

05.13.01
У 242

На правах рукописи



Угаров Павел Александрович

**СИНТЕЗ ДВУХУРОВНЕВЫХ ДИСКРЕТНО-НЕПРЕРЫВНЫХ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ С ГАРАНТИРОВАННЫМ КАЧЕСТВОМ**

Специальность 05.13.01 – «Системный анализ,
управление и обработка информации (промышленность)»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск 2005

Работа выполнена в Южно-Уральском государственном университете

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор Тележкин Владимир Федорович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Панюков Анатолий Васильевич

доктор технических наук,
профессор Коровин Владимир Андреевич

Ведущая организация: ФГУП Государственный ракетный центр
«Конструкторское бюро имени академика
В.П. Макеева», г. Миасс

Защита состоится 9 ноября 2005 г. в 14 часов на заседании диссертационного совета Д 212.298.03 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, ауд. 1001.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 7 октября 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



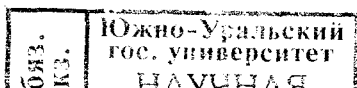
Коровин А.М.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Сложность современных объектов управления, большое количество и противоречивость показателей качества обуславливают использование многоуровневых систем управления с иерархической структурой. В этом случае общая задача управления разбивается на ряд подзадач, которые решаются локальными управляющими элементами. Существенным преимуществом иерархического подхода является возможность проведения параллельных вычислений, когда осуществляется одновременное решение ряда локальных задач и координация частных решений. Кроме того, построение системы управления по иерархическому принципу позволяет снизить сложность отдельных решаемых задач, повысить надежность работы системы в целом, ускорить процесс проектирования системы управления. Основной задачей, решаемой при синтезе иерархической системы управления, является разработка методов и алгоритмов координации, используемых для согласования работы автономно функционирующих подсистем.

Впервые формальное исследование иерархических многоуровневых систем было выполнено в фундаментальной работе М. Месаровича, Д. Мако и И. Такахары. Проблемам построения иерархических систем, методам и алгоритмам координации посвящены труды таких известных Российских и зарубежных ученых, как Р.А. Алиев, В.Н. Бурков, I.D Wilson, M.G.Singh, M. Jamshidi, W. Findeisen и др. Схожие задачи решаются в рамках теории игр, теории многокритериальной оптимизации, теории оптимального управления. Однако основное внимание до недавних пор уделялось координации при решении оптимизационных задач и координации в линейных динамических системах. В числе прочих остаются открытыми вопросы синтеза иерархических систем управления нелинейными дискретно-непрерывными динамическими объектами, обеспечивающих гарантированное качество при наличии приоритетных отношений между критериями.

В последние десять лет активно развивается теория дискретно-непрерывных систем управления, которые в англоязычной литературе называются «гибридными системами». Дискретно-непрерывным (гибридным) системам управления посвящены работы С. Tomlin, J. Lygeros, S. Sastry, G.J. Pappas, R. Alur, T.A. Henzinger, A. Nerode, P. Antsaklis, M. Branicky и других. В теории гибридных систем используются специальные методы управления, основанные на вычислении множеств достижимости разного рода в дискретно-непрерывном пространстве состояний. Сложность вычисления этих множеств может быть достаточно велика даже для объектов невысокого порядка, поэтому для дискретно-непрерывных систем особенно актуально использование декомпозиционных методов. Однако вопросы построения дискретно-непрерывных систем управления по иерархическому принципу пока еще мало изучены. Поэтому представляет большой интерес разработка методов и алгоритмов коорди-



нации, учитывающих применение локальными элементами алгоритмов управления, основанных на вычислении множеств достижимости.

Важнейшей задачей при проектировании систем управления является обеспечение безопасности функционирования сложных технических объектов, а также гарантирование определенных значений показателей качества в условиях действия помех и неопределенностей. Кроме того, использование гарантий при обмене информацией между элементами иерархической структуры позволяет локализовать действие помех и неопределенностей, специфичных для того или иного элемента.

Таким образом, исследование иерархических дискретно-непрерывных систем управления с гарантированным качеством является актуальной теоретической задачей. Кроме того, разработка систем рассматриваемого класса важна для ряда практических приложений, таких как управление ультразвуковыми технологическими установками. Для ультразвуковых систем важно гарантированное обеспечение безопасности и определенного качества конечного продукта. Также они являются сложными дискретно-непрерывными объектами, для которых целесообразно применение иерархических систем управления.

Цель работы. Разработка методов и алгоритмов координации для двухуровневых дискретно-непрерывных систем управления, обеспечивающих гарантированное качество при управлении сложными техническими объектами.

Задачи исследования. Для достижения сформулированной цели в диссертационной работе поставлены следующие задачи.

1. Разработать общую схему синтеза двухуровневых дискретно-непрерывных систем управления с гарантированным качеством, определяющую необходимые методы и алгоритмы координации.
2. Разработать метод координации, обеспечивающий согласованную работу локальных управляющих подсистем в смысле гарантирования определенных значений глобальных показателей качества.
3. Разработать алгоритмы координации, реализующие предложенный метод в условиях действия помех и неопределенностей, задаваемых допустимыми областями изменения.
4. Апробировать предложенные алгоритмы координации на практической задаче управления ультразвуковой технологической установкой.

Методы исследования. Решение поставленных в настоящей диссертационной работе задач проводилось методами теории оптимального управления, теории игр, исследования операций, теории дискретно-непрерывных систем управления, теории иерархических многоуровневых систем.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Общая схема синтеза двухуровневой дискретно-непрерывной системы управления с гарантированным качеством при наличии трех групп критериев с различным приоритетом.

2. Метод и итеративные алгоритмы координации для двухуровневых дискретно-непрерывных систем управления, позволяющие получить гарантированное значение глобального показателя качества при работе в установившемся режиме в условиях действия помех и неопределенностей, заданных допустимыми областями изменения.
3. Агрегированная динамическая модель дискретно-непрерывного элемента нижнего уровня в виде поведенческой абстракции, содержащая информацию о гарантированных значениях локальных показателей качества.
4. Метод и итеративный алгоритм координации для двухуровневых дискретно-непрерывных систем управления, использующий агрегированные модели элементов нижнего уровня и позволяющий получить гарантированные значения глобальных показателей качества при работе в переходном режиме в условиях действия помех и неопределенностей, заданных допустимыми областями изменения.
5. Структура локальной системы, гарантирующей управление с качеством, определенным координатором, и выполняющей переключение между отдельными алгоритмами управления в соответствии с полученным координирующим воздействием.

Научная новизна.

1. Новизна общей схемы синтеза двухуровневой дискретно-непрерывной системы управления с гарантированным качеством заключается в том, что в ней сформулирована последовательность операций синтеза при наличии трех групп локальных критериев с различным приоритетом, когда алгоритмы управления нижнего уровня основаны на вычислении множеств достижимости в дискретно-непрерывном пространстве состояний, и должны быть реализованы два глобальных режима – установившийся и переходный.

2. Новизна метода и алгоритмов координации в установившемся режиме заключается в том, что они осуществляют направленный поиск координирующих сигналов, обеспечивающих гарантированное качество на верхнем уровне, путем построения внутренней аппроксимации допустимого множества значений показателей элементов нижнего уровня, согласованного с глобальной целью системы. Алгоритмы координации позволяют гарантировать заданное качество на верхнем уровне и существенно уменьшить общий объем вычислений за счет снижения размерности задач построения множеств достижимости.

