

На правах рукописи

Лю Шухуань

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ РОБАСТНОГО
МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

Специальность: 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2005

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет»

Научный руководитель:

кандидат технических наук ЧЕЧУРИН Леонид Сергеевич

Официальные оппоненты:

Доктор технических наук, профессор СПбГПУ

УСТИНОВ Сергей Михайлович

Кандидат технических наук, ст.преподаватель СПбГУАП

ПЕТРОВА Ксения Юрьевна

Ведущая организация: ФГУП «ОКБМ им. И.И. Африкантова» (Н. Новгород)

Защита состоится 09 июня 2005г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.229.10 Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Санкт-Петербургский государственный политехнический университет» по адресу: 195251, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29, корп. 9, факультет технической кибернетики, ауд. 535.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке ГОУ ВПО СПбГПУ.

Автореферат разослан 07 мая 2005г.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 212.229.10

Доктор технических наук, профессор

Малыхина Г.Ф.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Разработка и приложение теории синтеза робастных динамических систем в различных областях техники остается актуальной темой исследований в последние два десятилетия. Принципиальным достоинством робастного синтеза является надежность создаваемой системы, ее способность функционировать в условиях неизбежных внешних и внутренних неопределенностей описания. С другой стороны, реализация теоретических алгоритмов для практиков имеет три принципиальные трудности: сложность математического аппарата и формализации требований робастности, высокий консерватизм (пассивность) и большая размерность создаваемых систем. Многие из этих проблем не имеют строгого математического решения, однако, попытки эвристических, интуитивно понятных инженерных решений являются предметом постоянной научной дискуссии. Этой проблемой занимались и занимаются многие известные российские и зарубежные ученые Харитонов В.Л., Позняк А.С., Барабанов А.Е., Первозванский А.А., Фэн Чуньбо, Гуансюн, Зеймс (Zames), Дойл (Doyle), Гайне (Gainet) и многие другие.

Задача моделирования системы магнитного подвеса ротора сколь угодно актуальна столь и трудна. Актуальность обусловлена перспективой создания агрегатов со сверхвысокой скоростью вращения. Трудности заключаются как в сложности применяемых для управления моделей объекта – многомерного, неустойчивого, высокого порядка, так и в неизбежном наличии неопределенностей в используемой для управления модели. На настоящее время довольно распространены лабораторные установки магнитного подвеса ротора, например, ОКБМ им. И.И. Африкантова (Нижний Новгород), Сеульского национального университета (СНУ, Юж. Корея) и др., однако известны лишь единичные примеры успешной промышленной реализации.

Цель исследования заключается в разработке математической модели системы робастного магнитного подвеса ротора.

Методы исследования. Поставленная цель достигается следующими путями:

- 1) использованием теории робастного управления (H_∞ -теории),
- 2) выбором модели неопределенности, адекватного критерия качества управления и схемы редукиции системы,
- 3) использованием техники решения линейных матричных неравенств и матричных уравнений Лурье-Риккати.

Основные научные результаты.

- 1) разработана математическая модель и проведен синтез субоптимальной робастной системы магнитного подвеса ротора, в частности
 - а) предложена методика прямого моделирования неопределенностей и их учета в функционале робастности,
 - б) предложена методика составления обобщенного функционала робастности;
- 2) предложена методика прямого получения регулятора пониженного порядка для системы магнитного подвеса ротора;
- 3) проведен анализ и сравнительная оценка современных методов робастного управления и снижения размерности.

Достоверность результатов, полученных в диссертации, подтверждается использованием адекватных поставленным задачам математических инструментов и вычислительными экспериментами.

Научная новизна. В диссертации впервые сформулирована методика расчета робастного регулятора для системы магнитного подвеса на основе функционала смешанной чувствительности и предложена методика прямой редукиции регулятора.

