$D(s) = \Phi(s) + T_i \Psi(s), \quad (2)$$

где T_i – интервальный параметр, $\Phi(s) = E(s) + jF(s)$, $\Psi(s) = P(s) + jR(s)$.

Для того, чтобы установить допустимые пределы вариации параметра T_i , при которых корни полинома (2) лежат левее границы (1), предлагается найти точки пересечения реберных ветвей корневого годографа по параметру T_i с границей (1). То есть при заданном значении $\delta(\omega)$ решить уравнение корневого годографа Теодорчика-Эванса

$$F(\omega) \cdot P(\omega) - E(\omega) \cdot R(\omega) = 0,$$

и полученные действительные корни ω_k подставить в выражение

$$T_i = \frac{E(\omega_k) \cdot P(\omega_k) - F(\omega_k) \cdot R(\omega_k)}{P^2(\omega_k) + R^2(\omega_k)}; k = \overline{1, r}.$$

Минимальное и максимальное значения T_i определяют допустимые пределы его изменения, при которых система сохраняет заданную устойчивость.

Достоинство данной методики заключается в том, что она при анализе региональной робастной устойчивости полностью исключает графические построения. Решение уравнений Теодорчика-Эванса для всех граничных ребер позволяет наиболее точно определить интервалы параметров исследуемой ИС, гарантирующие заданную региональную робастную устойчивость.

Приведенные примеры наглядно иллюстрируют работоспособность и эффективность разработанных методик анализа региональной робастной устойчивости ИС.

В третьей главе разрабатываются методики синтеза робастных и адаптивных интервальных систем с гарантируемой динамикой. Они основаны на применении робастного и адаптивного подходов к доминантному расположению полюсов ИС.

Для этого вначале разработана методика доминантного расположения полюсов стационарной системы с использованием метода D-разбиения. Методика позволяет определять параметры регулятора, обеспечивающие желаемые значения доминирующих полюсов λ_i и расположение остальных полюсов в заданной области комплексной плоскости. Предложенная процедура основана на разделении параметров линейного регулятора на свободные \mathbf{g}_1 и зависимые \mathbf{g}_2 и их последовательном нахождении с использованием метода D-разбиения.

Для случая двух свободных параметров регулятора характеристическое уравнение системы имеет вид

$$\sum_{i=1}^2 k_i \cdot A_i(p) + \sum_{i=3}^r k_i \cdot A_i(p) + B(p) = 0, \quad (3)$$

где k_1, k_2 – свободные параметра регулятора, $k_3 \dots k_r$ – зависимые параметры регулятора.

Если в уравнение (3) сначала подставить $p = \lambda$, а потом сделать подстановку $p = -\delta(\omega) + j\omega$ и преобразовать полученные уравнения в матричную форму, то получим систему матричных уравнений

$$\begin{cases} \mathbf{Q}_{11}(\lambda) \mathbf{g}_1 + \mathbf{Q}_{12}(\lambda) \mathbf{g}_2 = \mathbf{R}_1(\lambda); \\ \mathbf{Q}_{21}(\omega) \mathbf{g}_1 + \mathbf{Q}_{22}(\omega) \mathbf{g}_2 = \mathbf{R}_2(\omega). \end{cases} \quad (4)$$

При этом векторы $\mathbf{g}_1, \mathbf{g}_2, \mathbf{R}_1(\lambda), \mathbf{R}_2(\lambda)$ и матрицы $\mathbf{Q}_{11}(\lambda), \mathbf{Q}_{12}(\lambda), \mathbf{Q}_{21}(\lambda), \mathbf{Q}_{22}(\lambda)$ будут иметь вид