3. Для реализации алгоритма координации в переходном режиме разработана новая дискретная агрегированная модель элементов нижнего уровня, которая отличается тем, что она построена в виде поведенческой абстракции, входные символы которой сопоставляются с локальными алгоритмами управления, а выходные – с инвариантными множествами в дискретно-непрерывном пространстве состояний. Эта модель позволяет представить показатели элемента нижнего уровня, интересующие координирующую систему.

4. Новизна метода и алгоритма координации в переходном режиме заключается в том, что они основаны на совместном поиске траекторий двух новых дискретных агрегированных моделей элементов нижнего уровня с использованием методов теории игр. Алгоритм позволяет гарантировать определенное быстродействие и качество переходного процесса всей системы, также он устойчив к нарушению структурных связей между элементами системы.

5. Новизна структуры локальной системы заключается в том, что локальная система управления реализована в виде последовательности (цепочки) регуляторов по трем группам критериев, которые последовательно сужают допустимое множество управлений и включаются/выключаются в соответствии с координирующим воздействием. Такая структура позволяет гарантировать как безопасность функционирования объекта, так и выполнение заданий координатора в переходном и установившемся режиме.

Практическая ценность. Разработанные методы и алгоритмы позволяют заранее определять гарантированные значения глобальных показателей качества в условиях действия помех и неопределенностей. Это особенно важно при использовании рассматриваемых двухуровневых структур в составе больших многоуровневых систем управления производственными процессами. Предложенные алгоритмы координации позволяют существенно снизить общий объем вычислений за счет понижения размерности задач построения дискретно-непрерывных множеств достижимости. Разработано программное обеспечение, реализующее алгоритмы координации. Результаты диссертации использованы при проектировании двухуровневой системы управления ультразвуковой технологической установкой на ТОО «ЧЕЛАК», гарантирующей требуемую дисперсность продукта, и в учебном процессе кафедры «Радиотехнические системы» Южно-Уральского государственного университета.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены на 51-й научно-технической конференции (Челябинск, ЮУрГУ, 1999), 52-й научно-технической конференции (Челябинск, ЮУрГУ, 2000), XX Российской школе по проблемам проектирования неоднородных конструкций (Миасс, 2000), Международной конференции по управлению «АВТОМАТИКА – 2001» (Одесса, 2001), XXI Российской школе по проблемам науки и технологии (Миасс, 2001), XXXII Уральском семинаре по механике и процессам управления (Миасс, 2002), XXIII Российской школе по проблемам науки и технологий (Миасс, 2003), 55-й юбилейной научной конференции (Челябинск, ЮУрГУ, 2003).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 11 публикациях.

Структура и объем диссертации. Работа состоит из введения, шести глав, заключения и списка литературы. Основное содержание имеет объем 147 страниц. Список литературы включает 145 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ существующих подходов и постановка задач исследования

В работе сформулированы основные преимущества, которые дает использование иерархических систем управления применительно к дискретно-непрерывным объектам. В качестве примера рассматривается система управления ультразвуковой установкой, включающей два агрегата: систему подачи материала (СПМ) и ультразвуковой генератор (УЗГ). Основной задачей при синтезе иерархической системы управления является задача координации. Необходимость координации обусловлена взаимосвязанностью локальных задач как через глобальные целевые функции и ограничения, так и через горизонтальные связи между агрегатами объекта управления. В ходе литературного обзора раскрывается разнородность подходов к координации, и уточняются задачи, решаемые в диссертационной работе.

Кратко рассмотрены дискретно-непрерывные (гибридные) системы; обоснована потребность в методах синтеза иерархических систем управления, применимых к дискретно-непрерывным объектам управления. Использование гарантий при обмене информацией между элементами иерархической структуры позволяет повысить устойчивость системы к воздействию отрицательных факторов. Гарантии подтверждаются путем проверки (верификации) решений локальных задач управления. Верификация позволяет проводить качественный анализ свойств поведения дискретно-непрерывных систем, не прибегая к численному моделированию отдельных траекторий. Дискретно-непрерывный характер механизма координации связан не только с описанием объектов управления как гибридных систем, сочетающих в себе непрерывные и дискретные компоненты, но и с наличием приоритетных отношений между различными критериями качества, а также возможностью переключения между локальными алгоритмами управления. Использование на нижнем уровне методов, связанных с решением типовых задач теории гибридных систем (построение множеств достижимости, синтез регуляторов с гарантированными свойствами, обеспечивающих инвариантность этих множеств, проверка различных характеристик заданных алгоритмов управления) определяет необходимость создания новых методов и алгоритмов координации, а также общих подходов к синтезу иерархических систем управления, основанных на достижениях современной теории гибридных систем.

Двухуровневые системы управления с гарантированным качеством

Формальное описание двухуровневой системы с гарантированным качеством является базой для разработки методов и алгоритмов координации. Система состоит из N элементов нижнего уровня и координатора. Локальные системы управления сопоставляются с агрегатами P_k , $k = 1, \dots, N$ объекта управления. На данном этапе анализа все сигналы считаются точками абстрактных

множеств: $u_k \in U_k$ – локальные управления, $d_k \in D_k$ – локальные помехи и неопределенности, $z_k \in Z_k$ – связующие сигналы, $y_k \in Y_k$ – выходные сигналы, $x_k \in X_k$ – сигналы обратной связи о состоянии агрегата, $\beta_k \in B_k$ – координирующие сигналы. Агрегаты задаются отображениями $P_k : U_k \times Z_k \times D_k \rightarrow Y_k$, локальные системы управления $C_k : B_k \times X_k \rightarrow U_k$, а координатор определен отображением $C_0 : \Gamma \times D^0 \rightarrow V$, где D^0 – множество помех и неопределенностей верхнего уровня d^0 , $\Gamma = \Gamma_1 \times \dots \times \Gamma_N$, $V = V_1 \times \dots \times V_N$, $\gamma_k \in \Gamma_k$ – информационные сигналы с нижнего уровня. Для определения приоритетных отношений между целями различных элементов двухуровневой системы с гарантированным качеством каждому элементу нижнего уровня сопоставляются три группы критериев, которые по-разному соотносятся с показателями качества верхнего уровня. Все критерии в одной группе имеют одинаковый приоритет; группы перечислены в порядке убывания приоритета.

Группа 1 – «Безопасность». A_k критериев, связанных с безопасностью работы агрегата. Безопасность системы в целом гарантируется в том случае, когда каждая локальная система может гарантировать безопасность соответствующего агрегата объекта управления на заданном интервале времени.

Группа 2 – «Эффективность верхнего уровня». B_k критериев, отражающих все аспекты работы локальной системы, которые могут заинтересовать координатора: $J_{A_k+1}^k(u_k, d_k, z_k), \dots, J_{A_k+B_k}^k(u_k, d_k, z_k)$, $J_{P_{r=2}}^k = (J_{A_k+1}^k, \dots, J_{A_k+B_k}^k)$. Так как эти критерии связаны с координирующей задачей, они должны быть согласованы с глобальными показателями качества.

Группа 3 – «Эффективность нижнего уровня». C_k критериев, отражающих аспекты работы локальной системы, не связанные с показателями верхнего уровня и безопасностью.