Практическая ценность результатов работы заключается в разработанной методике синтеза робастного регулятора, применимой к широкому классу задач активного подвеса машин и инструментов, а также в проведенной редукиции полученных регуляторов, позволяющей практическую их реализацию.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы опубликованы в четырех печатных трудах и обсуждались на семинаре «Моделирование и управление инновациями» Института инноватики СПбГПУ, на городском семинаре по теории управления НИИ Проблем машиноведения, в рамках 33 Недели Науки СПбГПУ (27 ноября – 25 дек. 2004г.), на конференции «Фундаментальные исследования в вузах» СПбГПУ в мае 2005 г.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы из 148 наименований. Полный объем диссертации – 143 страницы, включая 35 рисунков и 2 таблицы.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе дается обзор и анализ существующих подходов к синтезу стабилизирующих H_∞ -оптимальных и робастных регуляторов для линейных непрерывных систем. Вводятся математические модели для параметрической и структурной неопределенностей. Рассматриваются основные критерии робастной устойчивости системы во временной и частотной областях: теорема В.Л. Харитонова (параметрическая неопределенность), критерий Найквиста и теорема о малом коэффициенте усиления. Формулируется задача H_∞ -многокритериальной оптимизации и рассматривается основной метод во временной области для решения этой задачи. Дается обзор основных методов редукции системы и регулятора. Рассматриваются несколько основных подходов редукции: редукция с помощью методов главных координат, сбалансированная редукция, редукция с сохранением качества по квадратичной норме (H_2 -норме) и равномерно-частотной норме (H_∞ -норме). Отмечаются главные недостатки известных методов синтеза H_∞ -регулятора полной размерности для линейных непрерывных систем, а также показываются недостатки типичных методов для решения задачи синтеза H_∞ -регулятора пониженной размерности. Ставятся задачи проектирования H_∞ -регулятора полной и пониженной

размерности для линейных непрерывных системы с помощью методики линейных матричных неравенств.

Во второй главе рассматриваются основные аспекты синтеза регуляторов на основе ЛМН. Приводятся необходимые математические определения и результаты теории линейных матричных неравенств. Рассматриваются некоторые общие проблемы в задаче синтеза робастного регулятора на основе ЛМН, например, анализ D -устойчивости, робастное многокритериальное управление, синтез робастного регулятора замкнутой системы.

Рассматриваются системы, описываемые уравнениями в пространстве состояний

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) &= Cx(t) + Du(t) \end{aligned} \quad (1)$$

где $x \in R^n$ – вектор состояния, $u \in R^m$ – вектор управления, $y \in R^p$ – вектор измерений. На языке ЛМН даются необходимые и достаточные условия, обеспечивающие D -устойчивостью матрицу A . Рассматривается проблема решения невыпуклой задачи с помощью методики ЛМН. Приведен пример – задача минимизации ранга положительно определенной матрицы. Дается основное описание и результаты задачи минимизации ранга положительной определенной матрицы. Поставлена задача конструирования γ -субоптимального робастного регулятора пониженной размерности замкнутой системы по выходу с помощью методики ЛМН.

Ставится следующая эквивалентная задача оптимизации,

$$\min_{X, Y, \gamma > 0} \text{rank} \begin{pmatrix} X & \mathcal{N} \\ \mathcal{N} & Y \end{pmatrix},$$

при условии, что

$$\begin{aligned} AX + XA^T + BB^T &< 0, \\ YA + A^T Y + C^T C &< 0, \\ \begin{pmatrix} X & \mathcal{N} \\ \mathcal{N} & Y \end{pmatrix} &\geq 0. \end{aligned} \quad (2)$$

Задача (2) является задачей невыпуклой оптимизации. Для ее решения вводится вспомогательная выпуклая задача оптимизации

$$\min_{R,S,\gamma>0} \text{trace} \begin{pmatrix} \gamma R & I \\ I & \gamma S \end{pmatrix},$$

при условии, что

$$AR + R A^T < BB^T,$$

$$A^T S + SA < C^T C,$$

$$\begin{pmatrix} \gamma R & I \\ I & \gamma S \end{pmatrix} \geq 0. \quad (3)$$

Задача (3) может быть решена с помощью функции *mincx* в *LMI-Toolbox*.

