

На правах рукописи

СМИРНОВА Елена Александровна

**АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
СИСТЕМ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА
СЕПАРАТНЫХ ПОДСИСТЕМ**

**Специальность 05.13.01
Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)**

**АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Уфа – 2010

Работа выполнена в ГОУ ВПО
«Уфимский государственный авиационный технический университет»

Научный руководитель	д-р техн. наук, доц. Кузнецов Игорь Васильевич , проф. каф. телекоммуникационных систем ГОУ ВПО «УГАТУ»
Официальные оппоненты	д-р техн. наук, проф. Асанов Асхат Замилович , проф. каф. прикладном математики и информатики филиала ФГАОУ ВПО «Казанский (Приволжский) федеральный университет» в г. Набережные Челны канд. техн. наук Чечулин Анатолий Юрьевич , начальник КО малоразмерных ГТД ФГУП УАП «Гидравлика»
Ведущее предприятие	ФГУП «Уфимское научно-производственное предприятие «Молния»

Защита состоится «3» декабря 2010 г. в 10 часов
на заседании диссертационного совета Д-212.288.03
в Уфимском государственном авиационном техническом университете
по адресу: 450000, г. Уфа, ул. К. Маркса, 12

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета

Автореферат разослан «29» октября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д-р техн. наук, проф.

В. В. Миронов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современные технические системы представляют сложные комплексы, в состав которых входят группы либо взаимосвязанных, либо взаимоувязанных параллельных подсистем (каналов), объединенных совместной работой. Например, к сложным техническим системам можно отнести комплексы с многодвигательными установками в текстильной, бумагоделательной, нефтехимической, металлургической промышленности, системы управления многодвигательными летательными аппаратами (ЛА). В таких системах необходимо решать задачи функционального координирования сепаратными подсистемами с целью обеспечения требуемого качества функционирования системы.

В иерархии задач управления задачи координированного управления относятся к задачам более высокого уровня, нежели традиционные задачи управления. В таких системах требуется обеспечить функционирование не только каждой из подсистем, но и обеспечить координацию (согласование) всех каналов в соответствии с заданным целевым правилом работы (поддержание заданных функциональных соотношений между несколькими регулируемыми переменными).

Системное изучение вопросов координированного управления положено в работах М. В. Меерова, В. Т. Морозовского, О. С. Соболева, И. В. Мирошника, А. А. Воронова. Вопросами координированного управления занимается научная школа УГАТУ, представленная трудами Б. Г. Ильцова, В. Н. Ефанова, В. И. Васильева, Ю. С. Кабальнова, В. Г. Крымского, Н. И. Юсуповой, В. В. Миронова и др. Координированное управление рассматривается в работах зарубежных ученых Der-Ming Chang, Cheng-Ching Yu, W. E. Leithead, S. Dominguez, P. Albertos, A. Sala, G. Li, T. T. Lie, G. B. Shrestha, K. L. Lo, G. Valadez, D. Sandberg, P. Immonen, T. Matsko.

Координация на статических режимах предполагает автономное координированное управление выходными координатами согласованным действием входных воздействий. Более сложная задача – организация координированного изменения управляемых координат на динамических режимах работы системы. В условиях действия на автономные управляемые объекты больших по величине неконтролируемых возмущений достаточно сложно поддерживать заданные функциональные соотношения между их выходными переменными. В подобных случаях применяют специальные системы координированного управления (СКУ). Особенность координированного управления группой динамических автономных объектов – использование в качестве дополнительных управляемых переменных величин ошибок координации, характеризующих нарушение условий согласованной работы сепаратных подсистем, и организации контура координирующего управления, задачей которого является минимизация данной величины.

Введение дополнительного контура координации приводит к необходимости соблюдения противоречивых требований, с одной стороны,

высокой точности координации всей системы, с другой стороны, обеспечения качества функционирования сепаратных каналов. Это связано с тем, что контур координации меняет динамические свойства сепаратных подсистем, является источником дополнительных возмущений, как по входу, так и по выходу сепаратных каналов.

С учетом вышесказанного, вытекает необходимость разработки алгоритмов анализа и синтеза систем координированного управления динамическими объектами по показателям качества сепаратных подсистем.

Объект исследования

Объектом исследования являются системы координированного управления динамическими объектами (на примере синхрофазирования винтовентиляторами ТВД многодвигательных ЛА).

Предмет исследования

Предметом исследования являются алгоритмы анализа и синтеза систем координированного управления динамическими объектами.

Цель работы

Целью работы является развитие частотных и операторных методов анализа и синтеза систем координированного управления динамическими объектами и оценка их эффективности на примере исследования системы синхрофазирования винтовентиляторов ТВД многодвигательных ЛА.

Задачи исследования

Для достижения поставленной цели потребовалось решение следующих задач:

1. Разработать эквивалентную векторно-матричную модель линейных систем координированного управления (п. 3 паспорта специальности).
2. Разработать алгоритм исследования запасов устойчивости однопольных линейных систем координированного управления (п. 4 паспорта специальности).
3. Разработать алгоритм оценки статической и динамической точностей многосвязных линейных систем координированного управления (п. 4 паспорта специальности).
4. Разработать алгоритмы аналитического синтеза линейных систем координированного управления с ограничениями по точности управления движением входных и выходных координат (п. 7 паспорта специальности).
5. Произвести оценку эффективности применения разработанных алгоритмов анализа и синтеза систем координированного управления применительно к системам синхрофазирования винтовентиляторов ТВД многодвигательных ЛА (п. 11 паспорта специальности).

Методы исследования

При решении поставленных задач в работе используются методы теории систем автоматического управления, теории функций комплексных переменных, теории функционального анализа, линейной алгебры. Экспериментальная проверка теоретических результатов проводилась моделированием на ПЭВМ.

Научная новизна

1. Новизна предложенной модели линейных систем координированного управления динамическими объектами заключается в получении эквивалентной структуры, представленной в виде МСАУ с голономными связями между сепаратными подсистемами, охваченной неединичной обратной связью. Данная модель позволяет упростить анализ процессов координирования путем применения известного аппарата исследования МСАУ.

2. Предложенный алгоритм определения областей и запасов устойчивости однотипных линейных систем координированного управления, в отличие от существующих алгоритмов, основан на анализе частотных характеристик сепаратных подсистем и связей между ними и применении известного частотного критерия устойчивости однотипных МСАУ с голономными связями между подсистемами. Данный алгоритм позволяет упростить процесс анализа систем координированного управления.

3. Новизна предложенного алгоритма оценки статической и динамической точностей линейных систем координированного управления состоит в вычислении рекурсивных матричных коэффициентов ошибок в сепаратных подсистемах и вычислении эквивалентных ошибок в контуре координирования. Данный алгоритм позволяет уменьшить вычислительную сложность оценки статической и динамической точностей систем координированного управления.

4. На основе операторных методов синтеза разработаны алгоритмы аналитического конструирования многорежимных линейных систем координированного управления, отличительной особенностью которых является учет качества процессов, протекающих в сепаратных подсистемах.