Задача верхнего уровня: $F_0(\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N, d^0) \rightarrow \max$, $H(\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N, d^0) \geq \mathbf{b}$, $\mathbf{b} = (b_1, \dots, b_M)$, где \bar{F}_k – вектор показателей качества k -ой локальной системы. Глобальная задача определяется как задача поиска удовлетворительных решений: системы управления нижнего уровня должны обеспечить такие значения $\bar{F}_1^*, \dots, \bar{F}_N^*$, что $\forall d^0 \in D^0 : F_0(\bar{F}_1^*, \dots, \bar{F}_N^*, d^0) \geq c_0(d^0)$, $H(\bar{F}_1^*, \dots, \bar{F}_N^*, d^0) > \mathbf{b}$. Здесь $c_0(d^0)$ – функция допустимости. Таким образом, задача верхнего уровня сводится к выполнению глобальных ограничений. Ее решение позволяет выделить в пространстве показателей качества нижнего уровня допустимое множество

$$J_C = \left\{ (\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N) \in J \left| \begin{array}{l} \min_{d^0 \in D^0} F_0(\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N, d^0) \geq c_0(d^0) \\ \wedge \min_{d^0 \in D^0} H(\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N, d^0) \geq \mathbf{b} \end{array} \right. \right\}.$$

Критерии второй группы должны обладать следующим свойством, связывающим их с глобальной задачей:

$$\exists \left(\begin{array}{c} c_{A_k+1}^k, \dots, c_{A_k+B_k}^k \\ k = 1, \dots, N \end{array} \right) : \left(\left[\begin{array}{c} J_{A_k+1}^k \geq c_{A_k+1}^k \wedge \dots \wedge J_{A_k+B_k}^k \geq c_{A_k+B_k}^k \\ k = 1, \dots, N \end{array} \right] \Rightarrow \left[(\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N) \in \mathbf{J}_C \right] \right).$$

Глобальная задача будет решаться всякий раз при выполнении исходного предиката, входящего в отношение импликации. Поэтому задача координатора сводится к выбору минимально допустимых значений для локальных критериев второй группы $c_{A_k+1}^k, \dots, c_{A_k+B_k}^k$, $k = 1, \dots, N$. Каждая локальная система управления должна гарантировать выполнение заданий координатора по критериям второй группы во всем диапазоне локальных помех и неопределенностей D_k и связующих входов Z_k . Таким образом, определенная на верхнем уровне задача поиска удовлетворительных решений позволяет найти допустимое множество в пространстве показателей качества элементов нижнего уровня. На основании введенной формализации в работе сформулировано условие согласованности между глобальными и локальными целями. Для этого введены минимальные векторные гарантии критериев качества второй группы в условиях неопределенности. Приведена общая постановка задачи координации в двухуровневой системе с гарантированным качеством при наличии горизонтальных связей, а также условие применимости принципа оценки взаимодействия.

Далее рассматривается общая схема синтеза двухуровневой дискретно-непрерывной системы управления с гарантированным качеством. Основными этапами являются декомпозиция общей задачи управления, разработка локальных систем управления и разработка алгоритмов координации. При синтезе каждой локальной системы управления выделяются следующие подзадачи: декомпозиция пространства состояний в соответствии с целями верхнего уровня, декомпозиция по режимам функционирования, расчет максимальных управляемых инвариантов и синтез наименее ограничивающих регуляторов, а также разработка дискретного координатора для переключения режимов.

Для двухуровневой системы выделяются два глобальных режима работы: установившийся и переходный. В переходном режиме выполняется существенное изменение режима работы элементов нижнего уровня. При этом координатор решает свою задачу на основании некоторого известного множества гарантированных локальных решений, которые агрегированы в виде дискретных поведенческих абстракций. В установившемся режиме задача координатора состоит в поиске уточненных инвариантных множеств элементов нижнего уровня, обеспечивающих приемлемые с точки зрения верхнего уровня значения локальных показателей качества. В работе приведен алгоритм выбора текущего глобального режима двухуровневой системы.

Координация в установившемся режиме

Метод и итеративные алгоритмы координации для двухуровневой дискретно-непрерывной системы управления позволяют получить гарантированное значение глобального показателя качества в установившемся режиме. Ме-

год координации основан на направленном поиске координирующих сигналов путем построения внутренней аппроксимации допустимого множества значений показателей элементов нижнего уровня, согласованного с глобальной целью системы. При этом ставится задача максимизации общего времени работы системы в установившемся режиме. Алгоритмы координации разработаны для системы с двумя элементами нижнего уровня и могут быть использованы в системе управления ультразвуковой технологической установкой. Целевая функция верхнего уровня, связанная с качеством конечного продукта: $F_0(\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N, d^0_1, \dots, d^0_M)$, где $\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N \in \mathbf{J}$ – векторы показателей качества элементов нижнего уровня, $d^0 = (d^0_1, \dots, d^0_M)'$ – вектор помех и неопределенностей верхнего уровня. Для этой функции определено множество допустимых значений, задаваемое нижней гранью: $\Phi = \{F_0 \mid F_0 \geq C_0\}$. Задача верхнего уровня: $\forall t \in \mathbf{T}, \forall d^0(t) \in D^0 : F_0 \in \Phi$. Здесь $\mathbf{T} \in \mathbb{R}$ – интервал времени решения задачи. В соответствии с типом задачи (задача гарантирования качества) помехе дается преимущество, которое выражается в том, что управление рассматривается как игрок-лидер, а помеха – как ведомый игрок. Для такой игры ищется решение по Штакельбергу.

Допустимое множество в пространстве показателей качества нижнего уровня: $\mathbf{J}_C = \{\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N \mid \min_{d^0_1, \dots, d^0_M \in D^0} F_0(\bar{F}_1, \dots, \bar{F}_N, d^0_1, \dots, d^0_M) \geq C_0\}$. Если локальные системы смогут удерживать контролируемые переменные в \mathbf{J}_C , будет гарантировано определенное качество по отношению к F_0 . \mathbf{J}_C передается на нижний уровень, и локальные системы должны подтвердить существование управлений, гарантирующих, что значения контролируемых переменных будут оставаться в пределах этого множества. Для ультразвуковой технологической установки формируется $\mathbf{J}_C \subseteq \mathbb{R}^2$, так как рассматривается два локальных показателя качества – мощность ультразвуковых колебаний и объем продукта в резервуаре. Каждому элементу нижнего уровня передается не все множество \mathbf{J}_C , а некоторая его проекция на множество значений показателей качества этого элемента. Задача декомпозиции: найти такие $\bar{F}_1^C, \dots, \bar{F}_N^C$, что $\bar{F}_1^C \times \bar{F}_2^C \times \dots \times \bar{F}_N^C = \mathbf{J}_C^d \subseteq \mathbf{J}_C$. При этом возможна потеря некоторого подмножества $\mathbf{J}_C \setminus \mathbf{J}_C^d$, однако локальные системы получают возможность выбирать любое значение из \bar{F}_k^C , $k = 1, \dots, N$. Вариант декомпозиции \mathbf{J}_C определяется текущим значением координирующего сигнала.

