

005-1112

Министерство образования Кыргызской Республики
Кыргызский Государственный Технический университет
им. И.Раззакова

Специализированный Совет Д 05.05.286

На правах рукописи

ЛЫЧЕНКО НАТАЛЬЯ МИХАЙЛОВНА

**СИНТЕЗ ОПТИМАЛЬНЫХ И РОБАСТНЫХ
АЛГОРИТМОВ С ПАРАЛЛЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКОЙ
ИНФОРМАЦИИ ДЛЯ ЗАДАЧ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО
УПРАВЛЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИМИ СИСТЕМАМИ**

Специальность: 05.13.01

Системный анализ, управление и обработка информации

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Бишкек 2005

Надежность и эффективность управления с учетом особенностей реальных систем требуют развития *новых технологий проектирования на базе децентрализации и учета неопределенностей*.

Среди разнообразия иерархических методов, существующих для решения различных оптимизационных задач, недостаточно разработаны *методы, требующие учета ограничений-неравенств на переменные состояния, управления и взаимосвязи подсистем*. Эти задачи являются актуальными для практики, так как отражают конструктивные и технологические особенности реальных объектов управления. Важной проблемой при этом является развитие таких методов, которые дают возможность проектирования алгоритмов координированного управления с простой вычислительной структурой. Еще более актуальной задачей становится, когда речь идет об оптимизации нелинейных систем с ограничениями-неравенствами.

Кроме того, несомненно актуальным является применение декомпозиционного подхода и многоуровневых методов оптимизации для решения конкретных практических оптимизационных задач.

Исследования и разработки, представленные в диссертации, выполнены в соответствии с проектом НИР "Разработка теории, компьютерных и аппаратных средств автоматизации и информатизации управления, обнаружения и идентификации технических объектов", выполняемым в Институте автоматизации НАН КР и в соответствии с планами НИР КРСУ.

Целью работы является разработка на базе современных технологий обработки информации и системного анализа теоретических методов и алгоритмов децентрализованного управления структурно и функционально сложными динамическими системами.

Основные задачи, определяемые поставленной целью, состоят в разработке:

- методов и алгоритмов оптимального децентрализованного управления с параллельной обработкой информации в условиях неопределенностей;
- распараллеленной технологии проектирования робастных алгоритмов децентрализованного управления;
- программно-алгоритмических средств, реализующих предложенные методы и алгоритмы.

Методы исследования базируются на использовании аппарата теории иерархического управления, теории оптимального и робастного управления, теории матриц, дифференциальных и конечно-разностных уравнений, устойчивости, методов имитационного моделирования.

Объектом исследований в диссертации являются сложные производственные, технологические и экономические системы, обладающие следующими основными характеристиками:

- неопределенностью описания, при этом существенные неопределенности имеются в подсистемах и во взаимосвязях;
- большой размерностью - такие системы или невозможно, или неэкономично рассматривать как одно целое, поэтому необходимо использовать технику декомпозиции;
- ограничением на информационную структуру, делающим традиционные методы синтеза систем управления трудными для применения даже в системах малой размерности;
- наличием нелинейностей в моделях описания, без учета которых при синтезе трудно представить себе современные задачи построения высококачественных систем управления.

Научная новизна. Разработан метод синтеза оптимальных координированных децентрализованных управлений на базе предложенной иерархической итерационной схемы с параллельной обработкой информации. В рамках предложенного метода разработаны алгоритмы оптимального управления непрерывными, дискретными и гибридными системами с модифицированным квадратичным критерием и с несепарабельным критерием общего вида. Аналитически и в результате компьютерного моделирования показано, что предложенный метод синтеза имеет вычислительные выгоды в сравнении с ранее известными.

Разработан метод иерархической оптимизации динамических систем большой размерности с ограничениями-неравенствами на переменные управления, состояния и взаимосвязи, в котором для учета этих ограничений введен дополнительный промежуточный уровень. Предложенный специальный выбор матриц проектирования позволил сделать вычисления коэффициента обратной связи в законе управления независимыми от итерационно вычисляемых координирующих параметров промежуточного уровня. На базе разработанного метода синтезированы алгоритмы

оптимального управления непрерывными, дискретными и гибридными системами с квадратичным критерием и с несепарабельным критерием общего вида.

Синтезированы координированные децентрализованные алгоритмы управления непрерывными и дискретными нелинейными системами с интервальными неопределенностями и возмущениями. Показано, что в рамках замкнуто-разомкнутой структуры управления можно добиться определенных свойств робастности на этапе синтеза.

Предложена процедура проектирования динамических децентрализованных компенсаторов для непрерывных линейных динамических систем с неизвестными возмущениями, заданными в виде некоторых дифференциальных уравнений известной структуры, позволяющая сделать систему оптимальной в смысле квадратичного критерия и наделить систему свойствами робастности при возмущениях.

На базе свойств блочно-диагональной доминантности матриц разработана процедура децентрализованного проектирования алгоритмов децентрализованного робастного управления. В рамках разработанной процедуры синтезированы алгоритмы управления для линейных взаимосвязанных систем большой размерности с неопределенностями в параметрах и в измерениях. При этом для проектирования локальных контроллеров используется только локальная априорная информация о неопределенностях моделей подсистем.

Разработаны модели в пространстве состояний и сформулированы задачи иерархической оптимизации водно-солевых балансов территориального района, разбитого на блоки. При этом состояния отражают запасы воды и соли в исследуемых блоках, а управлениями являются приходно-расходные статьи водного баланса и концентрации солей в них. Синтезированы трехуровневые алгоритмы оптимизации водно-солевых балансов. Процедура синтеза позволяет учитывать нижние и верхние допуски на значения приходно-расходных статей баланса, концентраций солей и невязок баланса с большим количеством переменных.

Практическая ценность. Разработанные методы и алгоритмы могут быть применены в различных отраслях промышленности при решении задач автоматизации сложных систем с децентрализованной структурой управления в условиях неполной информации. Они ориентированы на распараллеленную технологию обработки информации, имеют типо-

вую унифицированную структуру для широкого круга инженерных задач, просты и удобны в применении, позволяют легко реализовывать одно из главных достоинств децентрализованных структур управления - модульность построения алгоритмических, программных и технических средств.

Разработанные новые унифицированные блоки в подсистеме Ма1;БаБ/31тиИпк могут применяться при создании компьютерных моделей для синтеза законов координированного децентрализованного управления для задач в различных постановках и для различных структур декомпозиции.

Реализация и внедрение результатов. В рамках использования современных технологий обработки информации разработана компьютерная система для решения задач расчета и оптимизации водно-солевых балансов территориальных районов с картографической привязкой экспериментальных и расчетных соотношений к административно-хозяйственным территориям.

Разработанная компьютерная система внедрена в эксплуатацию в хозяйствах Министерства сельского, водного хозяйства и перерабатывающей промышленности Кыргызской Республики.

Пакет прикладных программ для проектирования и исследования координированных децентрализованных систем управления, представленный на сайте МаБлаБ.ги, использован в Астраханском Государственном Техническом Университете и в ФГОУ ВПО Костромской ГСХА при проведении научно-исследовательских работ.

Результаты диссертации использованы в лекционных и практических курсах в Кыргызско-Российском (Славянском) университете и в Международном университете Кыргызстана.