В третьей главе рассматривается задача моделирования робастной системы магнитного подвеса ротора при неопределенной скорости вращения, когда не известны ни гироскопический момент, ни возмущения центробежными силами, вызванными эксцентриситетом ротора. При этом ставится задача обеспечения необходимого качества управления – отклонения оси вращения не должны превышать весьма малого зазора между магнитом и ротором. Используется стандартное описание объекта в обобщенных координатах, дается анализ влияния неопределенности на его передаточную функцию. Предлагается метод рационального моделирования неопределенностей, обеспечивающий наименее консервативную их оценку. Вводится функционал качества управления, учитывающий требования робастной устойчивости и работоспособности. Рассматривается задача редукции построенного H_∞ -регулятора. Приведены процедуры понижения порядка регулятора тремя способами, в том числе, рассматривается проблема синтеза H_∞ -регулятора заданного порядка с помощью методики ЛМН. Составляются алгоритмы разных методов для решения этих задач.

Модель ротора на магнитных подшипниках. Система координат и силы, действующие на ротор, представлены на рис. 1. Эта система описывается системой дифференциальных уравнений

$$\begin{aligned} \dot{x}_G &= A_G x_G + B_G u_G + E f_G, \\ Y_G &= C_G x_G \end{aligned} \quad (4)$$

где

$$\begin{aligned} x_G &= [x_1 \ x_2 \ \dot{x}_1 \ \dot{x}_2 \ y_1 \ y_2 \ \dot{y}_1 \ \dot{y}_2]^T - \text{вектор перемещений и скоростей точек} \\ &\quad \text{опоры ротора;} \\ u_G &= [I_{x_1} \ I_{x_2} \ I_{y_1} \ I_{y_2}]^T - \text{вектор токов возбуждения катушек магнитных} \\ &\quad \text{подшипников;} \\ F_G &= [F_{dx} \ F_{dy}]^T - \text{вектор центробежных сил, вызванных наличием} \\ &\quad \text{эксцентриситета;} \\ Y_G &= [x_1 \ x_2 \ y_1 \ y_2]^T - \text{вектор наблюдаемых сигналов.} \end{aligned}$$

Индексы 1 и 2 в выражении (4), обозначают верхний и нижний подшипник, соответственно.

Матрицы пространства состояний системы (4) с учетом эксцентриситета и других физических параметров, имеют вид:

$$A_G = \begin{bmatrix} 0 & I & 0 & 0 \\ A_1 & 0 & 0 & A_2 \\ 0 & 0 & 0 & I \\ 0 & -A_2 & A_1 & 0 \end{bmatrix}, B_G = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & B \end{bmatrix}, E = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ E_1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & E_1 \end{bmatrix}, C_G = \begin{bmatrix} I & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & I & 0 \end{bmatrix}. \quad (5)$$

Здесь принято

$$\begin{aligned} A_1 &= \begin{bmatrix} \frac{(J_r + ML_1^2)K_{M_1}}{MJ_r} & -\frac{(L_2ML_1 - J_r)K_{M_2}}{MJ_r} \\ \frac{(L_2ML_1 - J_r)K_{M_1}}{MJ_r} & \frac{(J_r + ML_1^2)K_{M_1}}{MJ_r} \end{bmatrix}, A_2 = p \begin{bmatrix} -\frac{L_1J_a}{J_r(L_1 + L)_2} & \frac{L_1J_a}{J_r(L_1 + L)_2} \\ \frac{L_2J_a}{J_r(L_1 + L)_2} & -\frac{L_2J_a}{J_r(L_1 + L)_2} \end{bmatrix}, \\ B &= \begin{bmatrix} \frac{K_{I_1}(J_r + ML_1^2)}{MJ_r} & -\frac{K_{I_2}(L_1L_2m - J_r)}{MJ_r} \\ \frac{K_{I_2}(L_1L_2m - J_r)}{MJ_r} & \frac{K_{I_1}(J_r + ML_2^2)}{MJ_r} \end{bmatrix}, E_1 = \begin{bmatrix} 1 \\ M \\ 1 \\ M \end{bmatrix}, \end{aligned} \quad (6)$$

где

- M – вес ротора;
- J_a и J_r – аксиальная и радиальная инерции вращения;
- K_{M_1} и K_{M_2} – коэффициенты жесткости магнитных подшипников;
- K_{I_1} и K_{I_2} – коэффициенты усиления контуров управления магнитных подшипников;
- p – скорость вращения ротора.