$$\begin{aligned} \mathbf{g}_1 &= \begin{bmatrix} k_1 \\ k_2 \end{bmatrix}; & \mathbf{g}_2 &= \begin{bmatrix} k_3 \\ \vdots \\ k_r \end{bmatrix}; & \mathbf{R}_1(\lambda) &= \begin{bmatrix} -B(\lambda_1) \\ \dots \\ -B(\lambda_l) \end{bmatrix}; & \mathbf{R}_2(\omega) &= \begin{bmatrix} -\operatorname{Re} B(\omega) \\ -\operatorname{Im} B(\omega) \end{bmatrix}; \\ \mathbf{Q}_{11}(\lambda) &= \begin{bmatrix} A_1(\lambda_1) & A_2(\lambda_1) \\ \dots & \dots \\ A_1(\lambda_l) & A_2(\lambda_l) \end{bmatrix}; & \mathbf{Q}_{12}(\lambda) &= \begin{bmatrix} A_3(\lambda_1) & \dots & A_r(\lambda_1) \\ \dots & \dots & \dots \\ A_3(\lambda_l) & \dots & A_r(\lambda_l) \end{bmatrix}; \\ \mathbf{Q}_{21}(\omega) &= \begin{bmatrix} \operatorname{Re} A_1(\omega) & \operatorname{Re} A_2(\omega) \\ \operatorname{Im} A_1(\omega) & \operatorname{Im} A_2(\omega) \end{bmatrix}; & \mathbf{Q}_{22}(\omega) &= \begin{bmatrix} \operatorname{Re} A_3(\omega) & \dots & \operatorname{Re} A_r(\omega) \\ \operatorname{Im} A_3(\omega) & \dots & \operatorname{Im} A_r(\omega) \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

Из первого уравнения системы (4) выразим вектор \mathbf{g}_2 зависимых параметров регулятора:

$$\mathbf{g}_2 = \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{R}_1(\lambda) - \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{Q}_{11}(\lambda) \cdot \mathbf{g}_1. \quad (5)$$

Уравнение границы D-разбиения найдем из второго уравнения системы (4) с учетом (5):

$$\mathbf{g}_1 = \left[\mathbf{Q}_{21}(\omega) - \mathbf{Q}_{22}(\omega) \cdot \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{Q}_{11}(\lambda) \right]^{-1} \times \\ \times \left[\mathbf{R}_2(\omega) - \mathbf{Q}_{22}(\omega) \cdot \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{R}_1(\lambda) \right]$$

Выбирая в найденной области D-разбиения значения свободных параметров \mathbf{g}_1 , подставляем их в (5) и находим значения зависимых параметров \mathbf{g}_2 . Таким образом, найденные значения параметров линейного регулятора обеспечивают расположение доминирующих полюсов в заданных точках и локализацию свободных в заданных областях комплексной плоскости корней.

На основе доминантного расположения полюсов стационарной системы разработана методика синтеза робастного регулятора для желаемой локализации полюсов интервальной системы. Данный регулятор способен обеспечивать в системе заданную минимально допустимую степень устойчивости, определяющую такую динамическую характеристику ИС, как быстродействие.

Для решения этой задачи предложено комбинировать процедуру доминантного расположения полюсов стационарной системы с робастным подходом, используя свойство степени устойчивости линейной системы принимать минимальные значения в вершинах ее параметрического многогранника.

Методика содержит следующие этапы.

1. Приведение характеристического полинома системы к виду

$$k_1 \cdot A_1(p) + \sum_{i=2}^r k_i \cdot A_i(p) + B(T, p) = 0,$$

где T – вектор интервальных параметров.

2. Определение координат вершин параметрического многогранника P_T .

3. Задание числа l и значений λ_i , $i = 1, \dots, l$ доминирующих полюсов системы, числа $c = n - l$ свободных параметров регулятора и уравнения (1) границы области расположения свободных полюсов.

4. Формирование матриц $\mathbf{Q}_{11}(\lambda)$, $\mathbf{Q}_{12}(\lambda)$, $\mathbf{Q}_{21}(\omega)$, $\mathbf{Q}_{22}(\omega)$ и векторов $\mathbf{R}_1(T, \lambda)$, $\mathbf{R}_2(T, \omega)$.

5. Построение на основании выражения

$$k_1(T, \omega) = \frac{\mathbf{R}_2(T, \omega) - \mathbf{Q}_{22}(\omega) \cdot \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{R}_1(T, \lambda)}{\mathbf{Q}_{21}(\omega) - \mathbf{Q}_{22}(\omega) \cdot \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{Q}_{11}(\lambda)} = \alpha(T, \omega) + j\beta(T, \omega)$$

в пространстве свободных параметров границ D-разбиения для каждой вершины P_T и ее штриховка в соответствии с общими правилами. Назначение свобод-

ных параметров регулятора из области, соответствующей пересечению найденных выше областей.

6. Расчет зависимых параметров регулятора при помощи выражения

$$\mathbf{g}_2 = \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{R}_1(T, \lambda) - \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{Q}_{11}(\lambda) \cdot k_1, \quad (6)$$

при этом значения T_i должны принадлежать какой либо из вершин P_T .