Апробация работы. Основные положения диссертации представлены: на II Азиатской конференции по управлению ТЬе 2т<1 А51ап Соп1го1 СопГрегпсе, (1997г., Сеул, Корея); на Международной конференции Оупаш1са1 ЗузЬега: 51аБЫу, Соп1го1, ОрИпигаНоп, (1998г., Минск); на 6 ом Международном С. -Петербургском симпозиуме по теории адаптивных систем, поев, памяти Я.З. Цыпкина, (1999г., С. -Петербург), на Международной конференции ТЬе 71Ь ШЕЕ МесИпеттаеап СопГ. оп СоШто! &; Аи1отаЦоп, (1999г., Хайфа, Израиль); на Международной кон-

ференции по проблемам управления, поев. 60- летию Института проблем управления РАН им. В.А.Трапезникова, (1999г., Москва); на Международном совещании 1ГАС ТЪе ШБ 1РАС 1плегпаЮпап \УогкЗбор "Соп1го1 АррПсаНопз оГ ОрИпигаНоп", (2000г., С. -Петербург); на Международной конференции "Аналитическая теория автоматического управления и ее приложения", (2000г., Саратов); на I Всероссийской научной конференции "Проектирование инженерных и научных приложений в среде Ма1БаБ", (2002г., Москва); на X Международной конференции "Математика, компьютер, образование", (2003г., Москва); на научно-технической конференции, поев. 10-летию образования КРСУ, (2003г., Бишкек); на II Международной конференции "Идентификация систем и задачи управления ЗЮРКО'ОЗ", (2003г., Москва); на II Всероссийской научной конференции "Проектирование научных и инженерных приложений в среде Ма1БаБ", (2004г., Москва); на Международных конференциях по электронике и компьютерным наукам в Кыргызстане 1КЕССО'2004, 1КЕССО'2005, Бишкек).

Публикации. Основное содержание работы опубликовано в 25 работах и монографии.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, приложений. Она содержит: основного текста 271 стр., рис. 52, таблиц 6.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

1. Оптимальное координированное децентрализованное управление непрерывными системами на базе двухуровневой иерархической процедуры с параллельной обработкой информации

В данном разделе излагается предложенный метод синтеза координированных децентрализованных алгоритмов оптимального управления непрерывными системами большой размерности с использованием параллельной обработки информации при определении координирующих переменных.

Изложению идеи, положенной в основу этого метода, посвящен п. 1.1.

Рассматривается нелинейная непрерывная динамическая система, состоящая из совокупности M подсистем в предположении, что в ней можно выделить линейную часть так, что модель системы может быть представлена во взаимосвязной форме записи следующим образом:

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t), \quad x_i(0) = x_{i0}, \quad i = 1, \dots, M. \quad (1)$$

Здесь $x_i(t) \in \mathbb{R}^{n_i}$ - векторы состояний и управлений i -той подсистемы; $x^0 \in \mathbb{R}^n$ - заданное начальное состояние i -той подсистемы; $A_i \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$ и $B_i \in \mathbb{R}^{n_i \times m_i}$ - матрицы коэффициентов, характеризующие динамику линейных подсистем (пары A_i, B_i управляемы), непрерывно дифференцируемые по t и функции $\langle p_i(x, u, t) \rangle$, удовлетворяющие необходимым условиям гладкости для существования, единственности и непрерывности решения при произвольных начальных условиях, включают в себя нелинейные части динамики подсистем и взаимосвязи между подсистемами, некоторые известные функции, соответствующие измеряемым возмущениям.

В качестве критерия оптимальности всей взаимосвязанной системы принят функционал, в котором можно выделить (или он изначально содержит) квадратическую сепарабельную часть и несепарабельную часть $\Phi_{ns}(x, u, t)$, представляющую собой некоторую выпуклую функцию:

$$J = \int_0^T \Phi_m(x, u, t) dt + \Phi_n(x, u, T) \quad (2)$$

где

Оптимизационная задача формулируется следующим образом:

найти управления по подсистемам $u_i(t), i = 1, \dots, M$, которые минимизируют показатель качества всей взаимосвязной системы (2) при динамических ограничениях (1).

Метод решения. В соответствии с декомпозиционно-координационным подходом предполагается, что верхний уровень обеспечивает равенства

$$x_i(t) = x_i^*(t), \quad \dot{x}_i^*(t) = A_i x_i^*(t) + B_i u_i^*(t) \quad (3)$$

и передает значения $\bar{x}(t)$ и $\bar{u}(t)$, называемые *координирующими переменными*, на нижний уровень.

Тогда модель i -той подсистемы (1) представима в виде:

$$\dot{x}_i(t) = A_i x_i(t) + B_i u_i(t) + \varphi_i(\bar{x}, \bar{u}, t) + \mu_i(t), \quad x_i(t_0) = x_{i0}, \quad \forall i = 1, \dots, M. \quad (4)$$

Кроме того, используя переданные с верхнего уровня координирующие переменные (3), фиксируются несепарабельные части в критерии (2), что позволяет сделать его аддитивно сепарабельным.

В результате исходная задача оптимизации распадается на M подзадач, каждая из которых формулируется как следующая эквивалентная оптимизационная задача (ЭОЗ):

минимизировать

$$\begin{aligned} J &= \phi_{1ns} \bar{x}(t_f) + \int_{t_0}^{t_f} (\psi_{ns}(\bar{x}, \bar{u}, t) dt) + \sum_{i=1}^M J_i \\ &= \sum_{i=1}^M \left(\frac{1}{2} \|x_i(t_f)\|_{Q_{1i}}^2 + \frac{1}{2} \|x_i(t_f) - \bar{x}_i(t_f)\|_{Q_{2i}}^2 + \phi_{1nsi}(\bar{x}(t_f)) \right) \\ &\quad + \sum_{i=1}^M \int_{t_0}^{t_f} \left(\frac{1}{2} (\|x_i(t)\|_{Q_{1xi}}^2 + \|u_i(t)\|_{R_i}^2 \right. \\ &\quad \left. + \|x_i(t) - \bar{x}_i(t)\|_{Q_{2xi}}^2 + \|u_i(t) - \bar{u}_i(t)\|_{Q_{2ui}}^2) + \psi_{nsi}(\bar{x}, \bar{u}, t) \right) dt \end{aligned} \quad (5)$$

при ограничениях (3, 4).

Для решения ЭОЗ формируется гамильтониан, после чего из необходимых условий оптимальности следуют алгоритмы итеративной двухуровневой процедуры, которая имеет две отличительные особенности:

- на верхнем уровне формируются координирующие переменные, обеспечивающие сходимость процедуры к оптимальному для полной системы решению,
- на нижнем уровне независимо решаются оптимизационные задачи для каждой подсистемы при фиксированных координирующих переменных.

В работе предложено для решения этих оптимизационных задач использовать параллельные вычисления, при этом координирующие переменные не являются общими для всех подсистем и фиксированными на всей

итерации приближения к оптимальному решению, а переопределяются для каждой из подсистем по мере появления информации об их состояниях.

Пусть каждая ОЗ обрабатывается отдельным процессором. В этом случае для подсистем меньшей размерности ОЗ будут решаться быстрее, а значит, состояния $x_i(t)$ и управления $u_i(t)$ этих подсистем будут появляться раньше, чем для подсистем большей размерности. Предложено использовать эту новую информацию с целью переопределения координирующих переменных для подсистем, обработка которых процессором еще не завершилась. Верхний уровень включается в процесс параллельной обработки информации таким образом, что в течении одной l -той итерации приближения решения к конечному (оптимальному) решению координирующие переменные будут верхним уровнем M раз (по числу подсистем) переопределяться и вновь передаваться на нижний уровень (рис. 1).



Рис. 1: Параллельная обработка информации в двухуровневой структуре решения оптимизационной задачи.

Здесь векторы координирующих переменных $\bar{x}(t), \bar{u}(t)$ изменяются на протяжении l -той итерации, что иллюстрирует символ δ_j при номере итерации l и определены только на период (t_{j-1}, t_j) обработки процессором

7-той подсистемы:

$$\begin{matrix} \Gamma & \text{Ц.} & * & e & [1,-1,1] \\ - & \Gamma & \text{Ц.} & * & e & [1,-1,1] \\ - & \Gamma & \text{Ц.} & * & e & [1,-1,1] \end{matrix}$$

Γ - время, требуемое процессору для решения уравнения состояния \wedge -той подсистемы.