Множества \bar{F}_k^C , $k = 1, \dots, N$ задаются параметрически с помощью локальных критериев второй группы: $\bar{F}_k^C = \{\bar{F}_k \mid J_{A_k+1}^k \geq c_{A_k+1}^k, \dots, J_{A_k+B_k}^k \geq c_{A_k+B_k}^k\}$. В работе вводится определение максимальной декомпозиции – такого \mathbf{J}_C^d , что расширение любого \bar{F}_k^C приводит к нарушению условия $\mathbf{J}_C^d \subseteq \mathbf{J}_C$. Дальнейший

анализ выполняется для условий $N = 2$, $B_1 = B_2 = 2$, $\mathbf{J}_C \subseteq \mathbb{R}^2$ – выпуклое компактное двумерное множество (соответствует управлению ультразвуковой установкой). В этом случае максимальную декомпозицию \mathbf{J}_C однозначно определяет выбор двух точек на оси любого локального показателя качества, так как граница выпуклого двумерного множества $\partial\mathbf{J}_C$ пересекается прямой не более чем в двух точках. Поэтому в работе вводятся два оператора \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_2 , определяющие максимальные декомпозиции по двум точкам на любой оси: $(c_3^1, c_4^1, c_3^2, c_4^2) = \mathbf{M}_1(c_3^1, c_4^1)$ и $(c_3^1, c_4^1, c_3^2, c_4^2) = \mathbf{M}_2(c_3^2, c_4^2)$. Для ультразвуковой установки c_3^1, c_4^1 задают допустимый интервал изменения мощности ультразвуковых колебаний, а c_3^2, c_4^2 – допустимый интервал изменения объема продукта в разервуаре. На основе декомпозиции \mathbf{J}_C формируются начальные координирующие сигналы для элементов нижнего уровня $\beta_1^i = (T, c_3^1, c_4^1)$, $\beta_2^i = (T, c_3^2, c_4^2)$; здесь T – интервал решения локальной задачи, $i \geq 0$ – номер итерации.

Решение каждой локальной задачи основано на поиске множеств достижимости (инвариантных множеств) в дискретно-непрерывном пространстве состояний агрегата. С точки зрения координатора каждая локальная система должна подтвердить существование локальных управлений, гарантирующих выполнение включения $\bar{F}_k \in \bar{F}_k^C$ на всем интервале T с учетом действия $d_k(t)$. Кроме того, перед решением этой задачи на допустимое множество управлений накладываются дополнительные ограничения, связанные с выполнением заданий по критериям первой группы. На основании результатов решения локальной задачи каждый элемент нижнего уровня формирует информационный сигнал $\gamma_k^i = (T_k^i, J_{A_k+1}^{k*}, \dots, J_{A_k+B_k}^{k*})$, передаваемый на верхний уровень. Здесь T_k^i – интервал времени, на котором существует решение задачи с минимально допустимыми значениями критериев, заданными координатором, $J_{A_k+1}^{k*}, \dots, J_{A_k+B_k}^{k*}$ – фактические значения критериев при решении задачи на заданном интервале времени. Время, в течение которого гарантируется требуемое значение глобальной целевой функции на i -ой итерации: $T^i = \min_{k=1, \dots, N} T_k^i$. Если $\forall k: T_k^i \geq T$, то все элементы нижнего уровня нашли управление, гарантирующее выполнение заданий координатора. В этом случае на нижний уровень передается разрешающий сигнал, и элементы нижнего уровня применяют управления, соответствующие вычисленным максимальным управляемым инвариантам. Если же $\exists k: T_k^i < T$, то некоторые элементы нижнего уровня не могут гарантировать выполнение включения $\bar{F}_k \in \bar{F}_k^C$ на всем интервале времени T . В этом случае координатор начинает итеративный процесс согласования решений. Задачей координации является максимизация T^i путем уточнения заданий для локальных критериев.

Рассмотрим модификацию координирующего сигнала при $N = 2$. Пусть $k_{BAD} = \arg \min_{k=1,2} T_k^i$ – номер элемента, для которого время работы в режиме с га-

рантированным качеством минимально; в предлагаемом методе координирующие сигналы изменяются таким образом, чтобы увеличить гарантированное время работы именно этого элемента. Для этого требования к нему снижаются путем уменьшения заданий для соответствующих критериев $c_3^{k_{BAD}}, c_4^{k_{BAD}}$. Поэтому модификация координирующих сигналов выполняется следующим образом:

$$(c_3^i, c_4^i, c_3^2, c_4^2) = \mathbf{M}_{k_{BAD}} \left((c_3^{k_{BAD}} + N_{k_{BAD}}^1 (J_3^{k_{BAD}*}, c_3^{k_{BAD}}), c_4^{k_{BAD}} + N_{k_{BAD}}^2 (J_4^{k_{BAD}*}, c_4^{k_{BAD}}) \right).$$

Операторы N_k^1 и N_k^2 определяют изменение заданий для локальных критериев. Например, N_k^1 модифицирует нижнюю границу коридора слежения для k -го элемента нижнего уровня:

$$N_k^1 = \begin{cases} -a_{k1} + a_{k2} (J_3^{k_{BAD}*} - c_3^{k_{BAD}}) & | J_3^{k_{BAD}*} < c_3^{k_{BAD}}, \\ 0 & | J_3^{k_{BAD}*} \geq c_3^{k_{BAD}}. \end{cases}$$

Здесь $a_{k1}, a_{k2} > 0$ – параметры. Если задание по критерию не выполняется, оно уменьшается на величину $a_{k1} - a_{k2} (J_3^{k_{BAD}*} - c_3^{k_{BAD}})$, которая растет с увеличением нарушения. Однако, если это задание выполняется, то есть $J_3^{k_{BAD}*} \geq c_3^{k_{BAD}}$, то время работы этого элемента в режиме с гарантированным качеством определяет нарушение не нижней границы коридора, а верхней. Поэтому в этом случае нет необходимости уменьшать задание, и требования к данному элементу будут смягчены за счет применения оператора N_k^2 , изменяющего верхнюю границу коридора слежения.

На основании найденных параметров $c_3^1, c_4^1, c_3^2, c_4^2$ формируются новые координирующие сигналы $\beta_1^{i+1} = (T, c_3^1, c_4^1)$, $\beta_2^{i+1} = (T, c_3^2, c_4^2)$, и элементы нижнего уровня вновь решают свои задачи, передавая на верхний уровень ответные информационные сигналы $\gamma_1^{i+1} = (T_1^{i+1}, J_3^{1*}, J_4^{1*})$, $\gamma_2^{i+1} = (T_2^{i+1}, J_3^{2*}, J_4^{2*})$. \mathbf{M}_1 и \mathbf{M}_2 определены таким образом, что при смягчении требований к одному элементу нижнего уровня требования к другому элементу ужесточаются. Итеративный процесс координации продолжается до тех пор, пока не будет выполнено условие $T^i \geq T$.

В работе приведены два алгоритма координации. **Алгоритм 1** реализует рассмотренный метод для выпуклого двумерного множества \mathbf{J}_C , максимальная декомпозиция которого определяется не более чем двумя параметрами. **Алгоритм 2** разработан для двумерного множества \mathbf{J}_C , граница которого является эллипсом, и декомпозиция определяется одним параметром. Найденные локальные инвариантные множества и соответствующие им наименее ограничивающие регуляторы используются на интервале времени $\tau \leq T$, после чего производится вмешательство координирующей системы управления.

Фактически алгоритмы координации выполняют поиск внутренней аппроксимации множества достижимости всей системы с помощью проекций на пространства состояний отдельных элементов. Поэтому они позволяют существенно снизить вычислительные затраты.