7. Построение областей локализации корней при найденных настройках регулятора на основе реберного маршрута.

8. Если области локализации полюсов ИС выходят за установленные границы, то необходимо снова рассчитать \mathbf{g}_2 для других вершинных значений T_i .

В качестве примера на рис.2 приведены области локализации полюсов ИС с тремя интервальными параметрами и робастным ПИД-регулятором, синтезированным предложенным методом.

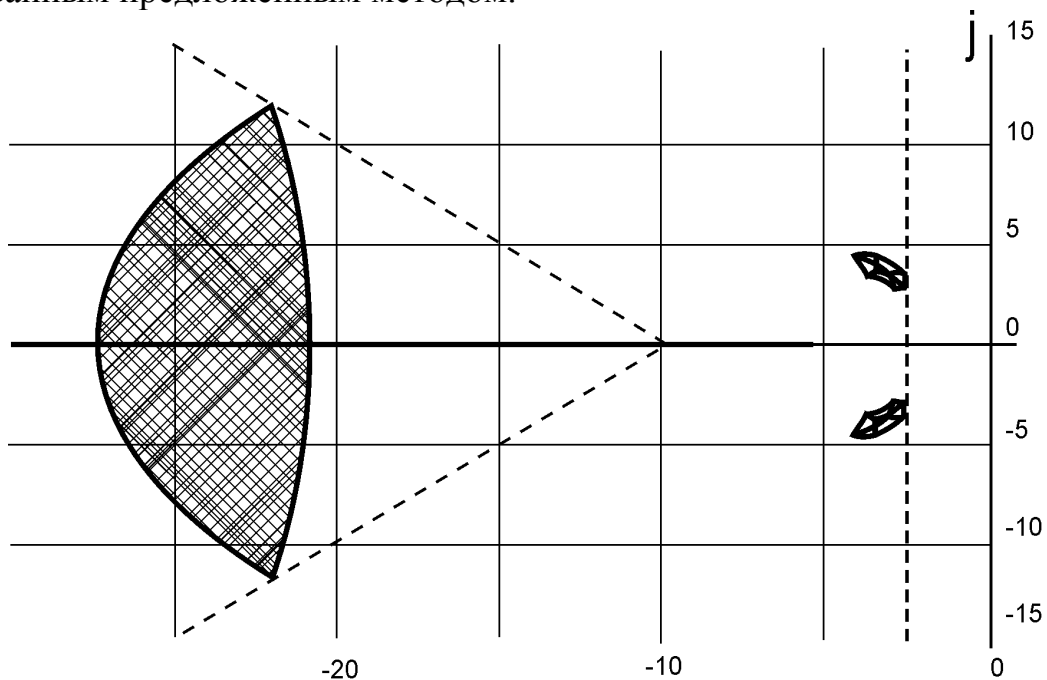


Рис.2. Области локализации полюсов ИС с робастным ПИД-регулятором

Для стабилизации доминирующих полюсов ИС разработана методика синтеза адаптивно-робастного регулятора. Такой регулятор способен устранить влияние недоминантных полюсов (локализовать свободные полюсы левее заданной границы (1)) на качество регулирования, а доминантные полюса стабилизировать в заданных точках комплексной плоскости для обеспечения желаемых динамических свойств системы вне зависимости от значений интервально-неопределенных параметров.

Для синтеза адаптивно-робастного регулятора предложено при выбранных свободных параметрах регулятора организовать самонастройку зависимых параметров в соответствии со значениями интервальных параметров. Таким образом, выражение (6) примет вид

$$\mathbf{g}_2(T) = \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{R}_1(T, \lambda) - \mathbf{Q}_{12}^{-1}(\lambda) \cdot \mathbf{Q}_{11}(\lambda) \cdot k_1,$$

В четвертой главе показано, что широко используемый робастный подход, реализуемый с помощью линейного жесткого регулятора, не всегда позволяет обеспечить желаемую динамику в интервальной системе. Причиной этому может быть наличие упругих связей, наделяющих систему резонансными свойствами.

На основе анализа динамических свойств нестационарных слабодемпфированных систем с широким диапазоном изменения резонансной частоты (выходящим за полосу пропускания) показана целесообразность декомпозиции общей задачи коррекции системы на следующие две задачи:

- точная (частотнонепрерывная) компенсация амплитудного всплеска в полосе пропускания системы (на низких и средних частотах);
- загробление системы в частотном диапазоне правее полосы пропускания (высокие частоты).