Предложенная идея переопределения координирующих переменных по мере поступления информации о состояниях подсистем применена для решения оптимизационных задач управления непрерывными системами в различных постановках.

В п. 1.2 и п. 1.3 синтезированы алгоритмы оптимального управления взаимосвязанными линейными нестационарными и стационарными системами с модифицированным квадратичным критерием, в который введены добавки, позволяющие штрафовать отклонения состояний и управлений в соответствии с их знаком:

$$\wedge = \Pi \cdot \left(\frac{X}{L_0} \right) \ddot{Y} + \Gamma \left(\Pi X(1) \right) \left| \right|^2 + \Pi \left(\left(O \right) \left| \right|^2 + 2m^m(1) \ddot{y} + 2i^r(0) \Gamma \right) L,$$

где $e \ll \dots \ll C?$, $= \text{в т} > 0$, $\ll_{\text{лх}} e = > 0$, $\text{п е } K^{n \times n}$, $m, n = E, = 1$ т., $K = K^r > 0$, $\ll_{2и} \Pi$ - полные матрицы.

Задачи оптимального управления с такими предпочтениями, т.е. когда требуется, чтобы определенные компоненты управления (или состояния) были положительными или отрицательными большую часть времени, часто встречаются на практике.

В п.1.4 представлена процедура синтеза **алгоритмов** координированного децентрализованного управления взаимосвязанными линейными системами большой размерности, при этом задание требуемой динамики для каждой из подсистем формализуется с помощью введения эталонных динамических моделей:

$$\ddot{X}_{\text{шт}} = A_{\text{т}} \{ X_{\text{т}} \} + B_{\text{т}} \{ u_{\text{т}} \}, \quad x_{\text{т}}(1_0) = x_{\text{т}a}, \quad V \quad \Gamma = 1, \dots, M.$$

Для синтеза управляющих воздействий исходная задача сформулирована как оптимизационная с критерием, построенным на разности между состояниями возмущенных подсистем и децентрализованных эталонных моделей:

$$23 = 11 e(1) \quad m + \frac{L}{L_0} \left(\left| \right| e(1) \right) + \left| \right| u(1) \left| \right|^2 \wedge L,$$

$$e \ll (\ll) = x^{\wedge}(\wedge) - x_{m_i}(1).$$

В п. 1.5 предложен иерархический метод решения оптимизационных задач для нелинейных динамических систем (1). При этом в качестве критерия оптимальности принят выпуклый функционал (2).

Для всех рассмотренных задач разработаны двухуровневые итеративные процедуры синтеза управляющих воздействий с параллельными вычислениями координирующих переменных. Эти процедуры составляют суть метода декомпозиционно-координационной оптимизации с параллельной обработкой информации в двухуровневой структуре решения.

Базовая итеративная процедура синтеза управляющих воздействий.

Шаг 1. Решить уравнения Риккати для каждой из M подсистем; последовательности решений запомнить.

Шаг 2. Задать начальный вектор координирующих переменных для всех подсистем, итерационный индекс $I = 1$.

Шаг 3. Решать оптимизационные задачи параллельно для всех подсистем.

Шаг 4. Переопределять вектор координирующих переменных используя информацию о состояниях \wedge -той подсистемы по мере ее поступления. Шаги 3 и 4 повторяются не больше M раз и завершаются вычислением полных векторов состояний и управляющих воздействий.

Шаг 5. Увеличить итерационный индекс $I = I + 1$.

Шаг 6. Переопределить вектор координирующих переменных.

Шаг 7. Вычислить норму разности координирующих переменных на текущей и предыдущей итерации. Если разность достаточно мала, расчеты прекращаются, иначе - переход к шагу 3, на новый цикл поиска оптимального решения.

Использование метода декомпозиционно-координационной оптимизации с параллельной обработкой информации позволило сделать итеративные процедуры синтеза алгоритмов более эффективными и получить лучшие показатели в сравнении с традиционными, что подтверждено результатами моделирования (п.1.8). В п.1.7 доказана сходимости предложенных иерархических алгоритмов оптимизации.

Структура управления для всех постановок имеет замкнуто-разомкнутый вид:

$$\ll, (*) = \dots + \ll' (*) \cdot \quad (6)$$

Обратные связи от состояний – линейные, с коэффициентом обратной связи $K_i(P_i)$, P_i – решения уравнений Риккати (для устойчивых подсистем – уравнений Ляпунова). Программные (координирующие) составляющие $u_i^c(t)$ отражают взаимодействия между подсистемами, нелинейности и несепарабельность критерия. Структура управления представлена на рис. 2.

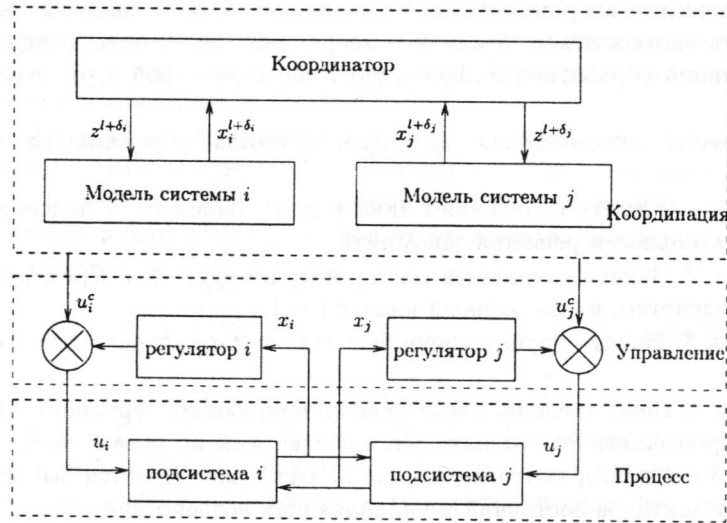


Рис. 2: Структурная схема управления.

2. Двухуровневый синтез алгоритмов оптимального координированного децентрализованного управления дискретными динамическими системами с параллельными вычислениями

В этом разделе диссертационной работы метод декомпозиционно-координационной оптимизации с параллельной обработкой информации в двухуровневой структуре решения распространен на задачи оптимального управления дискретными динамическими системами.

В общем виде задача оптимизации формулируется следующим образом (п.2.2):

найти векторную управляющую последовательность $u_i[k]$, $i = 1, \dots, M$, удовлетворяющую нелинейным ограничениям

$$\begin{aligned} x_i[k+1] &= A_i[k]x_i[k] + B_i[k]u_i[k] + \varphi_i(x, u, k) + \mu_i[k], \\ x_i[0] &= x_{i0}, \quad \forall i = 1, \dots, M \end{aligned} \quad (7)$$

и доставляющую минимум несепарабельному функционалу:

$$J = \|x[N]\|_{Q_1}^2 + \sum_{k=0}^{N-1} \{ \|x[k]\|_{Q_{1xd}}^2 + \|u[k]\|_{R_d}^2 + \psi(x, u, k) \}. \quad (8)$$

Здесь $x_i[k] \in \mathbb{R}^{n_i}$ и $u_i[k] \in \mathbb{R}^{m_i}$ – векторы состояния и управления i -той подсистемы, $A_i[k] \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$, $B_i[k] \in \mathbb{R}^{n_i \times m_i}$ – матрицы переменных коэффициентов, характеризующих динамику i -той подсистемы, $Q_{1xd} \in \mathbb{R}^{n \times n}$, $R_d \in \mathbb{R}^{m \times m}$, $\varphi_i(x, u, k)$ – нелинейные функции, удовлетворяющие необходимым условиям гладкости для существования, единственности и непрерывности решения при произвольных начальных условиях, включающие в себя взаимосвязи, $\mu_i[k]$ – некоторые известные функции дискретного времени k , $\psi(x, u, k)$ – выпуклая функция.