Координация в переходном режиме

Для координации в переходном режиме разработаны агрегированные модели элементов нижнего уровня в виде дискретных поведенческих абстракций. Под поведением подразумеваются последовательности входных и выходных символов. К преимуществам поведенческих моделей относятся лучшая точность по сравнению с моделями, основанными на прямой дискретизации пространства состояний, а также значительная гибкость, так как моделирование на поведенческом уровне позволяет регулировать точность агрегированной модели, варьируя длину строк запоминаемых входных и выходных символов. Каждая дискретная абстракция элемента нижнего уровня описывает работу дискретно-непрерывного объекта управления (агрегата) совместно с некоторым множеством локальных регуляторов (алгоритмов управления). В соответствии с решениями задач синтеза наименее ограничивающих стабилизирующих регуляторов в пространстве состояний каждого агрегата выделяются максимальные управляемые инварианты, которые сопоставляются с выходными символами. Под управлениями (входными символами) понимаются алгоритмы управления (регуляторы), которые используются для перехода из одного инварианта в другой. Вмешательство координатора происходит в моменты времени, соответствующие смене состояния дискретной абстракции какого-либо элемента нижнего уровня. Дискретную абстракцию, получаемую путем составления цепочек «поведений», определим как кортеж $A = \langle X_d, R, F, W, C, T, B \rangle$. Здесь $R = \{r^{(1)}, r^{(2)}, \dots, r^{(N_R)}\}$ – конечное множество локальных регуляторов, $F = \{F^{(1)}, F^{(2)}, \dots, F^{(N_F)}\}$ – допустимые множества в дискретно-непрерывном пространстве состояний агрегата, $W = \{W^{(1)}, W^{(2)}, \dots, W^{(N_W)}\}$ – максимальные управляемые инварианты агрегата, соответствующие допустимым множествам F , $C \subseteq X_d \times X_d$ – переходное отношение между состояниями абстракции, $R = (R_{ij})$ – матрица, определяющая множества регуляторов, с помощью которых выполняется переход из i -го состояния дискретной абстракции в j -е, $T = (T_{ij})$ – матрица множеств времени перехода между состояниями, $B = (B_{ij})$ – матрица, определяющая множества в пространстве состояний агрегата, которым гарантированно принадлежит состояние при переходе из i -го состояния дискретной абстракции в j -е, $X_d = \{x_d^{(1)}, x_d^{(2)}, \dots, x_d^{(N_x)}\}$ – конечное множество состояний дискретной абстракции. Состояние абстракции A в момент t_k :

$$x_d(t_k) = \begin{cases} [W(t_0)], & k=0, \\ ([W(t_0), \dots, W(t_k)], [r(t_0), \dots, r(t_{k-1})]), & k=1, \dots, l, \\ ([W(t_{k-l}), \dots, W(t_k)], [r(t_{k-l}), \dots, r(t_{k-1})]), & k > l. \end{cases}$$

Каждый момент t_i соответствует окончанию решения некоторой задачи, поставленной перед элементом нижнего уровня координатором, например, входу состояния агрегата в определенный целевой инвариант. В этот момент на верхний уровень передается информационный сигнал, в котором содержится текущее (обновленное) состояние соответствующей дискретной абстракции. На основании этого сигнала, а также информации о том, в каком состоянии пребывают абстракции остальных элементов нижнего уровня, координатор принимает решение по выбору следующего регулятора, который будет использоваться данным элементом нижнего уровня. Множество $T = \{t_0, t_1, \dots\}$ включает все моменты времени, в которые происходит смена состояния абстракции. Множество всех функций, задающих отображение $T \rightarrow R \times W$, обозначим как $(R \times W)^T$. Поведением элемента нижнего уровня будем считать некоторое подмножество $B_G \subseteq (R \times W)^T$, совместимое с действительной гибридной моделью агрегата и используемыми локальными регуляторами.

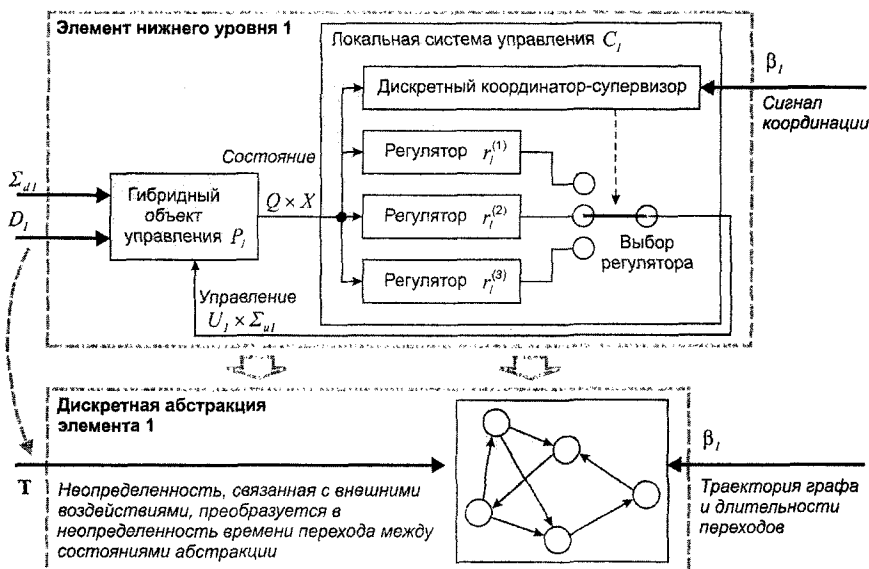


Рис. 1. Соответствие между элементом нижнего уровня и дискретной абстракцией

Для построения дискретной абстракции СПМ исходное дискретно-непрерывное пространство состояний соответствующего агрегата разделено на

8 подмножеств ($N_F = 8$), для которых рассчитаны максимальные управляемые инварианты W . Для выбранного параметра длины поведений $l=1$ абстракция СПМ имеет 22 состояния, при этом в каждом состоянии известны текущий инвариант, предыдущий инвариант и регулятор, с помощью которого осуществлялся переход. Локальная система управления СПМ может использовать один из трех регуляторов $r^{(1)}, r^{(2)}, r^{(3)}$. $r^{(1)}$ – наименее ограничивающий стабилизирующий регулятор, удерживающий состояние системы в определенном инварианте $W^{(i)} \subseteq F^{(i)}$. $r^{(2)}, r^{(3)}$ – переходные регуляторы, используемые для перевода состояния агрегата из одного инварианта в другой: $r^{(2)}$ для движения в направлении увеличения переменной состояния x_1 СПМ (уровень продукта), а $r^{(3)}$ – уменьшения. Компоненты абстракции C, T и B рассчитываются на основании вычисления множеств достижимости объекта управления.

С помощью дискретных абстракций можно анализировать траектории в пространстве показателей элементов нижнего уровня, а не в пространстве состояний объекта управления. Так как у каждого из двух элементов нижнего уровня имеется единственный показатель, при решении задачи координации достаточно рассматривать двумерное пространство, в то время как общее количество непрерывных и дискретных переменных состояний СПМ и УЗГ достаточно велико. При этом на нижнем уровне будет реализовываться управление по полным моделям агрегатов, что обеспечивает необходимое качество решения локальных задач. Задачей управления в переходном режиме является перевод агрегатов в такие подмножества пространств состояний, из которых в дальнейшем будет осуществляться вход в установившийся режим. Действия координатора должны быть направлены на улучшение некоторых свойств этих переходов, значимых с точки зрения верхнего уровня. Если для абстракции A^1 известны начальное $x_{1d}^{(i_0)}$ и конечное $x_{1d}^{(i_n)}$ состояния, то существует множество траекторий Ξ^1 , соединяющих эти состояния (Ξ^2 для A^2 определяется аналогично):

$$\Xi^1 = \left\{ \xi_1 = \left\{ x_{1d}^{(i_0)}, x_{1d}^{(i_1)}, \dots, x_{1d}^{(i_n)} \right\} \left| \begin{array}{l} \forall k \in \{0, \dots, f\}: x_{1d}^{(i_k)} \in X_d^1, \\ \forall k \in \{0, \dots, f-1\}: (x_{1d}^{(i_k)}, x_{1d}^{(i_{k+1})}) \in C^1 \end{array} \right. \right\}.$$