5. Предложены инженерная методика и техническое решение задачи синтеза регулятора контура координирующего управления, применительно к системам синхрофазирования винтовентиляторов ТВВД многодвигательных ЛА. В отличие от базовой системы синхрофазирования (автономное управление), используется дополнительная управляемая переменная величины разности фаз вращения двух винтовентиляторов и организовывается контур координирующего управления, задачей которого является минимизация данной величины, что приведет к уменьшению уровня шума и вибраций.

На защиту выносятся:

1. Эквивалентная векторно-матричная модель линейных систем координированного управления.

2. Алгоритм исследования запасов устойчивости однотипных линейных систем координированного управления.

3. Алгоритм оценки статической и динамической точностей многосвязных систем координированного управления.

4. Алгоритмы аналитического синтеза систем координированного управления с ограничениями по точности управления движения входных и выходных координат.

5. Результаты экспериментальной проверки эффективности предложенных алгоритмов координированного управления применительно к системам синхрофазирования винтовентиляторов ТВВД многодвигательных ЛА.

Практическая значимость

Разработаны методические рекомендации по синтезу регулятора контура координирующего управления системой синхрофазирования винтовентиляторов многодвигательных ЛА.

Результаты исследования внедрены на кумертауском авиационном производственном предприятии (КумАПП) при проектировании систем координированного управления процессом формования многоканальной лопасти; в учебный процесс УГАТУ в методических указаниях к курсовому проектированию и лабораторному практикуму по дисциплине «Управление сложными объектами» специальности 230301 «Моделирование и исследование операций в организационно-технических системах».

Апробация работы

Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях:

- Всероссийская молодежная научная конференция «Мавлютовские чтения», УГАТУ, Уфа, 2008;
- 4-я всероссийская зимняя школа-семинар аспирантов и молодых ученых «Актуальные проблемы в науке и технике», УГАТУ, Уфа, 2009;
- 52-я всероссийская молодежная научная конференция с международным участием «Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук», Московский физико-технический институт, Москва, 2009;
- XI международная научно-техническая конференция «Проблемы техники и технологии телекоммуникаций», УГАТУ, Уфа, 2010;
- Основные положения работы докладывались на семинарах кафедры информатики.

Публикации по теме диссертации:

Основные результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 8 печатных работах, в том числе 4 статьях (2 статьи в рецензируемом журнале из списка ВАК), 4 материалах конференций.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения, изложенных на 181 листах машинописного текста, включая иллюстрации, таблицы, список используемой литературы из 96 наименований. Приложения к диссертации изложены на 2 листах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность диссертационной работы, формулируются задачи и цели исследования, отмечается научная новизна и практическая ценность полученных результатов.

В первой главе дается краткая характеристика координации в сложных технических системах. Проведен обзор существующих методов и алгоритмов анализа и синтеза систем согласованного управления, указаны области их применения.

Рассматривается сложная техническая система (рисунок 1), состоящая из группы автономных замкнутых систем управления ($R_i(s), H_i(s)$ – соответственно регулятор и объект управления i -ой сепаратной подсистемы). Каждая подсистема выполняет собственные локальные функции управления.

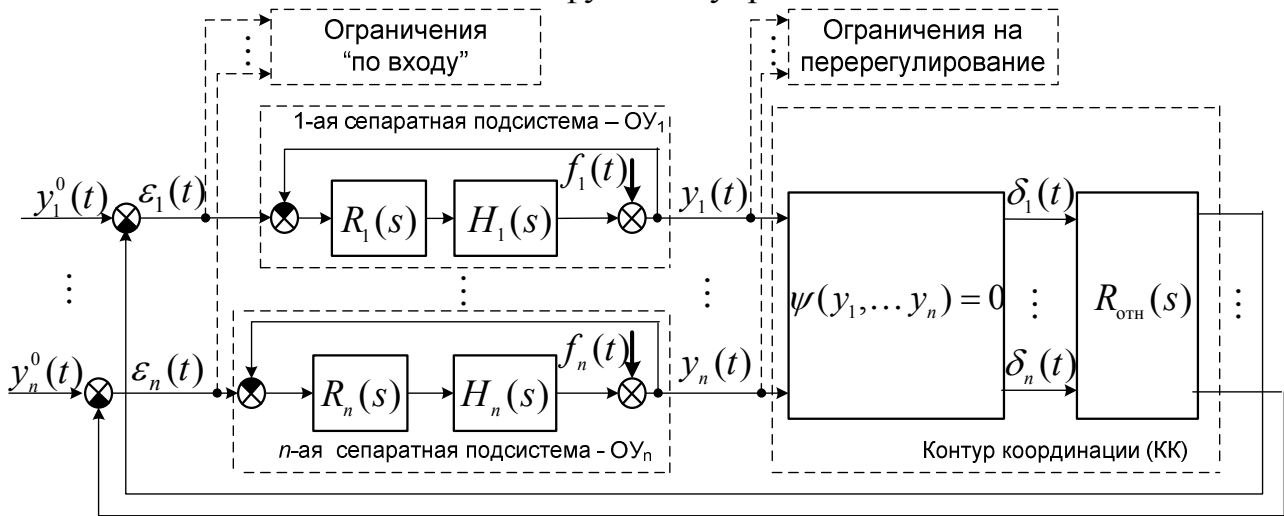


Рисунок 1 – Структурная схема СКУ группой динамических автономных объектов

В ряде случаев необходимо обеспечить не только функционирование каждой из подсистем, но и их согласованную работу. Согласованная работа сепаратных подсистем может быть описана желаемым функциональным соотношением вида $\psi(y_1, y_2, \dots, y_n) = 0$ или

$$\begin{aligned} y_1(t) - b_{12}y_2(t) - b_{13}y_3(t) - \dots - b_{1,n-1}y_{n-1}(t) - b_{1n}y_n(t) &= 0, \\ y_2(t) - b_{21}y_1(t) - b_{23}y_3(t) - \dots - b_{2,n-1}y_{n-1}(t) - b_{2n}y_n(t) &= 0, \\ \dots \\ y_n(t) - b_{n1}y_1(t) - b_{n2}y_2(t) - b_{n3}y_3(t) - \dots - b_{n,n-1}y_{n-1}(t) &= 0, \end{aligned}$$

где $y_1(t), y_2(t), \dots, y_n(t)$ – выходные переменные сепаратных подсистем.

Ввиду действия на систему неконтролируемых возмущений $f(t)$ возникает дополнительное движение – ошибки координации $\delta_i(t)$:

$$\bar{\delta}(t) = \begin{bmatrix} y_1(t) - b_{12}y_2(t) - b_{13}y_3(t) - \dots - b_{1,n-1}y_{n-1}(t) - b_{1n}y_n(t) \\ y_2(t) - b_{21}y_1(t) - b_{23}y_3(t) - \dots - b_{2,n-1}y_{n-1}(t) - b_{2n}y_n(t) \\ \dots \\ y_n(t) - b_{n1}y_1(t) - b_{n2}y_2(t) - b_{n3}y_3(t) - \dots - b_{n,n-1}y_{n-1}(t) \end{bmatrix},$$

характеризующие нарушение условий согласованной работы сепаратных подсистем. С целью уменьшения данной ошибки ($\delta(t) \rightarrow 0$) в обратную связь сложной технической системы вводится дополнительный контур координации.