Метод решения. Также, как и для задач в непрерывном времени, предполагается, что взаимосвязи фиксируются верхним уровнем:

$$\bar{x}_i[k] = x_i[k], \quad \bar{u}_i[k] = u_i[k], \quad (9)$$

что позволяет представить нелинейные составляющие в (7) и несепарабельную составляющую в (8) как некоторые известные функции $\varphi_i(\bar{x}, \bar{u}, k)$ и $\psi(\bar{x}, \bar{u}, k)$ и перейти к эквивалентной оптимизационной задаче в составной форме записи:

минимизировать по $u[k]$ функционал

$$\begin{aligned} J = & \|x[N]\|_{Q_1}^2 + \|x[k] - \bar{x}[N]\|_{Q_{2d}}^2 + \sum_{k=0}^{N-1} \{ \|x[k]\|_{Q_{1xd}}^2 + \|u[k]\|_{R_d}^2 + \\ & + \|x[k] - \bar{x}[k]\|_{Q_{2xd}}^2 + \|u[k] - \bar{u}[k]\|_{Q_{2ud}}^2 + \psi(\bar{x}, \bar{u}, k) \} \end{aligned} \quad (10)$$

при ограничениях

$$\begin{aligned} x_i[k+1] &= A_i x_i[k] + B_i u_i[k] + \varphi_i(\bar{x}, \bar{u}, k) + \mu_i[k], \quad x_i[0] = x_{i0}, \\ \bar{x}_i[k] &= x_i[k], \quad \bar{u}_i[k] = u_i[k]. \end{aligned} \quad (11)$$

Также, как и для непрерывных задач, процедура решения дискретной ЭОЗ - итеративная, двухуровневая. На нижнем уровне множество оптимизационных подзадач решается параллельно и имеет независимые друг от друга решения, в то время как на верхнем уровне координирующие переменные, принимая определенные значения, обеспечивают сходимость итеративной процедуры. При этом координирующие переменные переопределяются по мере поступления информации о состояниях подсистем.

В п.2.1 на базе метода декомпозиционно-координационной оптимизации с параллельной обработкой информации в двухуровневой структуре решения синтезированы алгоритмы оптимального управления для линейных систем с модифицированным квадратичным критерием:

$$2J = \sum_{k=k_0}^{N-1} \{ \|x[k]\|^2 + \|u[k]\|^2 + 2x'[k]d + 2u'[k]r \}. \quad (12)$$

В п. 2.3 представлена процедура синтеза алгоритмов координированного децентрализованного управления взаимосвязанными системами (7), выходы которых

$$y[k] = C^* u[k], \quad k = 1, \dots, N \quad (13)$$

должны отслеживать заданные эталонные траектории $y^*[k]$, $k = 1, \dots, M$, где $y^*[A] \in \mathbb{R}^{n \times 1}$ - некоторые известные функции дискретного времени.

Для синтеза управляющих воздействий исходная задача формулируется как оптимизационная с критерием, построенным на ошибке слежения

$$J = \sum_{k=k_0}^{N-1} \|e[k]\|^2 \quad (14)$$

найти управления $u[k]$, $k = 1, \dots, M$, которые минимизируют функционал

$$J = \sum_{k=k_0}^{N-1} \{ \|e[k]\|^2 + \|u[k]\|^2 \} \quad (15)$$

при ограничениях (7), (13), (14).

В п. 2.4 параллельные вычисления применены для синтеза оптимальных управлений в гибридных системах большой размерности, состоящих из совокупности M взаимосвязанных подсистем, непрерывная часть ко-

торых - управляемый процесс, описывается дифференциальными уравнениями в состояниях:

$$\dot{x} = A x + B u, \quad x(0) = x_0 \quad (16)$$

а управляющие воздействия $u \in \mathbb{R}^m$ представляют собой кусочно-постоянные на каждом интервале непрерывного времени $[k, k+1]$ функции:

$$u(k) = m(k) = m[k], \quad u \in \{u^* | k = 0, 1, \dots, N-1\} = \{1, \dots, M\}. \quad (17)$$

Критерий качества для этой задачи - несепарабельный квадратичный. Задача решается путем перехода к эквивалентной оптимизационной задаче в дискретном времени.

Структура закона управления для всех рассмотренных задач - однотипная:

$$u[k] = -K(P)x[k] + u^*[k] \quad (18)$$

и представляет собой сумму двух составляющих - локальной с коэффициентом обратной связи $K(P)$ (P - решение уравнений Риккати, а для устойчивых подсистем - уравнений Ляпунова) и координирующей составляющей $u^*[k]$, учитывающей взаимодействие между подсистемами, нелинейности и возмущения.

В п.2.5 представлено аналитическое исследование сходимости двухуровневой вычислительной процедуры, а в п.2.6 - результаты моделирования. Так же, как и для задач в непрерывном времени, использование параллельной обработки информации при решении задач управления дискретными системами позволило получить вычислительные выгоды.

3. Декомпозиционно-координационный метод решения задач оптимизации в условиях ограничений-неравенств

В разделе предложен метод решения задач оптимизации взаимосвязанных систем в условиях ограничений-неравенств на переменные. При этом сохранена идеология метода декомпозиционно-координационной оптимизации с параллельной обработкой информации в двухуровневой структуре решения с добавлением в его структуру дополнительного вычислительного уровня, который решает задачу трансформации ограничений-неравенств в ограничения-равенства.

Рассматривается непрерывная взаимосвязанная система, модель которой описывается совокупностью дифференциальных уравнений вида:

$$x^{(*)} = Au_{\{1\}} + Bu_{\{2\}} + \langle n(x, u, B), \quad = x_{10}, \quad V^* = 1, \dots M. \quad (19)$$

На векторы состояния, взаимосвязи и управления наложены ограничения типа неравенств:

$$x^*_{\tau} < x_{\{i\}} < x_{iu}, \quad u_{\{m\}} < u_{\{B\}} < u_{iu}. \quad (20)$$

Здесь $X_{\tau}, X_{\{M\}}, \mu_{\tau}, \mu_{\{M\}}$ - минимально и максимально допустимые уровни состояний и управлений соответственно.

Оптимизационная задача заключается в нахождении управлений, минимизирующих в общем несепарабельный критерий качества

$$M = \Pi^*(\langle / \rangle) 11\partial, + /' (\Pi x_{\{1\}} + || u(1) H^2 \wedge + \Phi(x, u, 1)) 61. \quad (21)$$

при ограничениях (19) и (20).

Метод решения. В соответствии с декомпозиционно-координационным подходом взаимосвязи фиксируются согласно (3). Неравенства (20) преобразовываются в равенства, согласно методу штрафных функций, путем введения некоторых настраиваемых переменных $7\{1\}$ и

$$(*, \bullet(\langle \rangle) - x_{1m})^T (x_{iu} - y_A(*)) = 7\Gamma(*M\langle \rangle). \quad (22)$$

$$\{u_{\{1\}} - u_{2m}\}^m (u_{iu} - u_{\{1\}}) = zT(z)u(z). \quad (23)$$

Тогда оптимизационная задача модифицируется в следующую эквивалентную оптимизационную задачу:

минимизировать

$$\begin{aligned} * \rangle &= \Pi^*(/ \rangle) \text{Ид}, \dots * \Pi^x(/ \rangle) \sim^*(/ \rangle) 11\mu \\ &+ 1' \cdot [\Pi x(1) + || u(1) \wedge + \phi(x, \dot{u}, *)] 61 \\ &+ \quad [\Pi^* \langle \rangle - m + || \langle \rangle - *(*) || \wedge \langle \rangle] 61 \end{aligned} \quad (24)$$

при ограничениях

$$x_{\{1\}} = Au_{\{1\}} + Bu_{\{2\}} + \langle^{\wedge}(x, \dot{u}, I), \quad x_{\{10\}} = x_a, \quad (25)$$

а также (3), (22), (23).