Выбор элементов множества Ξ^1 выполняется координатором. Траектории ξ_1 соответствует последовательность интервалов времени переходов $\Omega_1 = \langle \omega_1^{(i_0)}, \omega_1^{(i_1)}, \dots, \omega_1^{(i_{n-1})} \rangle$; $\Omega_1 \in T_{i_0, i_1}^1 \times T_{i_1, i_2}^1 \times \dots \times T_{i_{n-1}, i_n}^1$. Эта последовательность неоднородна в том смысле, что одни ее элементы соответствуют переходам с «управляемым временем» (то есть работе в режиме стабилизации), а другие – переходам с «неуправляемым временем». Обозначим первые как Ω_{u1} , а вторые – как Ω_{a1} . Таким образом, если рассматривать два элемента нижнего уровня, с точки зрения координатора управляемыми переменными являются $\xi_1, \xi_2, \Omega_{u1}$,

Ω_{u2} . Они передаются на нижний уровень в составе координирующих сигналов. В переходном режиме действия координатора направлены на максимизацию двух показателей качества верхнего уровня: Ψ_1 (быстродействие, приоритетный показатель) и Ψ_2 (качество перехода в смысле близости к эталонной траектории или оптимальному значению глобальной целевой функции F_0).

$\Psi_1(\xi_1, \xi_2, \Omega_1, \Omega_2) = -T_s$; $T_s = \max(T_1(\xi_1, \Omega_1), T_2(\xi_2, \Omega_2))$ – время перехода всей системы в целевое множество. Здесь $T_1(\xi_1, \Omega_1) \in [0, \infty)$ – время перехода дискретной абстракции A^1 в целевой инвариант $W_1^{(t_1)} \subseteq F_1^{(t_1)}$, T_2 – время перехода A^2 . Гарантия: $\Psi_1^g(\xi_1, \xi_2, \Omega_{u1}, \Omega_{u2}) = \min_{\Omega_{d1}, \Omega_{d2}} \Psi_1(\xi_1, \xi_2, \Omega_{u1}, \Omega_{u2}, \Omega_{d1}, \Omega_{d2})$.

Для определения $\Psi_2(\xi_1, \xi_2, \Omega_1, \Omega_2)$ на интервале $[0, T_s]$ представим ось времени τ как последовательность интервалов оси реального времени I_n , то есть $\tau = \{I_n\}$, $n \in \{1, \dots, N_T\}$. $I_n = [\tau_n, \tau'_n]$ – замкнутые интервалы, $\forall n: \tau_n \leq \tau'_n$, $\forall n > 1: \tau_n = \tau'_{n-1}$, $\forall n: I_n \subseteq [0, T_s]$. Кроме того, $T_s = \sum_{n=1}^{N_T} (\tau'_n - \tau_n)$. Гарантированное значение глобальной целевой функции F_0 рассчитывается отдельно для каждого интервала времени I_n , в течение которого состояния дискретных абстракций элементов нижнего уровня не меняются, то есть выполняется переход из одного состояния в другое. Ψ_2 рассчитывается на основании интервальных гарантий для F_0 :

$$\Psi_2(\xi_1, \xi_2, \Omega_1, \Omega_2) = \frac{1}{T_s} \sum_{n=1}^{N_T} (\tau'_n - \tau_n) \left[\min_{F_1 \in B_n^1, F_2 \in B_n^2, d^0 \in D^0} F_0(F_1, F_2, d^0) - F_0(F_1^*, F_2^*, d_{opt}^0) \right]^2.$$

Здесь B_n^1 , B_n^2 – множества значений показателей качества элементов нижнего уровня на интервале времени I_n . Эти множества определяются тем, какие переходы абстракций выполняются на интервале I_n . Также определим гарантию $\Psi_2^g(\xi_1, \xi_2, \Omega_{u1}, \Omega_{u2}) = \min_{\Omega_{d1}, \Omega_{d2}} \Psi_2$.

Рассмотрим кратко алгоритм координации. Начальные состояния абстракций известны, так что задача координатора сводится к выбору таких траекторий ξ_1 , ξ_2 и их параметров Ω_{u1} , Ω_{u2} , которые максимизируют гарантии Ψ_1^g и Ψ_2^g при условии, что конечными состояниями траекторий будут целевые состояния абстракций. Так как показатель быстродействия Ψ_1^g является приоритетным, прежде всего для каждой абстракции решается задача поиска кратчайшего маршрута на графе. Затем для найденных траекторий ξ_1^0 и ξ_2^0 выполняется численная оптимизация Ψ_2^g путем выбора длительностей переходов с управляемым временем Ω_{u1} , Ω_{u2} . Дальнейшее улучшение работы

системы в переходном режиме возможно за счет выбора новых траекторий дискретных абстракций ξ_1^1, ξ_2^1 и повторной оптимизации Ψ_2^g . В процессе работы итеративного алгоритма координации запоминаются траектории ξ_1^*, ξ_2^* и параметры $\Omega_{u1}^*, \Omega_{u2}^*$, обеспечивающие лучшие гарантии Ψ_1^g и Ψ_2^g .

Процесс координации является «сквозным», то есть координирующая система всегда определяет полные траектории абстракций, но элементы нижнего уровня выполняют лишь первый шаг этих траекторий, а затем обращаются к координатору, который рассчитывает новые траектории. Каждая локальная система управления работает в том или ином режиме до тех пор, пока не будут выполнено условие перехода в новое состояние абстракции. При использовании стабилизирующего регулятора $r^{(1)}$ таким условием является истечение времени, определенного координатором, а при использовании переходных регуляторов $r^{(2)}$ и $r^{(3)}$ – вход в определенные инварианты пространства состояний. Таким образом, элементы нижнего уровня значительную часть времени работают независимо. По окончании решения своих задач элементы нижнего уровня получают новые координирующие сигналы $\beta_1^* = \langle \xi_1^*, \Omega_{u1}^* \rangle$ и $\beta_2^* = \langle \xi_2^*, \Omega_{u2}^* \rangle$, определяющие новые траектории и длительности переходов.

Локальные системы управления с гарантированным качеством

Локальные многокритериальные системы управления дискретно-непрерывными объектами обеспечивают работу рассмотренных выше алгоритмов координации.

Гибридный автомат, используемый для моделирования гибридных объектов и систем управления: $H = \langle (Q \times X), (U \times D), (\Sigma_u \times \Sigma_d), f, \delta, Inv, I, Y, h \rangle$. Здесь $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_m\}$ – множество дискретных состояний; $X \subseteq \mathbb{R}^n$ – множество непрерывных состояний; $U \subseteq \mathbb{R}^{n_u}$ и $D \subseteq \mathbb{R}^{n_d}$ – множества допустимых значений непрерывных управлений $u(t)$ и помех $d(t)$; Σ_u и Σ_d – конечные множества значений дискретных управлений и помех $\sigma_u(\cdot)$ и $\sigma_d(\cdot)$; $f: Q \times X \times U \times D \rightarrow TX$ – непрерывная динамика, $\delta: Q \times X \times \Sigma_u \times \Sigma_d \rightarrow 2^{Q \times X}$ – функция переходов между дискретными состояниями; $Inv \subseteq Q \times X$ – инвариантное множество; $I \subseteq Q \times X$ – множество начальных состояний; $h: Q \times X \rightarrow 2^Y$ – выходное отображение.

