

На правах рукописи



СЕРГИН Михаил Юрьевич

**ПРИНЦИПЫ, МЕТОДЫ И АЛГОРИТМЫ ПОСТРОЕНИЯ
СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИМИ ПРОЦЕССАМИ СО СТРУКТУРНОЙ НЕ-
ОПРЕДЕЛЕННОСТЬЮ**

05.13.06 – Автоматизация и управление технологическими процессами
и производствами (промышленность)

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Тамбов 2004

Работа выполнена на кафедре "Информационные процессы и управление" Тамбовского государственного технического университета

Научный консультант доктор технических наук, профессор
Матвейкин Валерий Григорьевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор
Карапетян Рубен Миртадович

доктор технических наук, профессор
Бирюков Алексей Леонидович

Борис Васильевич

доктор технических наук, профессор

Палюх

Ведущая организация

Институт микропроцессорных и
вычислительных систем РАН, г. Москва

Защита состоится 2 июля 2004 года в 14 часов на заседании диссертационного Совета Д 212.260.01 Тамбовского государственного технического университета по адресу: 392000, г. Тамбов, Советская 106, ТГТУ, Большой зал.

Отзывы в двух экземплярах, скрепленные гербовой печатью, просим направлять по адресу: 392000, г. Тамбов, Советская, 106, ТГТУ, секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан " ____ " _____ 2004 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



А.А. Чуриков

Подписано к печати 19.05.2004

Гарнитура Times New Roman. Формат 60 × 84/16. Бумага офсетная.

Печать офсетная. Объем: 1,86 усл. печ. л.; 1,94 уч.-изд. л.

Тираж 100 экз. С. 361

Издательско-полиграфический центр ТГТУ

392000, Тамбов, Советская, 106, к. 14

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Важным направлением повышения эффективности производства является разработка и внедрение систем управления (СУ), обеспечивающих оптимальный ход всех технологических процессов (ТП). Такой подход позволяет улучшить организацию производства в целом, а также решить частные задачи по экономии материальных и энергетических ресурсов, защите окружающей среды, повышению качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции.

Широкий класс СУ ТП характеризуется функционированием в условиях различного типа отказов, изменений внешней среды, внутренних трансформаций при неполной и неточной исходной и текущей информации. Трудность построения СУ ТП такого класса обусловлена необходимостью разрешения проблем, связанных с преодолением параметрической и структурной неопределенности.

Задачам определения поведения и интервалов изменения неопределенных параметров динамической системы посвящено большое количество исследований. Имеются успешные решения по определению возможных значений параметров с использованием вероятностных методов, субъективных знаний экспертов и интервального анализа. Из развиваемых ныне направлений продуктивным является подход, основанный на "принципе гарантированного результата", где при принятии решения о параметрах с неопределенными значениями ориентируются на наихудший результат.

Задачи со структурной неопределенностью или, другими словами, по учету необходимой перестройки в системе, например, включения резервных элементов, перехода на другой режим работы, использования новых моделей и так далее, изучаются на протяжении последних трех десятков лет. Основные результаты исследований в этой области содержатся в работах С.В. Емельянова, И.Е. Казакова, В.М. Артемьева, В.А. Бухалева, Ю.Л. Муромцева при изложении вопросов теорий систем с переменной и случайной структурой, систем на множестве состояний функционирования. Подробно описаны задачи мультиструктурного представления моделей, оптимизации алгоритмов оценивания, управления и определения вероятностей состояний структур. Однако сохраняется необходимость изучения проблем выбора наилучшего варианта структур моделей ТП, измерителей и функционалов для меняющихся условий функционирования.

В настоящее время степень детализации, компромиссная сторона между сложностью, точностью и реализуемостью модели ТП и частей его СУ, а также учет факторов неопределенности выражаются эвристическими соображениями проектировщика с опорой на экспериментальные данные, если таковые существуют. Говорить о том, насколько эффективен используемый подход и лучшие ли варианты отбираются, довольно проблематично. Следовательно, нет большой уверенности в том, что полученные для ТП управления будут надлежащими.

В связи с этим все более острой становится потребность в разработке новых методов и алгоритмов, делающих возможным получение оптимальных решений для определения структур моделей ТП и отдельных составляющих СУ. Это обеспечит свободу в быстрой перестройке режимов функционирования, готовность к отказам и изменению целей работы, изменению номенклатуры выпускаемой продукции, расширению функциональных возможностей и создания открытой архитектуры СУ.

Диссертационная работа выполнялась в соответствии с постановлением Правительства РФ от 28.05.96 "О приоритетных направлениях развития науки и техники и критических технологий" по направлению "Интеллектуальные системы управления", планом Министерства образования РФ на 1995 – 2000 гг. (госбюджетная тема "Теория, методы, алгоритмы управления динамическими системами, формализованными на нечетких множествах").