Однако введение дополнительного контура координации приводит к необходимости соблюдения противоречивых требований, с одной стороны, высокой точности координации системы, с другой стороны, обеспечения качества функционирования сепаратных подсистем. Это связано с тем, что контур координации меняет динамические свойства сепаратных подсистем,

является источником дополнительных возмущений, как по входу, так и по выходу сепаратных каналов. Вследствие чего возникает необходимость исследования областей и запасов устойчивости, оценки статической и динамической точностей СКУ, разработке алгоритмов синтеза СКУ по показателям качества сепаратных подсистем.

Во второй главе разработаны эквивалентная векторно-матричная модель систем координированного управления, алгоритмы оценки запасов устойчивости по амплитуде и фазе хорошо демпфированной однотипной системы координированного управления, предложен алгоритм оценки статической и динамической точностей линейных систем координированного управления.

Для упрощения процесса исследования динамических свойств и синтеза линейных систем координированного управления, предложена эквивалентная векторная матричная модель систем координированного управления (рисунок 2).

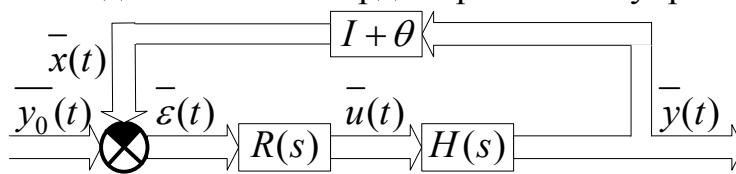


Рисунок 2 – Эквивалентная векторно-матричная схема системы координированного управления

Здесь $R(s) = \text{diag}\{R_{ii}(s)\}_{n \times n}$, $H(s) = \text{diag}\{H_{ii}(s)\}_{n \times n}$ – передаточные матричные функции соответственно регулятора и объекта управления; I – единичная матрица размерности $n \times n$, $\theta = LR_{\text{отн}}(s)G$; L и G – преобразующие матрицы размерности $n \times n$; G составляется по правилу: g_{ij} – коэффициент перед $y_j(s)$ соответствующего значения ошибки координации $\delta_i(t)$ и имеет вид

$$G = \|g_{ij}\|_{n \times n} = \begin{bmatrix} 1 & -b_{12} & -b_{13} & \dots & -b_{1,n-1} & -b_{1n} \\ -b_{21} & 1 & -b_{23} & \dots & -b_{2,n-1} & -b_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -b_{n1} & -b_{n2} & -b_{n3} & \dots & -b_{n,n-1} & 1 \end{bmatrix},$$

L составляется по правилу

$$l_{ij} = \begin{cases} 1/g_{ji}, & \text{если } g_{ji} \neq 0, \\ 0, & \text{если } g_{ji} = 0; \end{cases}$$

$R_{\text{отн}}(s) = \text{diag}\{R_{\text{отн}}^{ii}(s)\}_{n \times n}$ – передаточные матричные функции регулятора контура координированного управления. Для однотипных СКУ $R(s) = \text{diag}\{R_0(s)\}_{n \times n}$, $H(s) = \text{diag}\{H_0(s)\}_{n \times n}$, $R_{\text{отн}}(s) = \text{diag}\{R_{\text{отн}}^0(s)\}_{n \times n}$. При исследовании динамических свойств линейных систем координированного управления с голономными связями между сепаратными подсистемами, $R_{\text{отн}}(s) = \text{diag}\{R_{\text{отн}}^0\}_{n \times n}$, $R_{\text{отн}}^0 = \text{const}$.

Предложенная эквивалентная векторно-матричная модель показывает, что при помощи эквивалентных преобразований СКУ можно привести к МСАУ с голономными связями между подсистемами, охваченным неединичной обратной

связью. Вследствие чего для определения характеристического уравнения однотипных СКУ можно применить известную системную форму на основе частотных характеристик отдельных подсистем и связей между ними

$$1 + h_2 \Phi^2(s) + h_3 \Phi^3(s) + \dots + h_n \Phi^n(s) = 0, \quad (1)$$

где $\Phi(s) = \Phi_{ii}(s)$ – передаточные функции отдельных подсистем СКУ (полагаются устойчивыми и физически реализуемыми); h_2, \dots, h_n – характеристики связи – постоянные величины, вычисляемые по соответствующим формулам.

Для двумерной ($n = 2$) линейной однотипной СКУ:

$$1 + h_2 \Phi^2(s) = 0, \text{ где } h_2 = -\det \|\theta_{ij} \gamma_{ij}\|_{2 \times 2} = -4K^2;$$

для трехмерной ($n = 3$):

$$1 + h_2 \Phi^2(s) + h_3 \Phi^3(s) = 0,$$

где $h_2 = \det \|\theta_{ij} \psi_{ij}\|_{2 \times 2} - \det \|\theta_{ij} \gamma_{ij}\|_{2 \times 2} - 1$, $h_3 = \det \|\theta_{ij} \gamma_{ij}\|_{3 \times 3}$;

для четырехмерной ($n = 4$):

$$1 + h_2 \Phi^2(s) + h_3 \Phi^3(s) + h_4 \Phi^4(s) = 0,$$

где $h_2 = -\frac{1}{2} \sum_{i \neq j=1}^4 \theta_{ij} \theta_{ji}$, $h_3 = \det \|\theta_{ij} \psi_{ij}\|_{3 \times 3} - 1 - h_2 - \det \|\theta_{ij} \gamma_{ij}\|_{3 \times 3}$, $h_4 = \det \|\theta_{ij} \gamma_{ij}\|_{4 \times 4}$;

$$\gamma_{ij} = \begin{cases} 0, & i = j, \\ 1, & i \neq j; \end{cases} \quad \psi_{ij} = \begin{cases} 1/\theta_{ii}, & i = j, \\ 1, & i \neq j. \end{cases}$$

Для оценки устойчивости линейных однотипных СКУ используются частотный и алгебраический критерии устойчивости однотипных МСАУ с голономными связями между подсистемами, разработанные профессорами Б. Г. Ильясовым и Ю. С. Кабальновым [Автоматика и телемеханика, 1994. № 8. С. 82–90].