Также, как и в предыдущих разделах, для решения последней оптимизационной задачи формируется гамильтониан, после чего из необходимых условий оптимальности следуют алгоритмы иерархической вычислительной процедуры. Иерархическая процедура - трехуровневая, в которой добавляется промежуточный уровень, учитывающий присутствие в задаче ограничений (20). На верхнем уровне вычисляются координирующие переменные, обеспечивающие сходимость процедуры к оптимальному для полной системы решению, на промежуточном уровне вычисляются настраиваемые переменные $7^*(*)$ и $\Gamma^*(*)$, и, наконец, на нижнем уровне вычисляются состояния и управления подсистем.

В работе предложено выбирать весовые матрицы локальных критериев в эквивалентной промежуточной задаче $\langle 22 \times \langle \rangle$ и фгшД(параметры проектирования) таким образом, чтобы уравнение Риккати, вычисляемое на нижнем уровне, было независимым к итеративно вычисляемым переменным промежуточного уровня.

Процедура решения оптимизационных задач с ограничениями-неравенствами на перемешанные имеет следующий вид.

Шаг 1. Для каждой γ -той подсистемы на нижнем уровне решить уравнения Риккати или уравнения Ляпунова.

Шаг 2. На верхнем, третьем уровне, для всех подсистем задать начальные траектории координирующих переменных $x^{\wedge}, \dot{u}(1)$, итерационный индекс $I = 1$.

Шаг 3. На втором, промежуточном уровне, задать начальные траектории промежуточных переменных $\gamma, \langle 4 \rangle, 7^*(\langle \rangle)$, учитывающих ограничения-неравенства, итерационный индекс промежуточного уровня $5 = 1$.

Шаг 4. Используя траектории, переданные с верхних уровней, определить матрицы $C \} 2$ и (ЗгиЛО в эквивалентной оптимизационной задаче. На нижнем уровне решать оптимизационные задачи параллельно для всех подсистем, вычисляя состояния и управления $X_{\{1\}}$ и $u_{\{1\}}$ $U_{\Gamma} = 1 \dots M$.

Шаг 5. Переопределять вектор промежуточных переменных $\gamma, \langle \rangle$ и 7 на втором уровне, используя информацию о состояниях и управлениях γ -той подсистемы по мере ее поступления. Шаги 4 и 5 повторяются не больше M раз и завершаются вычислением полных векторов состояний и управлений.

Шаг 6. Увеличить итерационный индекс $5 = 5 + 1$.

Шаг 7. Переопределить вектор промежуточных переменных z и $7(0-$

Шаг 8. Вычислить норму разности промежуточных переменных на текущей и предыдущей итерации z . Если норма достаточно мала, переход к шагу 9, в противном случае - переход к шагу 4.

Шаг 9. Переопределить вектор координирующих переменных. Итерационный индекс $I = I + 1$.

Шаг 10. Вычислить норму разности координирующих переменных на текущей и предыдущей итерации I . Если разность достаточно мала, расчеты прекращаются, иначе - переход к шагу 3, на новый цикл поиска оптимального решения.

Предложенный метод иерархической оптимизации динамических систем большой размерности с ограничениями неравенствами на переменные управления, состояния и взаимосвязи, в котором для учета этих ограничений введен дополнительный промежуточный уровень, применен для решения оптимизационных задач в различных постановках. Синтезированы алгоритмы оптимального управления с квадратическим критерием для линейных непрерывных систем (п.3.1) и для дискретных систем (п.3.3). В п.3.2 и п.3.4 идея метода распространена на задачи оптимизации с несепарабельным критерием для непрерывных и дискретных нелинейных систем. В п. 3.5 получены алгоритмы для гибридных систем при ограничениях на управления и состояния.

Для всех типов систем структура закона управления имеет замкнуто-разомкнутую структуру с локальной и координирующей составляющими, подобную (6). Такая типовая структура достигнута благодаря предложенному специальному выбору матриц **проектирования**, что позволило сделать вычисления коэффициента обратной связи в законе управления независимыми от итерационно вычисляемых координирующих переменных промежуточного уровня.

4. Робастное управление при наличии неизмеряемых возмущений и интервальных неопределенностей

В настоящем разделе исследованы вопросы построения робастных децентрализованных алгоритмов управления. Термин *робастность* подразумевает сохранение управляемой системой устойчивости в присутствии неопределенностей в параметрах модели и возмущений, неучитываемых при синтезе. Проектируются контроллеры фиксированной структуры с

коэффициентами, которые остаются неизменными на этапе функционирования и определяются на этапе синтеза с учетом априорной информации об ожидаемых диапазонах изменения параметров системы и возмущений.

Для успешного практического применения систем управления большими динамическими объектами, состоящими из взаимодействующих подсистем, отдельные блоки управления должны не только реализовываться, но и проектироваться децентрализованно. Это требование актуально, поскольку во многих практических приложениях существуют не только информационные ограничения на доступность каждому локальному блоку текущей информации (локальные выходы подсистем), но для проектирования каждого контроллера может быть использована также только локальная априорная информация о неопределенностях моделей.

В работе предложена технология децентрализованного проектирования робастных систем, при котором проектирование опирается для каждой подсистемы только на локальную информацию (априорную и апостериорную).

Исследуется класс частично неопределенных систем, модели которых описываются взаимосвязанными дифференциальными (конечно-разностными) уравнениями.

Для непрерывных нелинейных систем модели могут быть представлены как:

$$\begin{aligned} \dot{x}_i(*) &= A_{ii}(x_i) + B_{ii}u_i(1) + \sum_{j=1}^M A^{ij}(x_i, x_j, 1) + D_i D x_i(*), \quad i=1, \dots, M \\ D_i &= D_{i1}, (x_i) x_i(0) + E \quad \forall i = 1, \dots, M. \end{aligned} \quad (26)$$

Здесь $D_i(x_i) \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$ - комбинация неизвестных нестационарных вариаций параметров, неопределенностей модели и внешних возмущений; $A_{ii}(x_i) \in \mathbb{R}^{n_i \times n_i}$ - матрица неизвестных параметров в подсистемах, $A_{ij}(x_i, x_j) \in \mathbb{R}^{n_i \times n_j}$ - матрица неизвестных параметров во взаимосвязях, $\&(*) \in \mathbb{R}^{n_i}$ - неизвестный вектор возмущений.

Неопределенные матричные элементы $D_i D x_i(*)$, $D_{i1} u_i(x_i)$ и возмущения удовлетворяют включениям:

$$\begin{aligned} D_i D x_i(x_i) \in A_i, \quad A_i &= \{ D_i A_i(x_i) : A_i < A_{i0} < L_i + \}, \\ D_{i1} u_i(x_i) \in A_i, \quad A_i &= \{ D_i A_i D x_i(x_i) : L_i < D_{i1} u_i < L_i + \}, \end{aligned} \quad (27)$$

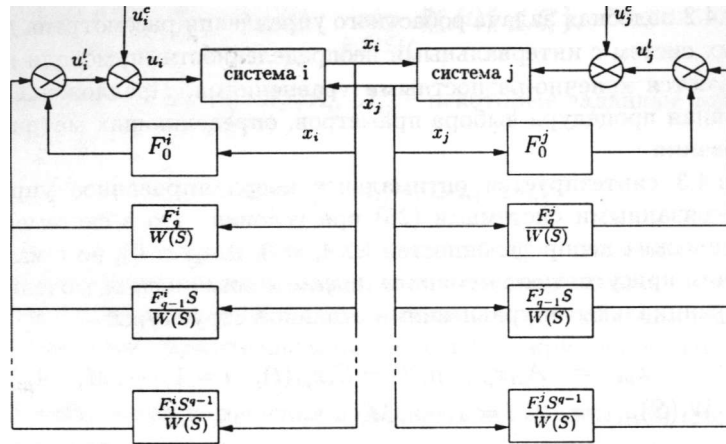


Рис. 3: Структурная схема системы управления с динамической компенсацией.