Отмечается, что в блоке A_2 содержится переменный параметр – скорость вращения ротора p . При изменении скорости вращения этот параметр является причиной неопределенности системы.

Требования к регулятору. Требуется построить робастный регулятор с обратной связью по выходу, который обеспечивает два следующих условия одновременно:

- 1) система является устойчивой при любой скорости вращения (робастная устойчивость);
- 2) при любой скорости вращения гарантируется минимум энергии перемещений на выходе (номинальное качество).

Моделирование неопределенностей. По множеству частотных характеристик максимального сингулярного собственного числа передаточной матрицы ошибок можно построить их действительную мажоранту $w_1(s)$. Тогда при любой скорости вращения p можно будет гарантировать

$$\bar{\sigma}(\Delta(j\omega)) \leq |w_1(j\omega)|. \quad (7)$$

Так, для параметров, соответствующих физическому прототипу СНУ, на рис. 2 показано семейство максимальных сингулярных собственных чисел передаточных функций $\Delta(s, p, 4000)$, где $p = 0, 1, \dots, 6$ ($\times 10^3$ рад/с) для номинального объекта с $p_0 = 4000$ рад/с и выбранная мажоранта – амплитудно-частотная характеристика передаточной функции

$$w_1(s) = \frac{7.8 \times 10^{-8} (6.5s + 1)}{\left(\frac{1}{600}s + 1\right)^2 \left(\frac{1}{1100}s + 1\right)^2}.$$

Формализация требований к управлению

а) *Робастная устойчивость.* Возмущение несбалансированности ротора моделируется введением центробежных сил синусоидальной формы

$$f_G = M^2 e p^2 [\cos pt \quad \sin pt]^T,$$

где e – эксцентриситет [м].

Затем подбирается по возможности простой реализуемый фильтр высоких частот $w_2(s)$ с далекими от мнимой оси устойчивыми полюсами. Так,

в прототипе СНУ $M = 1.0849$ кг, $e = 40 \times 10^{-6}$ м, график $|f_G|$ и его мажоранты $|w_2|$ как функции частоты вращения p , представлены на рис. 3, в котором диапазон скоростей вращения ротора от 0 до 6000 рад/с. Здесь принято

$$w_2(s) = \frac{0.2820(s + 1.059)}{(6.28 \times 10^{-5}s + 1)}. \text{ Важно, что } w_1(s) \text{ и } w_2(s) \text{ выбираются естественным}$$

образом, в соответствии с инженерными условиями задачи.

Показывается, что в исследуемом случае, задача улучшения робастной устойчивости сводится к оптимизационной проблеме

$$\|(I - K(s)G_0(s))^{-1}K(s)W_1(s)\|_{\infty} \rightarrow \min_{\text{устойчивый } K(s)}, \quad (8)$$

где $W_1(s)$ – диагональная матрица с диагональными моментами $w_1(s)$.

б) *Ослабление внешних возмущений.* Ставится задача построения $K(s)$, обеспечивающего минимизацию H_{∞} -нормы передаточной функции $T_{zf}(K(s))$ от сигнала возмущения к выходу. При выбранной форме обратной связи задача сводится к

$$\|(I - K(s)G_0(s))^{-1}G_0^w(s)W_2(s)\|_{\infty} \rightarrow \min_{\text{устойчивый } K(s)}, \quad (9)$$

где $W_2(s)$ – диагональная матрица, на блоках главной диагонали которой находятся $w_2(s)$. $G_0^w(s)$ – номинальная передаточная матрица от возмущения к перемещению.