Предложен алгоритм определения коэффициентов передачи контура координации K , обеспечивающих запасы устойчивости по амплитуде и по фазе хорошо демпфированной однотипной СКУ:

1) определение коэффициентов передачи контура координации K , обеспечивающих устойчивость и минимально-фазовость передаточной функции $\Phi(s)$ отдельных подсистем однотипных СКУ;

2) определение коэффициентов передачи контура координации K , обеспечивающих устойчивость однотипных СКУ (частотный критерий устойчивости), т.е. таких K , при которых годограф передаточной функции $\Phi(j\omega)$, $\omega \in (-\infty; +\infty)$ отдельной подсистемы не охватывает корни η_1, \dots, η_n характеристического уравнения $1 + h_2 \eta^2 + h_3 \eta^3 + \dots + h_n \eta^n = 0$, полученного из (1) подстановкой $\eta = \Phi(s)$;

3) определение коэффициентов передачи контура координации K , удовлетворяющие запасу устойчивости по амплитуде и по фазе хорошо демпфированной системы, т.е. такие K , при которых запас устойчивости по амплитуде

$$L = 20 \left| \lg \frac{\sqrt{(\operatorname{Re} \eta)^2 + (\operatorname{Im} \eta)^2}}{\sqrt{(\operatorname{Re} \Phi(\omega_0 j))^2 + (\operatorname{Im} \Phi(\omega_0 j))^2}} \right| = 6 \div 20 \text{ дБ}, \text{ где } \omega_0: \frac{\operatorname{Im} \eta}{\operatorname{Re} \eta} = \frac{\operatorname{Im} \Phi(\omega_0 j)}{\operatorname{Re} \Phi(\omega_0 j)},$$

а запас устойчивости по фазе – $\mu = \left| \operatorname{arctg} \frac{\operatorname{Im} \Phi(\omega_1 j)}{\operatorname{Re} \Phi(\omega_1 j)} \right| = 30^\circ \div 60^\circ$, где

$$\omega_1: \sqrt{(\operatorname{Re} \Phi(\omega_1 j))^2 + (\operatorname{Im} \Phi(\omega_1 j))^2} = |\eta|.$$

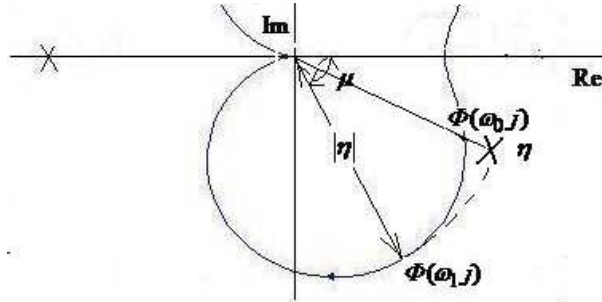


Рисунок 3 – Годограф АФХ $\Phi(j\omega)$, $\omega \in (-\infty; +\infty)$
и корень характеристического уравнения

Проведенное исследование показывает, что для системы синхронизации винтовентиляторов ТВД многодвигательных ЛА, запас устойчивости по амплитуде и по фазе соответствующий хорошо демпфированной системе составляет $-0,17 < K < -0,05$ и $0,06 < K < 0,5$.

Предложен алгоритм оценки влияния задающих воздействий прямого и перекрестных каналов на статическую точность прямого канала. Получены выражения для расчета установившихся эквивалентных ошибок СКУ

$$\bar{\varepsilon}_{уст}(t) = [C_0 + sC_1 + \dots + s^q C_q + \dots] \bar{y}^0(t),$$

где $\bar{y}^0(t) = \bar{y}_0 + \bar{y}_1 t^2 + \dots + \bar{y}_\mu t^\mu$; $C_0, C_1, \dots, C_q, \dots$ – матрицы коэффициентов эквивалентных ошибок управления размерности $n \times n$, определяемые итерационным способом:

$$\begin{aligned} C_0 &= I - 1/d_0 [I + \theta] A_0, \\ C_1 &= 1/d_0 [d_1 I - [I + \theta] A_1] - d_1/d_0 C_0, \\ &\dots \\ \bar{C}_m &= 1/d_0 [d_m I - [I + \theta] A_m] - d_1/d_0 C_{m-1} - \dots - d_m/d_0 C_0, \\ C_{m+1} &= -d_1/d_0 C_m - \dots - d_m/d_0 C_1, \\ &\dots \\ \bar{C}_\mu &= -d_1/d_0 C_{\mu-1} - \dots - d_m/d_0 C_{\mu-m}. \end{aligned}$$

Получена формула, выражающая зависимость установившихся ошибок координации от установившихся эквивалентных ошибок управления

$$\bar{\delta}_{ycm}(t) = G(I + \theta)^{-1} [\bar{y}_{ycm}^0(t) - \bar{\varepsilon}_{ycm}(t)].$$

Данные формулы позволяют оценить влияние на статическую точность СКУ как имеющихся связей между ее каналами, так и вида задающих

воздействий по различным каналам; как, изменяя значение одной из ошибок, поддерживать требуемое качество другой.

Показано, что предложенный алгоритм оценки статической точности можно применять при оценке динамической точности СКУ, на вход которой поданы гармонические колебания, смещенные по фазе.

В третьей главе разработаны алгоритмы синтеза регуляторов контура координирующего управления многосвязным объектом с ограничениями.

Рассматриваются детерминированные сигналы, они характеризуются интегральной квадратичной оценкой

$$I_{x(t)} = \int_0^{\infty} x^2(t) dt = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} X(s)X(-s) ds,$$

где $X(s)$ – изображение по Лапласу неслучайного сигнала $x(t)$.

Контур координации меняет динамические свойства сепаратных подсистем, является источником дополнительных возмущений, как по входу, так и по выходу сепаратных каналов. При синтезе СКУ необходимо учитывать ограничения на мощность управления

– обеспечение требований качества управления по выходу в сепаратных подсистемах;

– ограничения по интенсивности входного воздействия в сепаратных подсистемах.

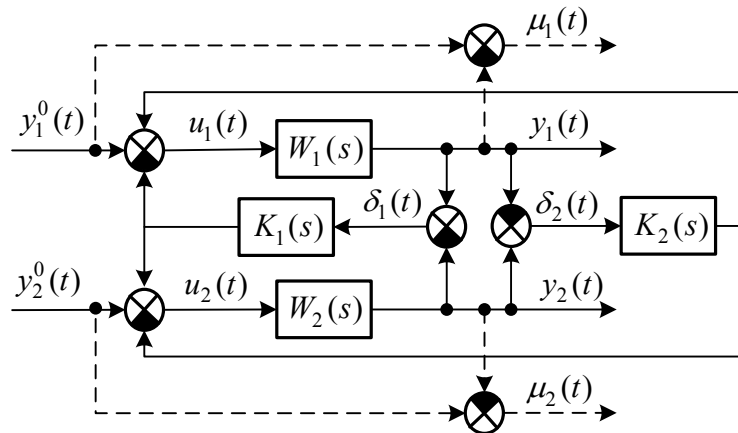


Рисунок 4 – Структурная схема двухканальной СКУ

При обеспечении ограничений критерий оптимальности – минимум интегральных квадратичных оценок ошибок координации I_{δ_i} , при условии ограничения интегральных квадратичных оценок ошибок управления локальных подсистем $I_{огр_i} = I_{u_i}$ (или ошибок локальных подсистем $I_{огр_i} = I_{\mu_i}$), $i = \overline{1, n}$

$$D = I_{\delta_1} + I_{\delta_2} + \dots + I_{\delta_n} + \lambda_1 I_{огр_1} + \lambda_2 I_{огр_2} + \dots + \lambda_n I_{огр_n} \rightarrow \min, \text{ где } I_{огр_i} \leq c_i^2, \quad (2)$$