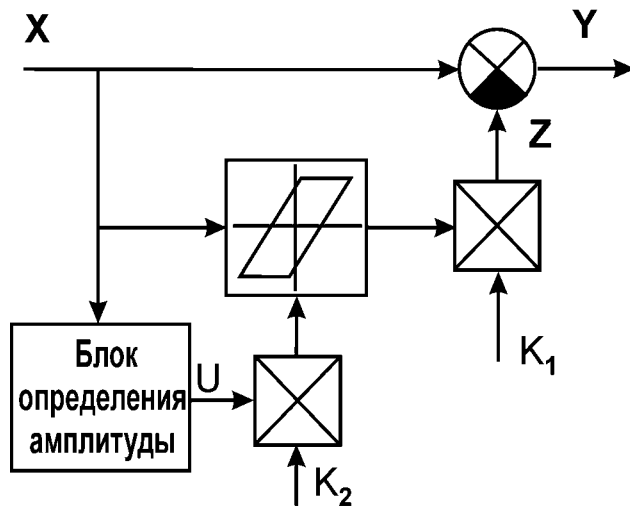


Рис.3. Структурная схема псевдолинейного компенсатора

Для решения первой задачи разработан способ адаптивной антирезонансной коррекции неустойчивых частотных характеристик объекта управления на основе свойств управляемого упора. В основе предложенного способа лежит компенсация фазового запаздывания с одновременным демпфированием резонансного пика амплитудной частотной характеристики системы.

На основе данного способа антирезонансной коррекции с самонастройкой на изменяющуюся резонансную частоту разработана структура псевдолинейного компенсатора (см.рис.3), частотные характеристики которого не зависят от амплитуды входного сигнала.

Это подтверждают полученные выражения коэффициентов гармонической линеаризации «люфта»

$$q_1(\omega) = \frac{k_1(\omega)}{\pi} \left(\frac{\pi}{2} + \arcsin(1 - 2k_2(\omega)) + \frac{\sin(2 \arcsin(1 - 2k_2(\omega)))}{2} \right),$$

$$q_2(\omega) = -\frac{k_1(\omega)}{\pi} \cos^2(\arcsin(1 - 2k_2(\omega))).$$

При этом АЧХ и ФЧХ компенсатора имеет вид:

$$a_y(\omega) = \sqrt{(1 - q_1(\omega))^2 + q_2(\omega)^2};$$

$$\varphi_y(\omega) = \arctg \frac{q_2(\omega)}{q_1(\omega) - 1}.$$

Для расчета настроек k_1 и k_2 адаптивного псевдолинейного компенсатора получены выражения, зависящие от фазового рассогласования φ_0 между входным и выходным сигналами объекта управления (ОУ):

$$k_1(\varphi_0) = 2 - \cos^k\left(\frac{\varphi_0}{2}\right); \quad k_2(\varphi_0) = 1 - \sin^k\left(\frac{\varphi_0}{2}\right).$$

Выбор настройки k компенсатора определяется формой резонансных пиков.

Показано, что амплитудная и фазовая характеристики компенсатора являются инверсными по отношению соответственно к амплитудному пику и фазовому сдвигу в системе в области резонанса. В результате такой компенсации система имеет скорректированные характеристики на которых практически не отражается влияние резонанса. Структурная схема системы с псевдолинейным адаптивным компенсатором показана на рис.4.