Объединение (8) и (9) дает общую задачу оптимизационного синтеза регулятора $K(s)$

$$\left\| \begin{array}{l} (I - K(s)G_0(s))^{-1}K(s)W_1(s) \\ (I - K(s)G_0(s))^{-1}G_0^w(s)W_2(s) \end{array} \right\|_{\infty} \rightarrow \min_{\text{устойчивый } K(s)}, \quad (10)$$

Очевидно, что при ограничении (10) ограничиваются (8) и (9). Однако, прямая минимизация (10) невозможна. Поэтому строится обобщенная передаточная функция в виде

$$T_{zd}(s) = \begin{bmatrix} (I - K(s)G_0(s))^{-1}K(s)W_1(s) & K(s)(I - G_0(s))^{-1}G_0^w(s)W_2(s) \\ G_0(s)(I - K(s)G_0(s))^{-1}K(s)W_1(s) & (I - G_0(s)K(s))^{-1}G_0^w(s)W_2(s) \end{bmatrix}. \quad (11)$$

Соответствующая передаточная функция от d к z представлена на рис. 4. Очевидно, что передаточные функции из (8) и (9) входят в (11) как

элементы. Следовательно, ограниченность $\|T_{zd}(s)\|_{\infty}$ означает ограниченность (8) и (9). С другой стороны, задача поиска $K(s)$ (см. рис. 4) с функционалом качества $\|T_{zd}(s)\|_{\infty}$ является стандартной для ее разработки. Однако и в решении этой более общей задачи есть смысл, поскольку при этом накладываются ограничения на сигналы внутри системы.

Построение γ -субоптимального H_{∞} -регулятора с помощью ЛМН подхода

Поставлена стандартная задача синтеза H_{∞} - управления для системы (4) (рис. 5): построить динамический регулятор по измеряемому выходу, при котором обеспечивается гашение возмущений в заданном отношении γ , т.е.

$\|T_{zv}\|_{\infty} < \gamma$, а при отсутствии возмущений v замкнутая система

асимптотически устойчива, где $\|v\|^2 = \int_0^{\infty} |v|^2 dt$ для любой вектор-функции

$v(t) \in L_2$. Даются достаточное и необходимое условия для решения этой задачи. Изложены алгоритмы для получения стационарного регулятора в параметризованной форме.

Конструирование H_{∞} - регулятора заданного порядка с обратной связью по выходу с помощью методики ЛМН. Поставлена задача конструирования H_{∞} регулятора заданного порядка с обратной связью по выходу с помощью методики ЛМН для линейной непрерывной системы. Рассматривается проблема предела порядка H_{∞} -регулятора. Показано существование H_{∞} -регулятора пониженного порядка. Даются необходимое и достаточное условия для решения этой задачи. Составляется алгоритм для решения этой задачи с помощью *mincx* в пакете *Robust Toolbox*.

В четвертой главе иллюстрируется реализация решений выше поставленных задач и ведется анализ имитационных экспериментов. Расчеты производились для значений параметров, соответствующих прототипу СНУ, в котором $M=1.08$ кг, $e=40$ мкм, $J_a=1.45 \times 10^{-4}$ кгм², $J_r=1.60 \times 10^{-3}$ кгм², $L_1=29.7$ мм, $L_2=42.3$ мм, $K_{M1}=4.56 \times 10^5$ Н/М, $K_{M2}=2.28 \times 10^5$ Н/М, $K_{I1}=296$ Н/А, $K_{I2}=148$ Н/А. Номинальным выбран объект со скоростью вращения ротора

$p_0 = 4000$ рад/с, при этом, как обсуждалось выше, норма аддитивной неопределенности оказалась наименьшей. В среде *MATLAB* рассчитываются матрицы пространства состояний регулятора, минимизирующего обобщенный критерий $\|T_{zd}(s)\|_\infty$ (11). Важно, что полученная постановка оказывается сингулярной, когда некоторые условия, накладываемые, в частности, на элементы матрицы D_{ij} не выполнены. Субоптимальный регулятор (с разрешенным допуском неоптимальности 10%) обеспечил значение показателя (8) меньше 1, т.е. обеспечивается робастная устойчивость замкнутой системы. В соответствии с общими свойствами решения стандартной задачи H_∞ -синтеза, стабилизирующий регулятор строго реализуем и имеет порядок $n_k = 28$. Отмечается, что субоптимальный регулятор обладает гораздо лучшими квадратичными свойствами (меньшим временем регулирования) в сравнении с оптимальным, и его структура не может оказаться вырожденной. Карта полюсов замкнутой системы при изменении скорости вращения $p \in [0, \dots, 6000]$ рад/с представлена на рис. 6. Так как регулятор сконструирован по критерию робастной устойчивости замкнутой системы, полюса всегда остаются устойчивыми. На рис. 7 показано максимальное сингулярное собственное число замкнутой системы с номинальным объектом. Качество управления на любой скорости вращения хорошо проверяется непосредственно по вычисленным осциллограммам установившихся колебаний в замкнутой системе – орбитам. Численное интегрирование в пакете *Simulink* показывает, что радиус орбит (максимальная длина полуоси орбиты x_1 - y_1) при любой скорости вращения не превышает $\Delta l = 38$ мкм, как показано на рис. 8.