для случая различных по структуре возмущений представлена на рис. 3. Полученный закон управления сочетает в себе координирующую составляющую и локальные обратные связи по состоянию и по производным состояния, что позволяет осуществлять динамическую компенсацию возмущений. Для случая, когда в подсистемах присутствуют одинаковые по структуре возмущения, порядок динамических компенсаторов определяется порядком действующих в подсистеме возмущений, а не порядком $I^{\wedge}(5)$ в (30).

В п.4.4 и п.4.5 излагаются результаты децентрализованного проектирования набора контроллеров, которые вместе и независимо управляют взаимосвязанной системой.

Идея подхода излагается на примере задачи управления частично неопределенными системами, модели которых описываются взаимосвязанными линейными дифференциальными уравнениями с интервальными неопределенностями в параметрах:

$$\dot{x}(t) = A(x(t)) + B(x(t)) + E \sum_{j=1}^m D_j(x(t)), \quad x(0) = x_0$$

$$D_j(x) = \sum_{i=1}^m A_{i,j}(x) + E \sum_{i=1}^m D_{i,j}(x) + E \sum_{i=1}^m D_{i,j}^c(x) \quad (32)$$

Локальные законы управления - обратные связи по состоянию, определяются из условия минимизации критерия оптимальности всей системы, весовые матрицы которого являются параметрами проектирования и выбираются для обеспечения противостояния управляемой взаимосвязанной системы вариациям параметров в подсистемах и взаимосвязях. При этом для проектирования локальных контроллеров необходима только локальная априорная информация о неопределенностях моделей подсистем. Для определения условий робастности используются метод функций Ляпунова и свойства блочно-диагональной доминантности матриц. Соотношения получены для различных критериев: квадратичного, обобщенной работы.

В п.4.5 эта идеология использована для проектирования децентрализованных алгоритмов робастного децентрализованного управления линейными взаимосвязанными динамическими системами, в моделях которых присутствуют интервальные неопределенности в матрицах состояния подсистем и, кроме того, в измерениях состояний.

5. Разработка компьютерного инструментария автоматизированного проектирования алгоритмов координированного децентрализованного управления

Синтез алгоритмов оптимального управления динамическими системами, состоящими из набора взаимодействующих подсистем, связан с необходимостью решать оптимизационные задачи для каждой из подсистем, итеративно приближаясь к оптимальному решению. Вычислительные процедуры достаточно трудоемки и полностью ориентированы на применение специализированных компьютерных программ.

Наиболее предпочтительной средой для синтеза и исследования систем управления является среда Matlab с интегрированным пакетом Simulink - пакетом для моделирования, имитирования и анализа динамических систем, позволяющим использовать обширную библиотеку блоков, однако блоков для решения задач синтеза и исследования систем децентрализованного управления в пакете Simulink нет. В то же время Simulink позволяет пополнять библиотеку блоков с помощью специально написанных подпрограмм, а также позволяет расширять свои

возможности с помощью механизма 5-функций.

В настоящем разделе освещены результаты, связанные с разработкой компьютерного инструментария автоматизированного проектирования алгоритмов координированного децентрализованного управления на базе пакета Ma1Ba7/5птш1тк, а также с применением технологии параллельных вычислений MP1.

В п. 6.1 представлен анализ вычислительных иерархических процедур для решения оптимизационных задач в различных постановках. Показано, что при решении оптимизационных задач можно выделить общие для всех постановок, базовые слагаемые в правых частях дифференциальных (конечно-разностных) уравнений, решаемых на нижнем уровне, а также дополнительные слагаемые, соответствующие различным постановкам оптимизационных задач. Учитывая возможность пакета ЭтиНпк создавать блоки с переменным числом входов, предложено "вводить" эти дополнительные слагаемые в правых частях дифференциальных (конечно-разностных) уравнений в качестве дополнительных входов *новых, создаваемых с помощью механизма ЭтиНпк (5)-функций, блоков.*

Кроме того, предложено совместить достоинства \$1тиНпк-моделирования с функцией *программой (автоматической) декомпозиции* полной системы на совокупность подсистем согласно указанной структуре декомпозиции.

В п. 6.2 представлены результаты разработки программных средств для проектирования и исследования таких систем на базе пакета Ma1Ba7/5птш1тк и компьютерной реализации автоматизированных процедур синтеза координированных децентрализованных законов управления.

Программные средства представляют собой набор программ и 51тиИпк-моделей, разделенных на два уровня. На верхнем уровне находится скрипт-файл, реализующий двухуровневую вычислительную процедуру, на нижнем - находятся 51тилшк-модели для решения нестационарных уравнений Риккати, для расчета координирующих управлений, полных управлений и состояний по подсистемам, которые вызываются в процессе выполнения вычислительной процедуры. Модели для расчета координирующих управления и состояний получены в результате разработки 8-функций. Они обладают возможностью задавать дополнительные входы для решения оптимизационных задач в различных постановках и для любой структуры декомпозиции, что делает разработанные

программные средства достаточно универсальными.

В п. 6.3 рассмотрены особенности реализации параллельных вычислений при синтезе законов координированного децентрализованного оптимального управления взаимосвязанными системами. В качестве основы реализации параллельных вычислений выбрана технология MP1 (Mezza^e Paззт^ BегГасе - Интерфейс передачи сообщений). Программные средства разработаны в соответствии со структурной схемой двухуровневой вычислительной процедуры, представленной на рис. 1. Выполнение функций координатора возложено на верхний уровень параллельных вычислений - корневой процесс, а решение оптимизационных задач на нижнем уровне двухуровневой вычислительной процедуры выполняется процессами.

Результаты моделирования показали вычислительные преимущества использования иерархических процедур с параллельной обработкой информации перед традиционными.

6. Разработка алгоритмических и компьютерных средств для решения задач расчета и оптимизации водно-солевых балансов в землепользовании

В настоящем разделе излагаются результаты, связанные с разработкой математических моделей, алгоритмов и программных средств для решения прикладных задач расчета и оптимизации водно-солевых балансов для территориального района. Эти задачи характеризуются большой размерностью и трудной формализуемостью, что делает их очень "неудобными" для решения традиционными способами или с использованием существующих программных приложений и предъявляет высокие требования ко вновь разрабатываемым алгоритмическим и программным средствам. Район, для которого составляется баланс, рассматривается с позиций большой системы, а при разработке моделей использованы методы, основанные на идеях декомпозиции.

Описание проблем расчета и оптимизации водно-солевых балансов территориального района приведено в п.6.1. В п.6.2 - п.6.4 приводятся результаты разработки математических моделей водных, солевых и водно-солевых балансов для статических и динамических режимов.

Район, для которого составляется баланс, разбит на несколько десятков блоков. Для каждого блока имеют место несколько приходных статей водного баланса, соответствующих объемам воды, поступившим

в блок за определенный период времени и несколько расходных статей, соответствующих объемам воды, убывшим из блока за тот же период времени. Солевой баланс определяется количеством соли, содержащейся в приходно-расходных статьях водного баланса.

Сумму всех приходно-расходных статей баланса γ -того блока, взятых с соответствующим знаком, принято считать невязкой баланса γ -того блока.