Решающий определенную задачу регулятор $g^*: Q \times X \rightarrow 2^{\Sigma_u \times U}$, называется *наименее ограничивающим*, если для всех прочих регуляторов g , решающих эту же задачу, выполняется условие включения отношений $g \subseteq g^* \Leftrightarrow g(q, x) \subseteq g^*(q, x) \quad \forall (q, x) \in Q \times X$. Задача выбора управления является теоретико-игровой. Первым игроком является управление, которое использует

$u(\cdot)$, $\sigma_u(\cdot)$ для удержания состояния системы в F , а вторым игроком – помехи и неопределенности $d(\cdot)$, $\sigma_d(\cdot)$.

В работе рассмотрен синтез наименее ограничивающего регулятора по одной группе критериев, связанный в вычислении максимального управляемого инварианта – такого множества $W^* \subseteq F$, при движении из которого регулятор может гарантировать выполнение условия $(q, x) \in F$ в течение заданного времени. Вычисление инварианта выполняется путем численного решения модифицированных уравнений Гамильтона-Якоби методом множеств уровня.

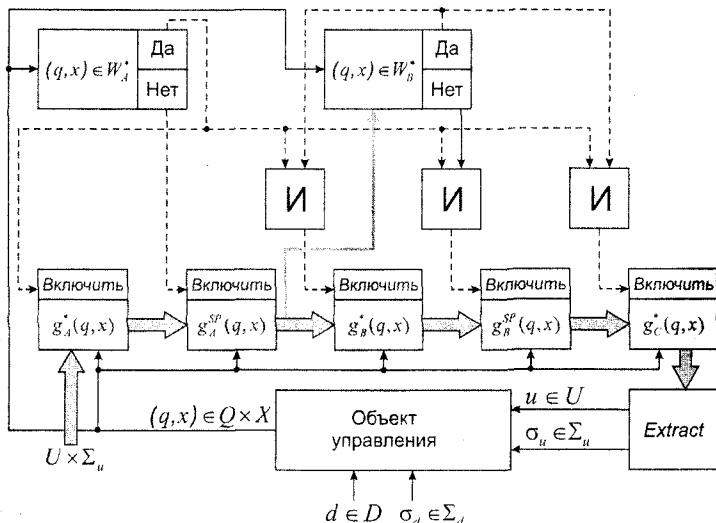


Рис. 2. Локальная система управления

Многокритериальная локальная система управления имеет последовательную (цепочечную) структуру, отражающую наличие трех групп критериев, сформированных по приоритету. В нормальном режиме, когда гарантируется выполнение заданий для всех критериев первой и второй групп, то есть выполняются как требования безопасности, так и требования координатора, исходное допустимое множество значений сигналов управления последовательно сужается с помощью отношений регуляторов по трем группам критериев g_A^* , g_B^* , g_C^* , а единственный сигнал управления выделяется элементом *Extract*. Если для первой группы критериев выполнение заданий не гарантируется, все последующие отношения (за исключением *Extract*) заменяются тождественными отображениями, а регулятор g_A^* заменяется на g_A^{SP} (регулятор перехода с максимальным быстродействием). Соответственно, если не гарантируется выполнение заданий для критериев второй группы, g_B^* заменяется на g_B^{SP} . Эта автоматическая замена используется при координации в переходном режиме. На рис.

2 тонкими линиями показаны обычные сигналы (управление, обратная связь по состоянию), прерывистыми – логические сигналы, широкими – множества. Каждый блок регулятора (например, g_A^*) имеет специальный вход *Включить*. Если на вход *Включить* регулятора подается 1, он работает в обычном режиме, а если 0 – исходное множество управлений передается на выход без изменений. Далее в работе рассмотрены вопросы программной реализации локальных систем управления и передачи между регуляторами множеств значений сигналов.

Двухуровневая система управления ультразвуковой установкой

Установка для диспергирования включает два агрегата: систему подачи материала (СПМ) и ультразвуковой генератор (УЗГ). Для СПМ, которая представляет собой резервуар с двумя управляемыми каналами подачи исходного продукта и электромеханическим преобразователем, разработана модель в виде гибридного автомата, имеющего 25 дискретных состояний q , 6 непрерывных переменных состояния x , два дискретных управляющих сигнала σ_u (включение/выключение каналов подачи) и одну непрерывную неопределенность d . Критерии СПМ первой группы определяют минимально и максимально допустимый объем продукта в резервуаре с точки зрения безопасности:

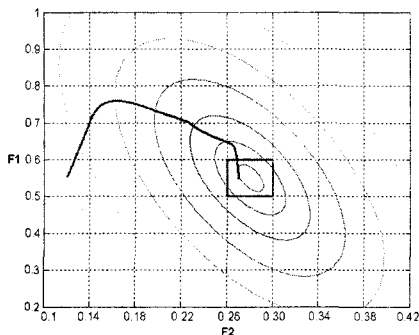
$$J_1^2((q_0, x_0), \sigma_u(\cdot), d(\cdot)) = \inf_{t \in [0, T]} (x_1(t)), \quad J_2^2((q_0, x_0), \sigma_u(\cdot), d(\cdot)) = -\sup_{t \in [0, T]} (x_1(t)).$$

С помощью заданий на критерии второй группы J_3^2, J_4^2 координатор определяет минимальные и максимальные значения объема продукта, для которых обеспечивается требуемая дисперсность конечного продукта. Для СПМ рассчитаны максимальные управляемые инварианты, определяющие допустимый объем продукта в резервуаре, и наименее ограничивающие регуляторы для синтеза дискретной абстракции. Результаты моделирования СПМ в Matlab подтверждают правильность расчета этих регуляторов и максимальных управляемых инвариантов. Если в какой-либо момент времени начальное состояние СПМ принадлежит максимальному управляемому инварианту по второй группе критериев, то всегда существует локальное управление, гарантирующее выполнение заданий координатора.

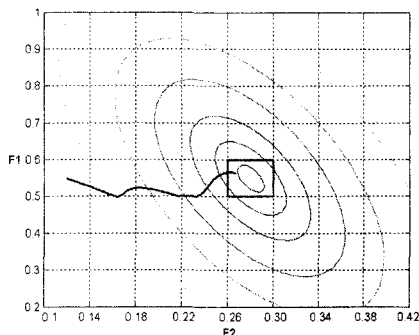
Глобальная целевая функция имеет квадратичную форму и зависит от двух показателей нижнего уровня – F1 (мощность ультразвуковых колебаний) и F2 (объем продукта). Множество J_C выпуклое и позволяет использовать алгоритм координации 1 в установившемся режиме. Решение в виде максимальных управляемых инвариантов было найдено в Matlab за 8 шагов, при этом вычисления на каждом шаге занимали в среднем 7,12 секунд. Испытания установки на ТОО «ЧЕЛАК» в установившемся режиме показали, что при условии удержания состояния в рассчитанных инвариантах гарантируется дисперсность продукта не хуже 15 мкм (результаты замеров: 12,2 мкм, 14,1 мкм, 11,7 мкм).