Редукция регулятора. В соответствии с разработанным в гл. 2 алгоритмом проведено последовательное снижение размерности регулятора с 28 до 10. На рис. 9 показана важная диаграмма зависимости показателя качества управления от размерности регулятора рассматриваемой системы. На рис. 10 показаны сингулярные собственные числа номинальной замкнутой системы с регулятором разных порядков, полученным по методике ЛМН. Вследствие

соответствия параметризации между регулятором и решением линейных матричных неравенств, точность сокращения $tol_k = 10^{-5} \cdot tol / \gamma^2$. Рис.9 и рис. 10 показывают, как понижение порядка регулятора влияет на падение качества замкнутой системы. Несмотря на то, что оптимальное значение качества системы $\gamma_{opt} > 1$, с учетом $\|T_{zw}\|_{\infty} \ll 1$, робастная устойчивость сохраняется. Блок-схема предлагаемого алгоритма представлена в диссертации.

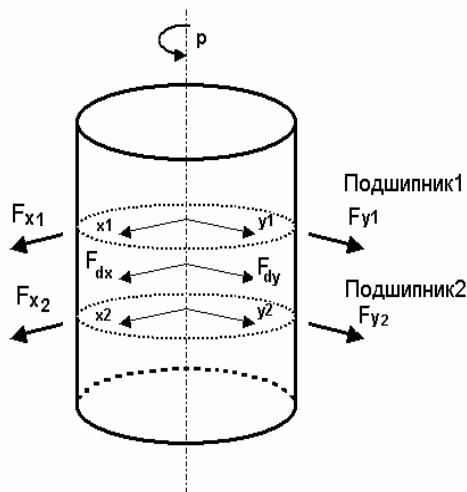