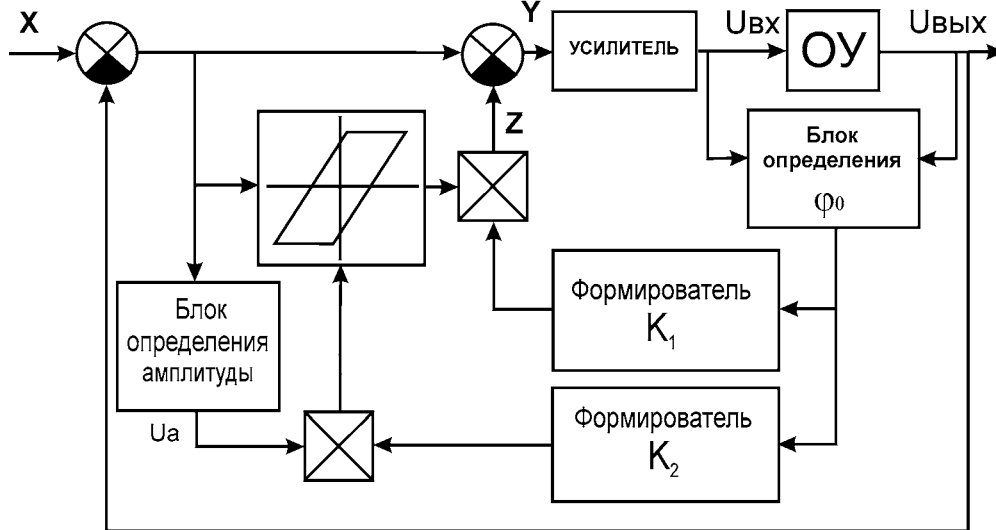


Рис.4. Структурная схема системы с псевдолинейным адаптивным компенсатором

Для решения второй задачи, поставленной в этой главе, получена структура робастного псевдолинейного компенсатора на основе управляемого упора со свойствами фильтра низких частот. Для этого в канале управления шириной люфта предлагается использовать линейный фильтр низких частот $W_\phi(s)$, стоящий перед блоком измерения амплитуды. При таком амплитудно-частотном управлении шириной люфта справедливо соотношение $A(\omega) \approx |W_\phi(j\omega)|$, где $A(\omega)$ - амплитудно-частотная характеристика компенсатора. Таким образом, синтез робастного компенсатора сводится к выбору передаточной функции $W_\phi(s)$. Пусть она имеет вид

$$W_\phi(s) = \frac{1}{(T_\phi s + 1)^m}.$$

В этом случае робастный компенсатор содержит две настройки: T_ϕ и m . Постоянная времени T_ϕ фильтра $W_\phi(s)$ задает левую границу частотной области робастной коррекции и определяется выражением $T_\phi = \frac{1}{\omega_{zp}}$, где ω_{zp} - граничная частота полосы пропускания системы. Показатель степени m задает крутизну ЛАЧХ компенсатора в области робастного демпфирования. Он определяется величиной амплитудных пиков нестабильных тонов упругих колебаний системы.

Для ИС, в которых резонансы имеют место в широком диапазоне, покрывающем области средних и высоких частот, предложен способ комбинирования адаптивной и робастной антирезонансной коррекции. Реализующая его структурная схема показана на рис.5.