Алгоритм синтеза регулятора контура координированного управления для замкнутой многосвязной системы с ограничениями:

– необходимо найти вид подынтегрального выражения критерия оптимальности $D = \sum_{m=0}^M \lambda_m D_m$,

где $\lambda_0 = 1$, λ_k ($k = 1, 2, \dots, M$) – множители Лагранжа,

$$D_m = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} Q_m(F_1(s), F_2(s), \dots, F_n(s), F_1(-s), F_2(-s), \dots, F_n(-s)) ds,$$

где $F_j(s)$, $j = 1, 2, \dots, n$ – передаточные функции, все полюсы которых находятся в левой полуплоскости, $F_j(s)$ будут зависеть от передаточных функций объектов управления, контуров координации; функция Q обладает свойством

$$\left. \frac{\partial Q_m}{\partial F_j(-s)} \right|_{s_1=-s} = \left. \frac{\partial Q_m}{\partial F_j(s)} \right|_{s_1=s};$$

- продифференцировать подынтегральное выражение по $F_j(-s)$;
- используя операции факторизации и сепарации найти вид передаточных функций $F_j(s)$;

– найти неопределенные множители Лагранжа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, от которых зависят передаточные функции $F_j(s)$. Для этого необходимо подставить найденные передаточные функции $F_j(s)$ в ограничения;

– из найденных передаточных функций выразить передаточные функции контуров координации $K_i(s)$, $i = 1, 2, \dots, n$.

Приводится синтез регуляторов контура координации $K_1(s)$, $K_2(s)$ обеспечивающих линейные зависимости между выходными координатами $y_1(t) = y_2(t)$ двух не однотипных сепаратных подсистем

($W_1(s) = \frac{1}{s+2}$, $W_2(s) = \frac{s+1}{s+2}$), с ограничениями на ошибки перерегулирования $\mu_1(t)$ и $\mu_2(t)$ (ограничения по выходу в сепаратных подсистемах) (рисунок 4).

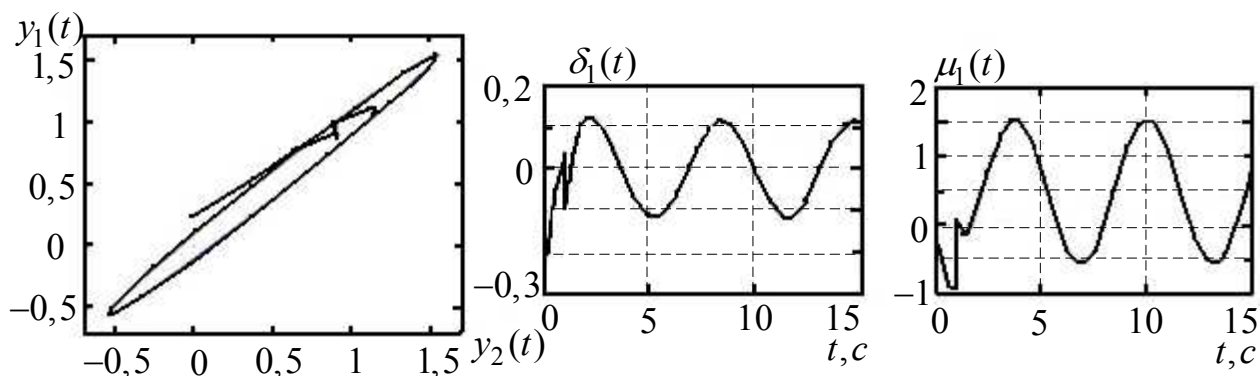


Рисунок 5 – Переходные процессы зависимости выходных координат, ошибки координации и ошибки локальной подсистемы

На рисунке 5 приведено исследование динамической точности синтезированной системы. Приведены графики переходных процессов зависимости выходных координат, ошибки координации и ошибки локальной подсистемы синтезированной системы, при требованиях обеспечения качества управления по выходу (при моделировании на каналы действовали гармонические возмущения). Из графиков видно, что синтезированная СКУ эффективно координирует выходные координаты и учитывает ограничения, даже при действии возмущений.

Предложен алгоритм синтеза регулятора контура координирующего управления для многорежимной системы, функционирующего на статическом режиме (автономное управление) и на динамическом режиме (при введении координирующей обратной связи).

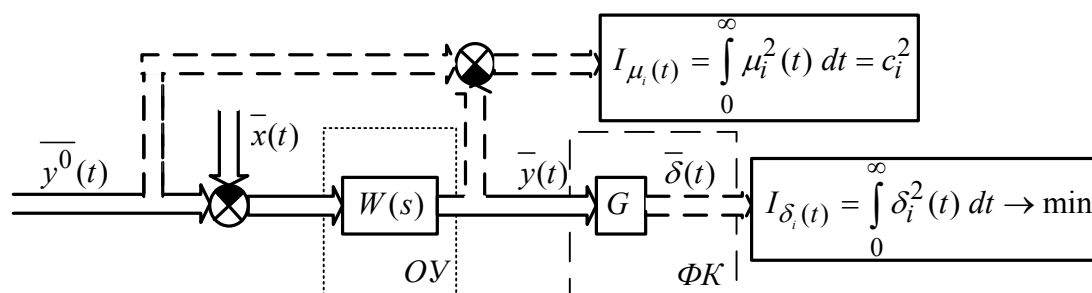


Рисунок 6 – Статический режим (автономное управление)

Алгоритм синтеза координирующего воздействия $\bar{x}(t)$, отрабатывающего поддержание требуемых зависимостей между выходными переменными на статическом режиме (рисунок 6):

1) критерий оптимальности имеет вид (2), откуда находим вид подынтегрального выражения критерия оптимальности

$$D = \sum_{m=0}^M \lambda_m D_m \rightarrow \min, \quad \text{где } D_k \leq c_k^2,$$

где $\lambda_0 = 1$, λ_k ($k = 1, 2, \dots, M$) – множители Лагранжа,

$$D_m = \frac{1}{2\pi i} \int_{-i\infty}^{i\infty} Q_m(X_1(s), X_2(s), \dots, X_n(s), X_1(-s), X_2(-s), \dots, X_n(-s)) ds;$$

2) продифференцировать подынтегральное выражение по $X_j(-s)$, $j = 1, 2, \dots, n$;

3) используя операции факторизации и сепарации найти комплексные дробно-рациональные функции $X_j(s)$, ($j = 1, 2, \dots, n$);

4) найти неопределенные множители Лагранжа $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$, от которых зависят функции $X_j(s)$. Для этого необходимо подставить найденные функции $X_j(s)$ в ограничения.

Далее необходимо синтезировать желаемые передаточные функции $V(s)$ замкнутой системы относительно ранее полученных координирующих воздействий $\bar{x}(t)$ (рисунок 7).