Рис. 1. Схема системы магнитного подвеса

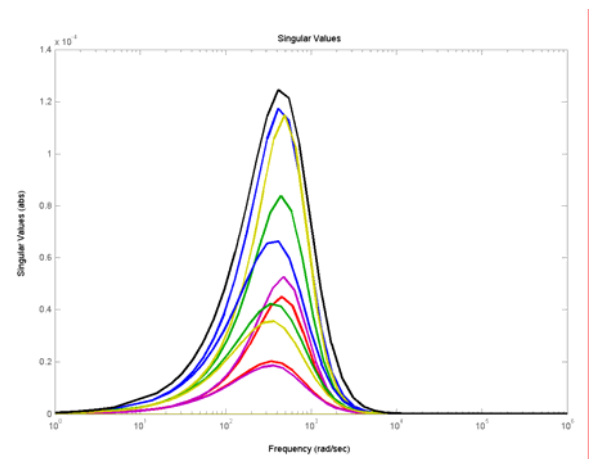


Рис.2. Сингулярные числа возмущенной системы и их мажоранта

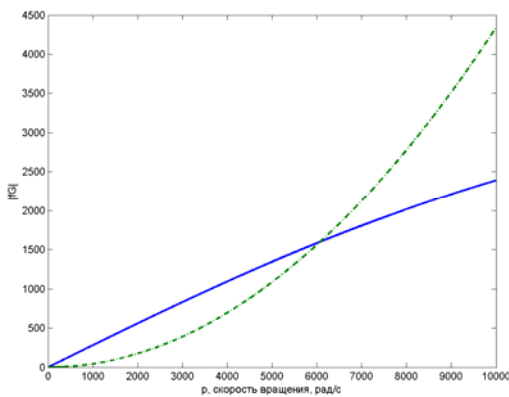


Рис. 3. Возмущение несбалансированного центра масс и его мажоранта

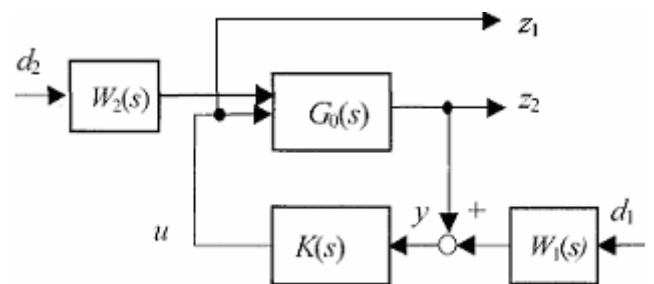


Рис. 4. Обобщенная задача синтеза

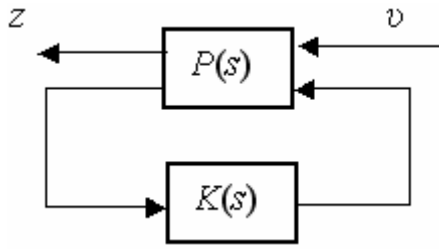


Рис. 5. Стандартная задача построения γ -субоптимального H_∞ -регулятора

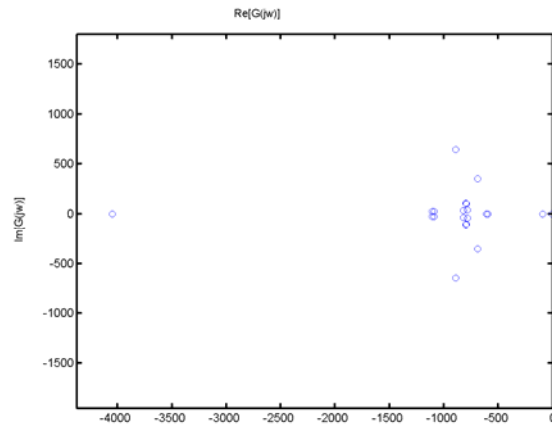


Рис.6. Числительный эксперимент, изменения полюсов замкнутой системы с регулятором $n_k = 28$ при $p \in [0, \dots, 6000]$ рад/с.

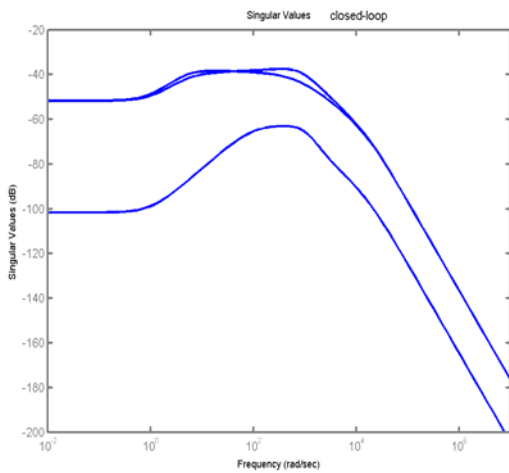


Рис. 7. Расчет сингулярных собственных чисел замкнутой системы с номинальным объектом ($n_k = 28$)

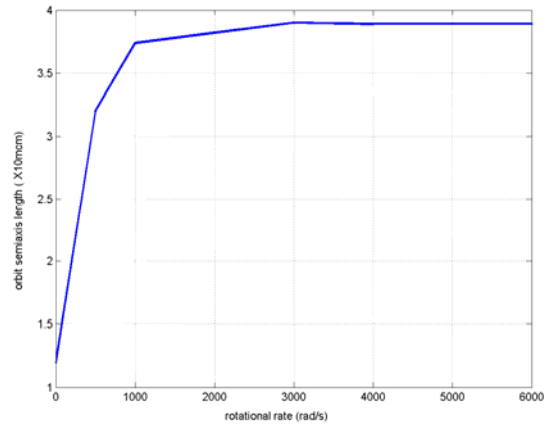


Рис.8. Численный эксперимент, максимальная длина полуоси установившейся орбиты при $p \in [0, \dots, 6000]$ рад/с.