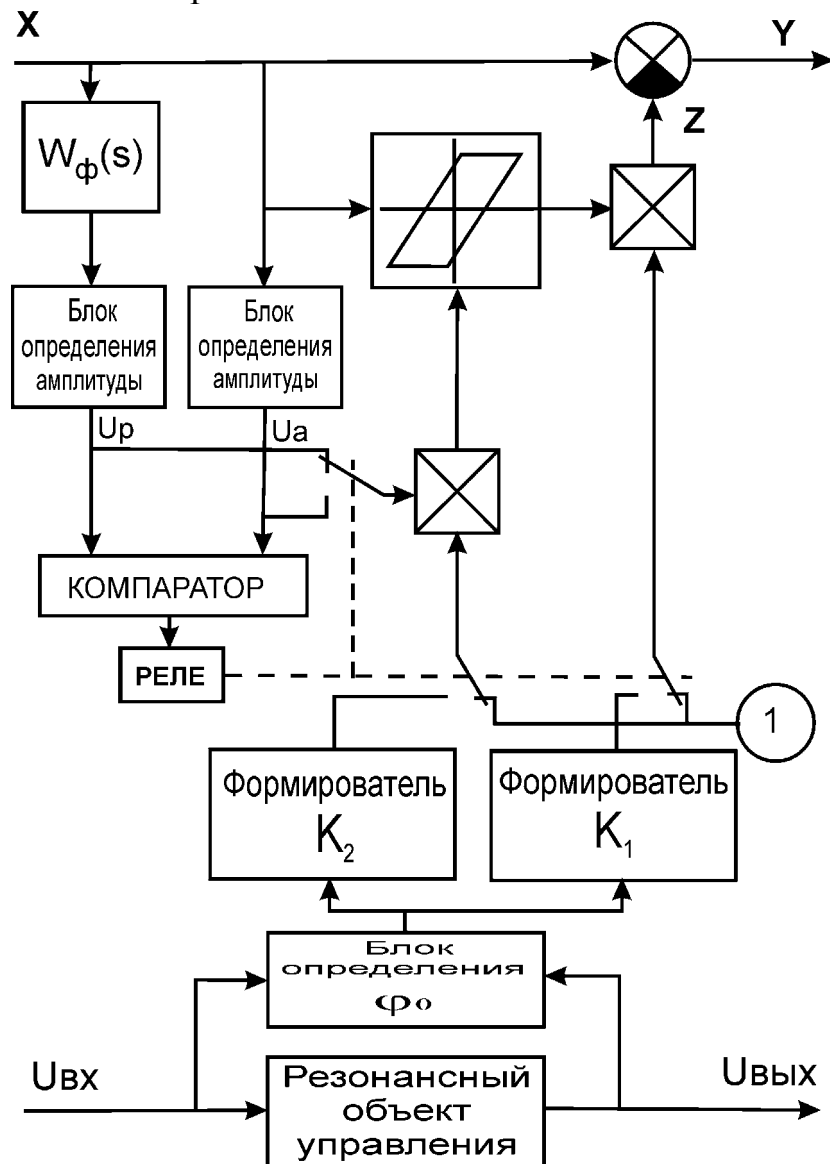


Рис.5. Структурная схема системы с комбинированной антирезонансной коррекцией

Переключение с адаптивной коррекции на робастную и наоборот осуществляется анализатором динамической ситуации, который содержит компаратор и блок ключей. Частота, на которой срабатывает компаратор, определяется частотой сопряжения линейного фильтра $W_\phi(s)$.

В пятой главе рассмотрены вопросы практической реализации методов определения реберного маршрута интервальной системы, необходимые для ее анализа и синтеза, а также практической реализации адаптивной следящей системы с использованием алгоритма частотнонезависимой антирезонансной коррекции.

Разработанные алгоритмы и приведенные программы определения реберного маршрута на ЭВМ в диалоговом (интерактивном) режиме в значительной мере помогут проектировщику при анализе и синтезе робастных систем. При этом будет обеспечиваться высокая точность анализа робастной региональной устойчивости интервальной системы, а также простота синтеза робастных регуляторов.

Для реализации способа адаптивной антирезонансной коррекции предложены варианты схем основных устройств, входящих в состав адаптивного компенсатора и обеспечивающих его функционирование.

С целью проверки работоспособности разработанного адаптивного компенсатора и наглядной иллюстрации его применения проведено моделирование интервальной упругой системы с передаточной функцией

$$W_p(s) = \frac{100}{s(T^2 s^2 + 0.5Ts + 1)},$$

где T является интервальным параметром.

На рис.6 приведены исходные резонансные ЛАЧХ и ЛФЧХ разомкнутой интервальной упругой системы (кривые 1), частотные характеристики адаптивного компенсатора (кривые 2), и частотные характеристики скорректированной системы (кривые 3). Вид характеристик компенсатора подтверждает сделанный выше вывод о том, что его амплитудная и фазовая характеристики являются инверсными по отношению соответственно к амплитудному пику и фазовому сдвигу в системе в области резонанса.

В результате такой компенсации система имеет скорректированные характеристики (кривые 3), на которых практически не отражается влияние резонанса. Данный корректирующий эффект будет иметь место и при любой другой возможной резонансной частоте в системе. Поэтому применение адаптивного компенсатора резонансов позволяет максимально (до границы, определяемой только динамикой исполнительного привода) расширить полосу пропускания системы.

В заключении приведены основные результаты диссертационной работы.

В приложениях приведены тексты программ, реализующих на ЭВМ полученные методики и алгоритмы.