Моделирование координации в переходном режиме выполнено в Matlab. Гибридные автоматы агрегатов, регуляторы $r^{(1)}, r^{(2)}, r^{(3)}$ и специальные эле-

менты для связи с верхним уровнем реализованы S-функциями. Окончание решения задач стабилизации определяется по таймеру, а задач перехода – по пересечению верхней или нижней границы соответствующего целевого инварианта. Алгоритм координации задает условия окончания решения локальных задач в соответствии с вычисленными траекториями дискретных поведенческих абстракций. На рис. 3 (а) представлена траектория системы в пространстве показателей нижнего уровня, полученная с использованием предложенного алгоритма координации в переходном режиме. Для сравнения на рис. 3 (б) приведена траектория, полученная при эталонном координирующем управлении (координация путем выбора конечного множества). В первом случае показатель качества переходного процесса Ψ_2 меньше на 38%, а также возможно программирование эталонной траектории в пространстве показателей.



а) алгоритм координации по абстракциям



б) эталонный алгоритм координации

Рис. 3. Траектории системы в пространстве показателей

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Выполнен анализ существующих способов построения систем управления по иерархическому принципу. Установлено, что для создания двухуровневых систем управления динамическими дискретно-непрерывными объектами с гарантированным качеством необходимы новые методы и алгоритмы координации, учитывающие применение элементами нижнего уровня алгоритмов управления, основанных на вычислении множеств достижимости в дискретно-непрерывном пространстве состояний.

2. Предложена общая схема синтеза двухуровневой дискретно-непрерывной системы управления с определением гарантий на основании вычисления локальных множеств достижимости. Введены три группы критериев элементов нижнего уровня с различным приоритетом, определяющие связи между локальными и глобальными целями. Показано, что двухуровневая система может работать в одном из двух глобальных режимов: установившемся и переходном. В переходном режиме координатор решает свою задачу на осно-

вании некоторого известного множества гарантированных локальных решений, которые агрегированы в виде поведенческих абстракций. В установленном режиме в процессе координирования выполняется поиск новых уточненных гарантированных локальных решений в виде инвариантных множеств элементов нижнего уровня. Наличие двух глобальных режимов определяет необходимость разработки двух различных методов координации.

3. Разработаны метод и итеративные алгоритмы координации для двух-уровневых дискретно-непрерывных систем управления, позволяющие получить гарантированное значение глобального показателя качества в установленном режиме в условиях действия помех и неопределенностей, заданных допустимыми областями. Алгоритмы выполняют координацию по одной группе критериев при наличии на нижнем уровне двух элементов. Они осуществляют направленный поиск координирующих сигналов путем построения внутренней аппроксимации выпуклого двумерного допустимого множества значений показателей элементов нижнего уровня, согласованного с глобальной целью системы. Данные алгоритмы позволяют существенно уменьшить вычислительные затраты за счет понижения размерности задач вычисления дискретно-непрерывных множеств достижимости.

4. Для координации в переходном режиме разработана агрегированная модель элемента нижнего уровня в виде дискретной поведенческой абстракции. Каждая вершина графа абстракции соответствует определенной последовательности инвариантных множеств, через которые проходит состояние объекта, и включаемым при этом регуляторам. Рассчитана абстракция СПМ, агрегирующая информацию по дискретно-непрерывному объекту управления, трем локальным регуляторам и целям управления, значимым с точки зрения верхнего уровня. Результаты совместного моделирования в Matlab реального объекта и системы управления, осуществляющей управление по его агрегированной модели, подтвердили эффективность абстракции.

5. Разработаны метод и итеративный алгоритм координации для работы в глобальном переходном режиме, основанные на совместном поиске траекторий двух дискретных абстракций. Алгоритм координации с определением полных траекторий обеспечивает переход системы в заданное целевое множество даже тогда, когда координатор не вмешивается в работу нижнего уровня после завершения каждого перехода дискретных абстракций, так как начальные траектории гарантируют переход в целевое множество за определенное время.

6. Предложена последовательная структура локальной системы управления, реализующая многокритериальное управление на нижнем уровне в соответствии с заданиями координатора и выполняющая переключение между отдельными локальными алгоритмами управления. Система реализована в Matlab, ее элементы выполнены в виде блоков на языке C++. Создано программное обеспечение в Matlab, позволяющие определять максимальный управляемый инвариант дискретно-непрерывного объекта по заданным критериям качества.

7. Разработанные алгоритмы координации были апробированы на практической задаче управления ультразвуковой установкой. Для установившегося режима в Matlab рассчитаны максимальные управляемые инварианты, обеспечивающие требуемое качество конечного продукта. Испытания установки в установившемся режиме на ТОО «ЧЕЛАК» показали, что при условии нахождения состояния агрегатов в данных инвариантах гарантируется дисперсность продукта не хуже 15 мкм. Моделирование координации в переходном режиме в Matlab показало улучшение качества переходного процесса на 38% при гарантированном быстродействии.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Угаров П.А. Координация в иерархических гибридных системах управления с использованием поведенческих абстракций// Известия Челябинского научного центра УрО РАН. – 2004. – № 1 (22). – С. 186–191.
2. Угаров П.А. Верифицированные алгоритмы координации для гибридных иерархических систем управления// XXIII Российская школа по проблемам науки и технологий. Тезисы докладов. – Миасс: МСНТ, 2003. – С. 86.
3. Угаров П.А. Двухуровневые верифицированные системы с динамическим выбором алгоритмов управления// Электронный журнал «Исследовано в России». – 2004. – С. 2335–2344.
4. Угаров П.А., Тележкин В.Ф. Синтез многоуровневых систем управления с гарантированным качеством// В кн.: Механика и процессы управления. Труды XXII Уральского семинара. – Екатеринбург: Уральское отделение РАН, 2002. – С. 340–345.
5. Угаров П.А., Тележкин В.Ф. Выбор агрегированных макропеременных для решения задачи координации локальных целей управления// XX Российская школа по проблемам проектирования неоднородных конструкций. Тезисы докладов. – Миасс: МНУЦ, 2000. – С. 66.
6. Угаров П.А., Тележкин В.Ф. О формализации описания многоуровневой системы управления ультразвуковой установкой// В кн.: Проблемы проектирования неоднородных конструкций. Труды XX Российской школы. – Миасс: МНУЦ, 2000. – С. 294–299.
7. Тележкин В.Ф., Девятков М.А., Угаров П.А. Микропроцессорная система для управления технологическим процессом диспергирования лакокрасочных материалов// Системы автоматического управления: Тем. сб. научн. тр. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2000. – С.117–118.
8. Тележкин В.Ф., Девятков М.А., Карсунцев И.В., Кузьменко А.В., Угаров П.А. Проектирование сложных технических систем: Учебное пособие. – Челябинск: Издательство ЮУрГУ, 2000. – Ч.2. – 72 с.
9. Тележкин В.Ф., Девятков М.А., Угаров П.А. Многоуровневая структурная оптимизация САУ на основе декомпозиции фазового пространства// Материалы международной конференции по управлению «АВТОМАТИКА – 2001». – Одесса, 2001.
10. Тележкин В.Ф., Девятков М.А., Угаров П.А. Методика синтеза многоуровневых САУ с использованием декомпозиции фазового пространства// В кн.: Проблемы проектирования неоднородных конструкций. Труды XXI Российской школы. – Миасс: МНУЦ, 2001 – С. 327–332.
11. Угаров П.А., Тележкин В.Ф. Верифицированный алгоритм координации для иерархических гибридных систем управления// Электронный журнал «Исследовано в России». – 2004. – С. 362–372.