В общем виде составная модель представляется нелинейным разностным уравнением, в котором состояние отражает запасы воды и соли в исследуемых блоках территориального района, а управлениями являются приходно-расходные статьи водного баланса и концентрации солей в них:

$$x[\kappa + 1] - D(x, \kappa) + B(u, \kappa)u[\kappa], \quad g[0] = x_0. \quad (33)$$

При этом учитываются нижние и верхние допуски на значения переменных:

$$x_m[\kappa] < x[\kappa] < x_M[\kappa], \quad u_m[\kappa] < u[\kappa] < u_M[\kappa]. \quad (34)$$

Здесь $x^T[\kappa] = [x[\kappa] \quad xII[\kappa]]$ - блочный вектор, составленный из запасов воды $XI[A] \in \mathcal{Y}^n$ и запасов соли $x_2[\kappa] \in \mathcal{Y}^m$ в κ -тый период времени; m - число участков района; $u^m[\kappa] = [u[\kappa] \quad u\%[\kappa]]$ - блочный вектор, составленный из приходно-расходных статей ($u_x[\kappa] \in \mathcal{Y}^r$) и концентраций солей в них ($u_2[\kappa] \in \mathcal{Y}^m$); t - число приходно-расходных статей; $x_m[\kappa]$, $x_M[\kappa]$ - векторы, составленные из нижних и верхних предельно допустимых значений запасов воды и соли; $u_m[\kappa]$, $u_M[\kappa]$ - векторы, составленные из нижних и верхних предельно допустимых значений приходно-расходных статей и концентраций солей в них; $f(x, \kappa)$ - некоторая нелинейная функция (в частности, для случая линейной модели $f(x, \kappa) = x[\kappa]$, при этом $(x[\kappa + 1] - x[\kappa])$ - невязка водно-солевого баланса); $B(u, \kappa)$ - отражает взаимосвязи между участками региона.

Оптимизационная задача формулируется как задача минимизации критерия

$$J = \quad (35)$$

при ограничениях (33), (34). Здесь $x[\kappa]$ - вектор, составленный из компонент $x_1[A]$, $x_2[J]$, измеренных или рассчитанных. В частности, для случая оптимизации водного баланса $x_x[\kappa]$ рассчитывается по формуле:

$$3Д = \quad III[\kappa],$$

где γ - параметр, характеризующий способность грунта в γ -том блоке аккумулировать влагу; ΔH^{κ} - изменение уровня грунтовых вод в соответствующем блоке за расчетный период.

Задачи оптимизации сформулированы при различных критериях для локальных участков и района в целом (п.6.5).

Для решения оптимизационных задач использованы разработанные в разделе 3 иерархические алгоритмы с параллельной обработкой информации в трехуровневой структуре решения, в которой для учета ограничений типа неравенств вводится дополнительный промежуточный уровень (п.6.6).

Полученные оптимальные невязки I могут быть использованы при формировании управляющих воздействий: потоков воды на орошение, дренажные стоки и т.д., а также для оценивания и прогноза водно-солевых режимов земельных угодий.

Предложенные в работе алгоритмы положены в основу компьютерной системы для решения задач расчета и оптимизации водно-солевых балансов в землепользовании (п.6.7), в рамках создания которой разработаны: общая структура программного обеспечения, подсистема расчета и корректировки водно-солевого баланса, подсистема формирования и редактирования гидромелиоративных характеристик земельных территорий с картографической интерпретацией данных, подсистема оптимизации водно-солевого баланса.

Разработанная компьютерная система может быть использована при решении соответствующих задач для произвольного района, с произвольным разбиением на блоки и любой структурой взаимосвязей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Предложена идея использования переопределения координирующих переменных в процедуре решения оптимизационных задач для взаимосвязанных систем. На базе этой идеи разработан новый метод синтеза оптимальных координированных децентрализованных управлений с параллельной обработкой информации. С использованием этого метода разработаны алгоритмы решения 03 в различных постановках: для непрерывных, дискретных и гибридных систем.

2. Разработан метод иерархической оптимизации для задач с ограничениями-неравенствами на переменные управления, состояния и взаимосвязи. Для учета этих ограничений вводится дополнительный

промежуточный уровень. Предложен специальный выбор матриц проектирования, который позволил сделать вычисления коэффициента обратной связи независимыми от итерационно вычисляемых координирующих переменных промежуточного уровня. На базе этого метода получены алгоритмы оптимального управления различными системами: непрерывными, дискретными и гибридными системами.

3. Предложена технология децентрализованного проектирования робастных систем с интервальными неопределенностями и неизмеряемыми возмущениями. Параметры проектирования (весовые матрицы в критериях ЭОЗ) определяются, используя информацию о неопределенностях в подсистемах. Получены алгоритмы для задач в различных постановках.

4. В рамках создания компьютерных средств автоматизированного проектирования алгоритмов разработаны новые унифицированные блоки в подсистеме МаlБаБ/ 8lшиНпк для создания компьютерных моделей для решения задач многоуровневого управления в различных постановках для различных структур декомпозиции. Программно-алгоритмические средства автоматизированного проектирования использованы в ряде организаций для решения исследовательских задач.

5. Разработанные алгоритмы применены в решении задач расчета и оптимизации ВСБ в землепользовании. Разработана и внедрена в эксплуатацию компьютерная система.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

1. Миркин Б.М., Лыченко Н.М. Координированное управление дискретными системами с несепарабельным критерием оптимальности в условиях ограничений - неравенств на переменные // Проблемы автоматизации и управления (Вестник института автоматизации НАН КР). 1996. - С. 73 - 84.

2. Вoпз М. Мнкш, Еу\$епу Р. КеБелг, ЫаЫу М.БусБепко Сопзlгaтесl opИпигаИоп oГ lаr\$е-зсаle поп-lтеар зузЪетз: аl\$оп4Бтз апс! аррПса(лопз lo \уaleг ргоБетз // Pгoc. oЧБe 2лcl Азlап Сопlгo1 СопГегпсе (АЗСС'97). - Зеонl, Кoгea, 1997.

3. Миркин Б.М., Лыченко Н.М. Процедура робастной иерархической оптимизации нелинейных дискретных динамических систем // Проблемы автоматизации и управления. - 1998. - С. 8 - 16.

4. Миркин Б.М., Лыченко Н.М. Робастная двухуровневая оп-

тимизация нелинейных дискретных динамических систем // Pгoc. oГ lп4егпаl,юпal СопГегпсе Оупапсаl ЗузЪетз: ЗЪаЫШу, Сопlгo1, ОрйпигаИоп (OЗЗCO'98). - Beлагиз, Мтзк-1998. - Уo1. 2. - P. 203-207.

5. Кебец Е.П., Лыченко Н.М., Миркин Н.М. Иерархические алгоритмы оптимизации и их применение в землепользовании // Вестник Международного университета Кыргызстана. - 1999. - № 1(5).- С. 31 - 35.

6. Лыченко Н.М. Синтез оптимальных управлений с параллельно-последовательной схемой координации // Вестник Международного университета Кыргызстана. - 1999. - № 1(5).- С. 43 - 50.

7. ЫаЫу М.БусБепко. ВесотрозШоп-соогсИпаБес! opИпигаИоп oПар\$е-зсаle сНзгБе зузЪетз ил(Б pa^allel-зе^иeплal соогсЦпаБес] зБете // Pгoc. oГТБe 7<Б MecШеггаеап СопГегпсе оп Сопlгo1 & Аиlота(лоп (MEO'99). - HaHa, lагаe1. - 1999. - P. 420 - 429.

8. Миркин Н.М., Лыченко Н.М. Координированное децентрализованное управление нелинейными системами: исследование свойств робастности // Труды 6-го Международного Санкт-Петербургского симпозиума по теории адаптивных систем, посвященного памяти Я.З. Цыпкина. - Санкт-Петербург. - 1999. - Т. 2, - С. 107 - 110.

9. Лыченко Н.М. Принцип параллельной обработки информации в задачах иерархической оптимизации взаимосвязанных динамических систем // Проблемы автоматизации и управления. 1999. - С. 65 - 74.

10. Мпкт В.М. апс! БусБепко Г^М. Сопзlгaтес! opИпигаИоп oГ lаr\$е-зсаle поп-Нпсаг йупагшс зузЪетз // Сопlгo1 AppНсаюпз oГ OpИпигаИоп / E<l. У2акБагоу. lГАС PгocееcИп\$з Зепез. - OхГорс!: Pег\$aтoп. - 2000. - Уo1. 1. - P. 244 - 248.