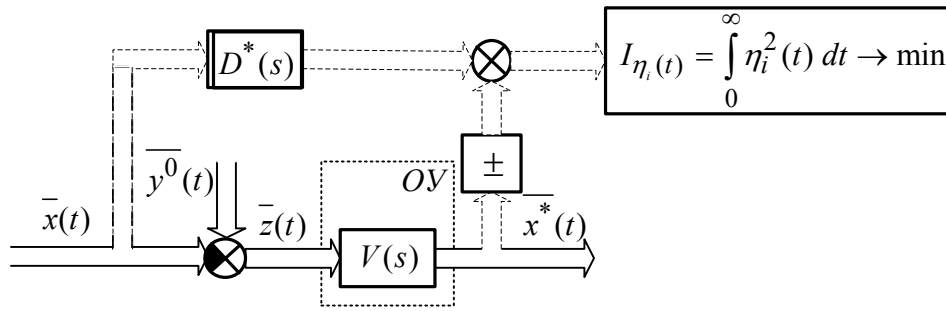


Рисунок 7 – Замкнутая система с желаемыми передаточными функциями

Поскольку следующим шагом синтеза будет синтез контура координирующего управления, который будет обеспечивать эквивалентность СКУ и системы с желаемыми передаточными функциями, необходимо выразить желаемые выходные координаты $x_i^*(t)$ (рисунок 7) и выходные координаты СКУ $x_i(t)$, $i = \overline{1, n}$ (рисунок 2). Эквивалентность двух систем будет достигаться при равенстве $x_i^*(t)$ и $x_i(t)$. Из этих равенств выражаем $V_{ij}(s)$ и $K_i(s)$, $i, j = \overline{1, n}$ через $V_{11}(s)$.

Алгоритм синтеза желаемых передаточных функций замкнутой системы и регуляторов контура координации:

5) необходимо найти вид подынтегрального выражения критерия

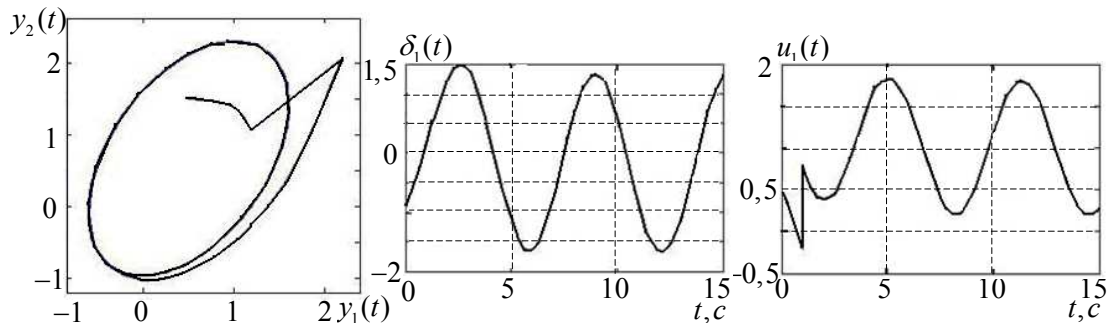
$$\text{оптимальности } I_{\eta_1} = \frac{1}{2\pi j} \int_{-j\infty}^{j\infty} Q_m(V_{11}(s), V_{11}(-s)) ds \rightarrow \min;$$

6) продифференцировать подынтегральное выражение по $V_{11}(-s)$;

7) используя операции факторизации и сепарации найти вид передаточных функций $V_{11}(s)$;

8) из полученных соотношений выразить $V_{ij}(s)$, $i, j = \overline{1, n}$, зависящие от $V_{11}(s)$;

9) регуляторы контура координирующего управления $K_i(s)$, $i = \overline{1, n}$ будут найдены из ранее полученных выражений $K_i(s)$, $i = \overline{1, n}$, зависящих от $V_{11}(s)$.



a

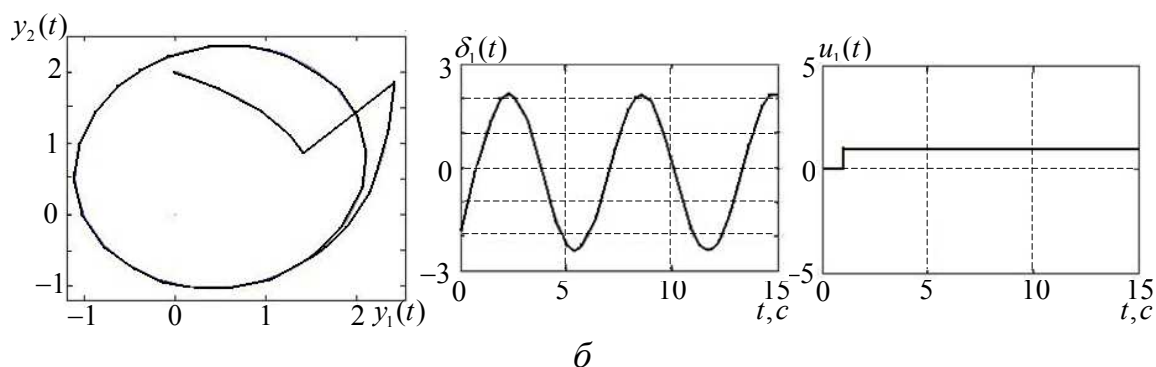


Рисунок 8 – Переходные процессы зависимости выходных координат, ошибок координации и ошибки управления при введении контура координирующего управления (а), без введения контура координирующего управления (б)

Исследуется динамическая точность синтезированной СКУ (структурная схема представлена на рисунке 4). На рисунках 8.а и 8.б представлены графики переходных процессов зависимости выходных координат, ошибки координации и ошибки управления в системах с контуром (без контура) координированного управления (при моделировании на каналы действовали гармонические возмущения).

Как видно из графиков движения системы введение контура координации обеспечивает более высокую точность координации, но при этом повышается ограничения, накладываемые на управление. Ошибки координации и ошибки управления взаимно влияют друг на друга: уменьшение одной ошибки ведет к увеличению другой.

В четвертой главе выполнено исследование эффективности предложенных методов и алгоритмов координированного управления применительно к системам управления фазой вращения винтовентиляторов ТВВД (изд. САУ СВ-34) установленного на пассажирском самолете Ил-114 с целью снижения уровня шума в салоне многомоторного самолета и акустического воздействия на окружающую среду.

На рисунке 9 приведена структурная схема системы синхрофазирования винтовентиляторов в составе САУ СВ-34 с контуром координирующего управления.