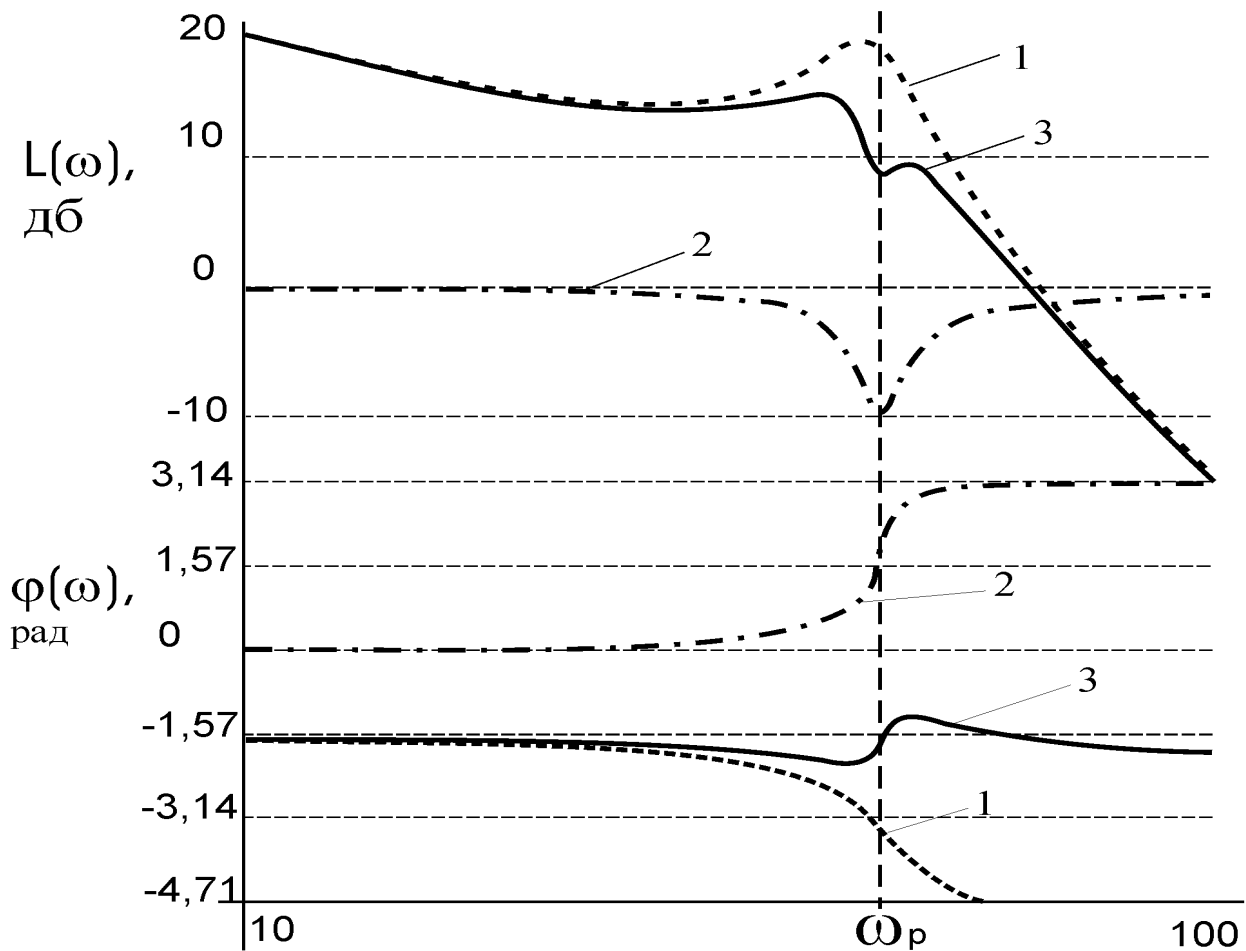


Рис.6. Частотные характеристики системы с адаптивным антирезонансным компенсатором

Основные результаты работы

В ходе выполнения диссертационной работы были получены следующие основные научные и практические результаты:

1. Разработаны алгоритмы реберной маршрутизации ПМ, позволяющие определить образы границ областей локализации полюсов ИС. Для этого решены следующие задачи:

- Установлены основные свойства отображения ребер ПМ на комплексную плоскость корней и сделан вывод о том, что для определения искомых границ нет необходимости отображать все ребра ПМ, а достаточно найти и отобразить только существенные граничные ребра.

- Разработаны методики проверки плоскостей граней ПМ на наличие особых прямых при интервальной и аффинной неопределенности системы. Наличие данных прямых указывает на возможность существования особых корневых узлов, в которых могут пересекаться граничные реберные ветви интервального корневого годографа.

- Получено условие принадлежности корневого узла границе области локализации комплексного корня.

- Разработаны методики определения реберного маршрута ПМ при аффинной и интервальной неопределенностях на основе значений углов выхода реберных ветвей из граничного корневого узла и информации о наличии особого корневого узла.

- Показано, что реберный маршрут ПМ является единственным для построения областей локализации всех комплексных полюсов ИС.