11. Миркин Б.М., Лыченко Н.М. Иерархическая динамическая компенсация с неизмеряемыми произвольными возмущениями // Проблемы автоматизации и управления. 2000. - С. 99 - 107.

12. Миркин Б.М., Лыченко Н.М. Координированное децентрализованное слежение за эталонными траекториями в задачах управления нелинейными системами при ограничениях на управления // Аналитическая теория автоматического управления и ее приложения: Труды международной научной конференции; Под ред. В.А. Подчукаева. - Саратов. - 2000. - С. 132 - 137.

13. Лыченко Н.М. Компьютерная система расчета и оптимизации водно-солевых балансов в землепользовании // Аналитическая теория автоматического управления и ее приложения: Труды международной научной конференции; Под ред. В.А. Подчукаева. - Саратов. - 2000. -

и. 12/ - 131.

14. Лыченко Н.М. Применение параллельных вычислений для синтеза оптимальных управлений в гибридных системах // Вестник МУК. - 2001. - № 1(10). - С. 21 - 25.

15. Миркин Б.М., Лыченко Н.М. Децентрализованное проектирование робастных децентрализованных законов управления линейными интервальными динамическими системами // Проблемы автоматки и управления. - 2001. - С. 8 - 18.

16. Лыченко Н.М. Децентрализованные алгоритмы проектирования взаимосвязанных систем в условиях информационных неопределенностей // Проектирование инженерных и научных приложений в среде Ma1BaB: Труды Всероссийской конференции. - М.: ИПУ РАН. - 2002. - С. 438 - 446.

17. Лыченко Н.М. Алгоритмы децентрализованного координированного управления дискретными системами с заданными характеристиками динамики // Проблемы автоматки и управления. - 2002. - С. 10 - 17.

18. Миркин Б.М., Лыченко Н.М. Задача координированного децентрализованного слежения выходов взаимосвязанной непрерывной системы за эталонными траекториями // Проблемы автоматки и управления. - 2002. - С. 42 - 48.

19. Лыченко Н.М. Синтез оптимальных управлений гибридными системами с параллельной схемой вычисления координирующих переменных // Идентификация систем и задачи управления ЗГСРЯО'ОЗ: Труды II Международной конференции. - М.: ИПУ РАН. - 2003. - С. 693-706.

20. Лыченко Н.М. Метод синтеза алгоритмов управления взаимосвязанными системами с параллельной обработкой информации // Математика, компьютер, образование: Сб. научн. тр. конференции МГУ им. М.В.Ломоносова; Под ред. Г.Ю. Ризниченко. - М.: К&С, 2003. - № 10, Т. 2 - С. 22-30.

21. Лыченко Н.М. Задачи децентрализованного слежения для взаимосвязанных систем: разработка алгоритмов и моделирование // Математические структуры и моделирование: Сб. научн. тр.: Под ред. А.К. Гуца. - Омск: Омск. гос. ун-т. - 2003. - № 12. - С. 91 - 106.

22. Лыченко Н.М., Бастов П.С., Семин П.В. Разработка алгоритмических и программных средств для проектирования и исследования децентрализованных систем оптимального управления на базе пакета Ma1BaB/31шиПпк // Проектирование инженерных и научных приложений в среде Ma(Ba'Б: Труды II Всероссийской конференции. - М.: ИПУ

РАН. - 2004. - С. 438 - 446.

23. Лыченко Н.М., Бастов П.С., Семин П.В. Применение пакета Ma(Xa'Б/51тиПпк для синтеза координированных децентрализованных законов управления и моделирования взаимосвязанных систем // Вестник КРСУ. - 2004. - Т. 4, № 8. - С. 36 - 46.

24. Шаршеналиев Ж.Ш., Миркин Б.М., Лыченко Н.М. Проектирование децентрализованного координированного управления нелинейными системами с интервальными неопределенностями // Мехатроника, Автоматизация, Управление. - 2004. - № 12. - С. 21 - 27.

25. Лыченко Н.М. Децентрализованные системы управления: оптимизация и робастность. - Бишкек.: КРСУ, 2004. - 187 стр.

26. Лыченко Н.М. Параллельная обработка информации в задачах синтеза оптимального управления // Вестник КРСУ. - 2005. - Т. 5, № 2. - С. 111 - 119.

В [1], [10], [12] автором разработаны алгоритмы управления и получены условия на выбор переменных проектирования; в [2], [5] разработаны модели, алгоритмы управления и программные средства; в [3], [4], [8] разработаны алгоритмы управления и исследованы свойства робастности; в [11], [15], [24] предложена децентрализованная процедура синтеза робастного управления и разработаны алгоритмы управления; в [18] разработаны алгоритмы; в [22], [23] поставлена задача, разработаны алгоритмы и отдельные программные модули.

АННОТАЦИЯ

Лыченко Н. М. "Синтез оптимальных и робастных алгоритмов с параллельной обработкой информации для задач децентрализованного управления динамическими системами".

На базе разработанного метода синтеза алгоритмов управления взаимосвязанными системами с параллельной обработкой информации синтезированы алгоритмы управления непрерывными, дискретными и гибридными системами. Разработан метод и получены алгоритмы иерархической оптимизации динамических систем с ограничениями-неравенствами на состояния, управления и взаимосвязи. Разработана децентрализованная процедура проектирования алгоритмов робастного управления для систем с параметрическими интервальными неопределенностями и неизмеряемыми возмущениями. Разработаны программные средства синтеза законов координированного децентрализованного управления. На базе полученных алгоритмов разработана компьютерная

система расчета и оптимизации водно-солевых балансов в землепользовании.

ANNOTATION

Lychenko N.M. "Synthesis of optimal and robust algorithms with the parallel processing of information for decentralized control of dynamic systems problems".

A new method of hierarchical optimization is developed. The method based on parallel information processing in the two-level decision procedure. Optimal control algorithms are received for different dynamic system models: continuous, discrete and hybrid. The method and control algorithms for hierarchical optimization of dynamic system with inequalities constraints on the control and state variables are developed. Decentralized procedure is developed for synthesis of decentralized control of uncertain dynamic systems. Computer aided design is produced. The computer system for solving problems of water-salt regime optimization for a large region consisting of numerous interconnected plots of land is developed.

АННОТАЦИЯ

Лыченко Н. М. "Динамикалык системаларды борборлоштурулбаган башкаруунун эсептери учун маалыматтарды параллелдуу иштетууну камтыган оптималдык жана робасттык алгоритмдеринин синтези".

Параллелдуу иштелген маалыматтар менен оз ара байланышкан системаларды башкаруу алгоритмдерди синтездоо икмасынын негизинде узгултуксуз, дискреттуу жана гибрид системаларын башкаруу алгоритмдери синтезделди. Башкаруунун, оз ара байланыштардын, абалдардын чектелген барабарсыздиктары менен динамикалык иерархиялык оптимизациянын икмасы иштелип чыгып алгоритмдери алынды. Параметрдик интервалдык белгисиздер жана олчомсуз тоскоолдуктары камтылган системаларысы учун робасттык башкаруудагы алгоритмдерди долборлоонун борборлоштурулбаган процедурасы (ши аткаруу тартиби) иштелип чыкты. Координацияланган борборлоштурулбаган башкаруунун мыйзамдарынын синтездеринин программалык каражаттары иштелип чыкты. Алынчан алгоритмдердин негизинде жер иштетууда суутуз баланстарын оптималдаштыруунун жана эсептоонун компьютердик системасы иштелип чыкты.



Тех. редактор Матвеева О.А.

Подписано к печати 20.05.2005. Формат бумаги 60x84 1/16
Бумага офс. Объем 2,0 п.л. Тираж 100 экз. Заказ 131
Издательство КРСУ 720000, Бишкек, ул. Шопокова, 68