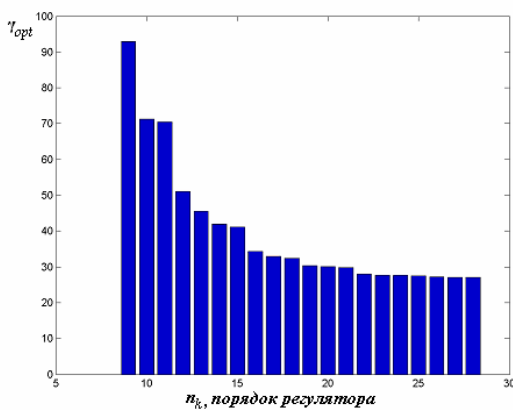


Рис. 9. Сравнение γ -субоптимального показателя замкнутой системы при понижении порядка регулятора (ЛМН)

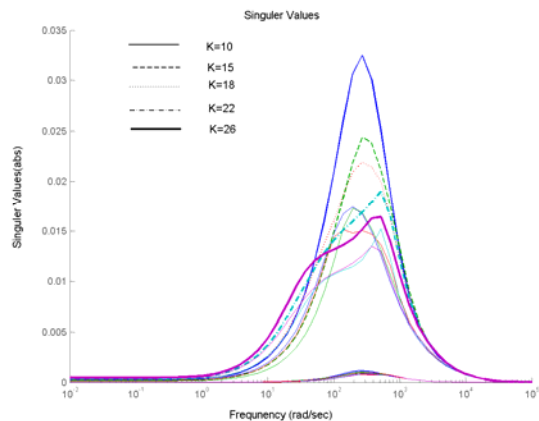


Рис. 10. Сингулярные числа номинальной замкнутой системы с регулятором разных порядков

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные результаты работы состоят в следующем:

- 1) Предложена математическая модель учета неопределенностей в системе магнитного подвеса жесткого ротора, связанных с неточным значением скорости его вращения при наличии эксцентриситета.
- 2) Предложен функционал качества, гарантирующий робастную устойчивость и работоспособность системы, предложена процедура сведения полученной задачи оптимизации к стандартной.
- 3) Проведен синтез решения с помощью асимптотической модификации процедуры решения уравнений Лурье-Риккати.
- 4) Проведено снижение размерности полученной модели системы с учетом сохранения качества управления. Получены численные оценки связи порядка редукции и качества управления.
- 5) Полученные в работе оценки и результаты подтверждаются численными экспериментами.

Публикации по теме диссертации

1. Wang Guang-xiong, He Zhen, Liu Shu-huan// Method for treating singular problems in H_∞ design/ Electric machines and control - 2000, Vol.4, No. 3, Стр. 148-163
2. Лю Шухуань, Чечурин Л.С.// Робастный регулятор для системы магнитного подвеса/ Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов, Ч. XII , СПбГПУ, 2004. Стр. 80
3. Лю Шухуань, Чечурин Л.С.// Синтез робастного управления ротором на магнитном подвесе// Инноватика в науке, образовании и производстве - Труды СПбГПУ, No.492, Стр. 136-146
4. Лю Шухуань, «Робастные динамические системы» п. 1 главы 8 в книге Чечурин С.Л., Чечурин Л.С. Физические основы теории колебаний. СПб.: Изд-во Политехнического ун-та, 2005, 258с. Стр. 141-163.

Лю Шухуань

МОДЕЛИРОВАНИЕ И РАСЧЕТ СИСТЕМЫ РОБАСТНОГО
МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

Автореферат

Подписано в печать 06.05.05
Тираж 100 экз.

Объем в п.л. 1
Заказ 26/05

Отпечатано с готового оригинал-макета, предоставленного автором, Центре
оперативной полиграфии Института инноватики СПбГПУ
195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., 29