2. На основе реберной маршрутизации разработаны методики анализа робастной региональной устойчивости, гарантирующей допустимые показатели качества ИС. Предложены три методики, использующие различные способы оценки робастной региональной устойчивости на реберном маршруте:

- методика анализа региональной робастной устойчивости на основе построения многопараметрического интервального корневого годографа по реберному маршруту;

- методика анализа региональной робастной устойчивости на основе робастного D-разбиения по реберному маршруту;

- методика анализа региональной робастной устойчивости на основе решения уравнений Теодорчика-Эванса для всех ребер маршрута.

3. На основе применения робастного и адаптивного подходов к доминантному расположению полюсов ИС разработаны следующие методики синтеза линейных регуляторов, обеспечивающих в ИС гарантируемую динамику:

- методика синтеза линейного робастного регулятора для региональной локализации доминирующих полюсов ИС, гарантирующей минимально-допустимую степень устойчивости;

- методика синтеза адаптивно-робастного регулятора для стабилизации доминирующих полюсов в заданных точках комплексной плоскости.

4. На основе разработанного способа компенсации частотнонестабильных резонансов проведен структурно-параметрический синтез псевдолинейных компенсаторов для упругих ИС. При этом синтезированы:

- адаптивный псевдолинейный компенсатор для ИС с низкочастотными резонансами;

- робастный псевдолинейный компенсатор для ИС с высокочастотными резонансами;

- комбинированный адаптивно-робастный компенсатор.

5. Рассмотрены вопросы практической реализации разработанных алгоритмов.

- варианты практической реализации на ЭВМ методов определения реберного маршрута интервальной системы, необходимые для ее анализа и синтеза;

- практическая реализация адаптивной следящей системы с использованием алгоритма частотнонезависимой антирезонансной коррекции.

Основные публикации по теме диссертации

1. Melnikov U.S., Gaivoronsky S. A., Novokshonov S.V. Stabilization of undersea object situation, connected with ship by the rope (abstracts)// KORUS'99 III Russian-Korean international Symposium.-Novosibirsk, Russia,1999.
2. Melnikov U.S., Gaivoronsky S. A., Novokshonov S.V. Stabilization of undersea object situation, connected with ship by the rope (proceedings)// KORUS'99 III Russian-Korean international Symposium.-Novosibirsk, Russia,1999.
3. Вадутов О.С., Гайворонский С.А., Новокшенов С. В. Доминантное расположение полюсов системы с интервальными параметрами на основе робастного D-разбиения // Современные техника и технологии. Тез.докл. VI-международ.научн.-практич.конф.-Томск:изд.ТПУ, 2000
4. Вадутов О.С., Мельников Ю.С., Гайворонский С.А., Новокшенов С. В. Синтез динамических регуляторов интервальных автоматических систем стенда имитации невесомости // Информационные системы и технологии. Докл.международн.конф. Новосибирск, 2000.
5. Гайворонский С.А., Вадутов О.С., Новокшенов С. В. Анализ региональной робастной устойчивости системы методом интервального корневого годографа // Тез. докл. рег. науч. конфер. Наука, Техника, Инновации. Новосибирск: Издат. НГТУ, 2001
6. Гайворонский С.А., Новокшенов С. В. Анализ качества электроэнергетических систем с интервальными параметрами корневым методом // VII Межд. Научно-технич. конфер. Радиоэлектроника, электротехника и энергетика. Москва: Издательство МЭИ, 2001
7. Гайворонский С.А., Новокшенов С. В. Анализ робастной относительной устойчивости на основе многопараметрического интервального корневого годографа // Тез.докл. X международ. Научн.-технич. Конф. Состояние и перспективы развития электротехнологии. Иваново: Издат. ИГЭУ, 2001
8. Гайворонский С.А., Новокшенов С. В. Построение границ корневых областей систем с интервальными параметрами // Современные техника и технологии. Тез.докл. VII международ. научн.-практич. конф. -Томск: изд.ТПУ, 2001
9. Патент № 2174252 РФ, МКИ G 05 В 13/02. Способ адаптивной антирезонансной коррекции нестабильных частотных характеристик колебательного объекта управления и самонастраивающаяся следящая система для его осуществления / Вадутов О. С., Гайворонский С. А., Новокшенов С. В. // Б.И. № 27, 27.09.2001.
10. Гайворонский С. А, Новокшенов С. В. Комбинирование адаптивной и робастной псевдолинейной коррекции в нестационарных слабодемпфированных системах // Изв. вузов. Приборостроение. 2003. Т46, №10. С.18-24.