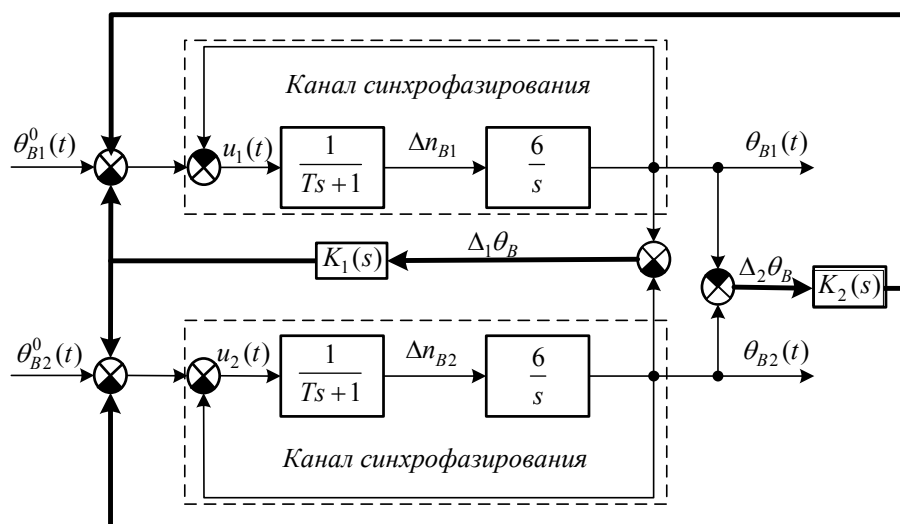


Рисунок 9 – Структурная схема системы синхрофазирования винтовентиляторов САУ СВ-34 с контуром координированного управления

Здесь $\theta_{B1}(t)$, $\theta_{B2}(t)$ – фазы вращения первого и второго винтовентиляторов, $\Delta n_{B1}(t)$, $\Delta n_{B2}(t)$ – отклонения частот вращения от заданного значения, T – постоянная времени передаточной функции контура управления частотой вращения винтовентиляторов.

В связи с тем, что система синхрофазирования может функционировать на двух режимах управления фазой вращения винтовентиляторов (автономное и координированное управление), проведен синтез системы координированного управления фазой вращения для многорежимных систем.

Амплитудно-фазовые характеристики координирующих воздействий на статическом режиме $X_1(s) = -0,03$, $X_2(s) = 0,03$. Желаемые передаточные функции замкнутой системы $V_{11}(s) = V_{21}(s) = V_{12}(s) = V_{22}(s) = \pm \frac{s}{2s + 0,3}$.

Регуляторы контура координирующего управления

$$K_1(s) = K_2(s) = \frac{0,5s}{2s + 0,3}. \quad (3)$$

На рисунках 10 приведены экспериментальные исследования системы синхрофазирования с синтезированными регуляторами контура координации (2).

На рисунке 10, а приведены переходные процессы фаз вращения θ_{B1} , θ_{B2} винтовентиляторов, на рисунке 10, б – изменение отклонений частот вращения винтовентиляторов от установившихся значений Δn_{B1} , Δn_{B2} , на рисунке 10, в, г – ошибки координации $\Delta\theta_{B1}$, $\Delta\theta_{B2}$.

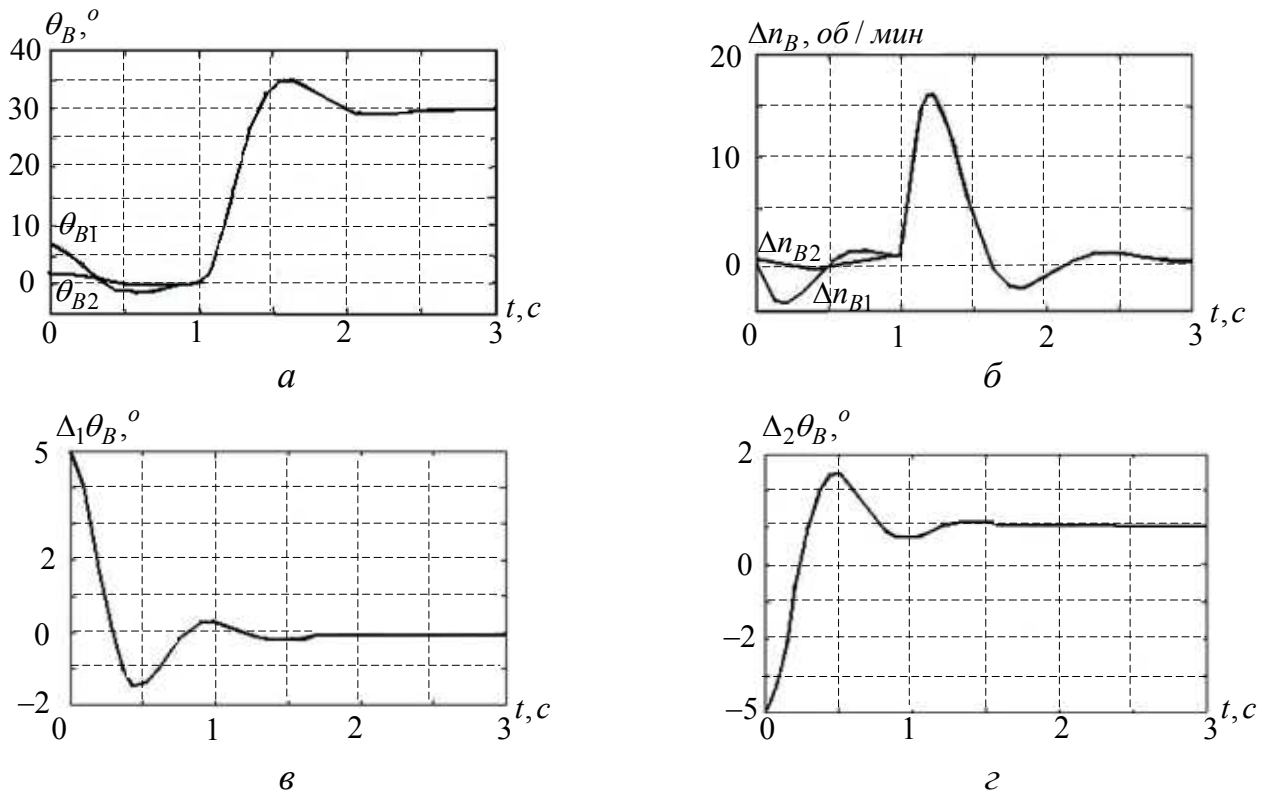


Рисунок 10 – Переходные процессы синхροфазирования при начальном рассогласовании $\theta_{B1}(t_H) = 7^\circ$, $\theta_{B2}(t_H) = 2^\circ$

Проведенное экспериментальное исследование эффективности использования предложенного метода синтеза СКУ в системе синхροфазирования винтовентиляторов СВ-34 показало, что применение алгоритмов синтеза СКУ в системах синхροфазирования винтовентиляторов ТВВД обеспечивает, по сравнению с базовой (автономное управление):

- повышение статической точности по фазе в 1,5–2 раза;
- система обладает высокой помехозащищенностью и повышает статическую точность по фазе при различных начальных условиях фаз вращения в 1,5 раза;
- повышает грубость системы, т. е. относительную инвариантность качества управления по отношению к условиям полета.

На рисунке 11 приведена сравнительная диаграмма разности фаз вращения винтовентиляторов при различных начальных условиях рассогласования.

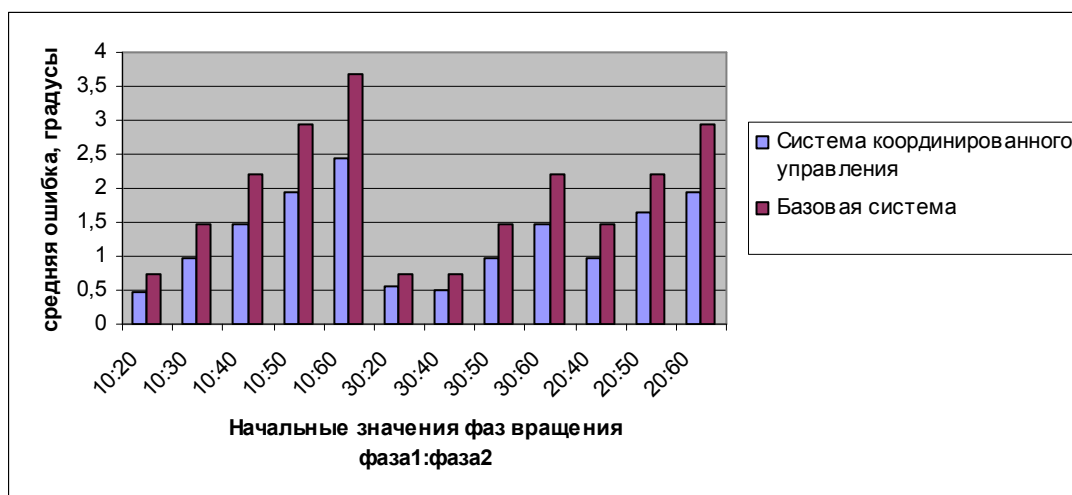


Рисунок 11 – Сравнительная диаграмма разности фаз вращения винтовентиляторов при различных начальных условиях рассогласования

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Векторно-матричная модель линейных систем координированного управления, основанная на введении дополнительного контура координации, отличается тем, что позволяет представить систему координированного управления в виде МСАУ с голономными связями между подсистемами, охваченной неединичной обратной связью, и тем самым упростить анализ процессов координирования путем применения известного аппарата исследования МСАУ с однотипными подсистемами.

2. Алгоритм исследования запасов устойчивости линейных однотипных систем координированного управления, предусматривающий определение коэффициентов передачи контура координации, обеспечивающих запас устойчивости по амплитуде и по фазе хорошо демпфированной системы. Предложенный алгоритм отличается тем, что на основе предложенной векторно-матричной модели характеристическое уравнение системы можно представить в системной форме на основе частных характеристик сепаратных подсистем и связей между ними, а для исследования устойчивости можно применить частотный критерий устойчивости однотипных МСАУ с голономными связями между подсистемами.

3. Алгоритм оценки статической точности линейных систем координированного управления, предусматривающий использование предложенной в работе векторно-матричной модели, отличается тем, что с помощью рекурсивных процедур вычисляются матричные коэффициенты ошибок замкнутой системы координированного управления.

4. Алгоритмы аналитического синтеза линейных систем координированного управления, предусматривающие наличие в системе ограничений на ресурсы управления (показатели качества сепаратных подсистем), отличается тем, что синтез указанного управления осуществляется с использованием общей вариационной задачи на базе предложенной векторно-матричной модели.

5. Инженерная методика и техническое решение задачи синтеза регулятора контура координирующего управления для системы синхрофазирования

одинокных винтовентиляторов СВ-34 на основе предложенных алгоритмов аналитического синтеза линейных систем координированного управления, отличается тем, что с целью повышения точности синхрофазирования винтовентиляторов в систему добавляется контур координирующего управления, использующий в качестве дополнительной управляемой переменной величины разности фаз вращения двух винтовентиляторов.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

В рецензируемых изданиях ВАК

1. Исследование устойчивости систем координированного управления / Ю. С. Кабальнов, А. В. Маргамов, Е. А. Смирнова // Вестник УГАТУ : науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Сер. Управление, информатика и вычислительная техника. 2009. Т. 12, №1 (30). С. 46–52.

2. Анализ статической точности систем координированного управления / Ю. С. Кабальнов, И. В. Кузнецов, Е. А. Смирнова // Вестник УГАТУ : науч. журн. Уфимск. гос. авиац. техн. ун-та. Сер. Управление, информатика и вычислительная техника. 2009. Т. 13, № 2 (35). С. 126–131.

В других изданиях

3. Исследование устойчивости однотипных многомерных систем координированного управления / А. В. Маргамов, Е. А. Смирнова // Мавлютовские чтения: матер. Всерос. молодежн. научн. конф. Уфа : УГАТУ, 2008. Т. 3, С. 90–92.

4. Анализ статической точности линейных систем координированного управления / Е. А. Смирнова // Актуальные проблемы в науке и технике : матер. 4-й всерос. зимн. шк.-сем. аспирантов и молодых ученых. Уфа : УГАТУ, 2009. С. 468–472.

5. Частотные методы анализа и синтеза систем координированного управления многоканальными объектами / И. В. Кузнецов, Е. А. Смирнова // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук : матер. 52-й всерос. науч. конференции (с междунар. участием). М. : МФТИ, 2009. С. 78–81.

6. Использование пакета SciLab для решения задач управления и наблюдения объектом с векторным входом / Е. А. Смирнова // Свободное программное обеспечение в образовании и профессиональной деятельности «Свободный полет – 2009» : матер. I Всерос. конф. (с междунар. участием). Уфа : Гелем, 2010. С. 145–151.

7. Аналитическое конструирование многорежимных систем координированного управления по показателям качества сепаратных подсистем / И. В. Кузнецов, Е. А. Смирнова // Проблемы техники и технологии телекоммуникаций : матер. XI междунар. науч.-техн. конференции. Уфа : УГАТУ, 2010. С. 131–133.

8. Анализ и синтез систем координированного управления динамическими объектами по показателям качества сепаратных подсистем / И. В. Кузнецов, Е. А. Смирнова // Современные проблемы фундаментальных и прикладных наук : матер. 53-й всерос. науч. конференции (с междунар. участием). М. : МФТИ, 2010. С. 94-95.

Диссертант

Е.А. Смирнова

СМИРНОВА Елена Александровна

АНАЛИЗ И СИНТЕЗ
СИСТЕМ КООРДИНИРОВАННОГО УПРАВЛЕНИЯ
ДИНАМИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ
ПО ПОКАЗАТЕЛЯМ КАЧЕСТВА
СЕПАРАТНЫХ ПОДСИСТЕМ

Специальность 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации
(в промышленности)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 27.10.10. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать плоская. Гарнитура Таймс.
Усл. печ. л. 1,0. Усл. кр.-отт. 1,0. Уч.-изд. л. 0,9.
Тираж 100 экз. Заказ № 425.

ГОУ ВПО Уфимский государственный авиационный технический университет
Центр оперативной полиграфии
450000, Уфа-центр, ул. К.Маркса, 12