Цель диссертационной работы состоит: в формировании концепции, разработке теоретических положений, методов и алгоритмов, позволяющих ставить и решать задачи построения СУ ТП, соответствующих классу систем со свойствами структурной неопределенности; в применении полученных результатов для построения СУ конкретными ТП.

Методы исследования. В диссертации научные исследования основываются на методах теории управления, нечетких множеств, принятия решений и систем массового обслуживания.

Научная новизна. Разработаны концепция и методология построения СУ ТП со структурной неопределенностью на основе решения задач выбора и идентификации.

Обоснованы принципы формирования множества структур моделей ТП, измерителей и функционалов, учитывающие изменения по состояниям функционирования (СФ).

Получены методы и алгоритмы выбора оптимальных структур СУ ТП рассматриваемого класса и их частей.

Разработан метод идентификации СФ, позволяющий использовать качественные исходные оценки.

Разработан комплекс математических описаний, предназначенных для решения задач построения и имитационного исследования СУ ТП со структурной неопределенностью.

Обоснованность и достоверность научных положений и выводов подтверждается применением системного подхода, корректным использованием современного математического аппарата, проверкой на основе имитационных исследований, соответствием результатов данным, полученным в исследованиях других авторов.

Практическая ценность работы. Разработана методика построения СУ, использующая качественную оценку практиков и обеспечивающая требуемый ход ТП в условиях отказов и перестройки режимов функционирования.

Получены алгоритмы, позволяющие при наличии структурной неопределенности обеспечить автоматизацию процесса построения СУ и ее отдельных подсистем.

Разработано комплексное программное обеспечение, делающее возможным создание и исследование СУ ТП рассматриваемого класса.

С использованием предложенных методов и алгоритмов построены СУ процессами вулканизации и воздухообмена, исследованы динамические характеристики этих процессов. Результаты исследования нашли свое применение в действующих СУ, оформлены в виде технической документации и переданы для использования разработчикам систем вулканизации и жизнеобеспечивающего оборудования.

Реализация научно-технических результатов. Полученные в диссертации теоретические и практические результаты использовали в своей работе следующие отечественные и зарубежные научно-технические и промышленные предприятия: ОАО "Научно-исследовательский институт резинотехнического машиностроения" (г. Тамбов, 2003 г.); ОАО "Торрус" (Авторемзавод) (г. Тамбов, экон. эффект – 210 тыс. р., 2000 – 2003 гг.); ОАО "Тамбовполимермаш" (г. Тамбов, экон. эффект 163 тыс. р., 2003 г.); ЗАО "Стройпласт – 2000" (г. Тверь); ОАО "Пигмент" (г. Тамбов, экон. эффект – 186 тыс. р., 2003 г.); ООО "Диана-Текс" (г. Иваново, 2003 г.); ЗАО "Гамма-Металл" (г. Тамбов, экон. эффект 96 тыс. р., 2003 г.); ОАО "Тамбовский завод «Комсомолец» им. Н.С. Артемова" (г. Тамбов, экон. эффект – 118 тыс. р., 2003 г.); фабрика "Griferia Marti" (Испания, 2001 г.); ОАО "Тамбовский хлебокомбинат" (г. Тамбов, экон. эффект 130 тыс. р., 2001 – 2003 гг.).

Материалы диссертации используются в учебных курсах Тамбовского ГТУ при обучении студентов специальности 210200 – "Автоматизация и управление технологическими процессами и производствами" и военно-учетных специальностей 030402, 030403, 030406.

Апробация работы. Основные положения работы докладывались и обсуждались на V и VI научно-технических конференциях ученых ТГТУ (г. Тамбов, 2000, 2001 гг.); на II Всероссийской научной конференции

в ТГУ им. Г.Р. Державина по проблемам математического моделирования (г. Тамбов, 2001 г.); на Международной конференции по компьютерным наукам и информационным технологиям в СГУ (г. Саратов, 2002 г.); на V Международной научно-технической конференции по новым информационным технологиям и системам в ПГУ (г. Пенза, 2002 г.); на V Международной научной конференции по вопросам математического моделирования физических, экономических, технических и социальных систем и процессов в УлГУ (г. Ульяновск, 2003 г.); на IV Международной научной конференции по актуальным вопросам современной науки в СНЦ РАН (г. Самара, 2003 г.); на научных семинарах кафедры технической кибернетики ВВИА им. профессора Н.Е. Жуковского (г. Москва, 1993 – 1996, 1998, 2000 – 2002 гг.) и кафедры информационных процессов и управления ТГТУ (г. Тамбов, 1998 – 2003 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано в центральной печати более 50 научных работ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, семи глав, выводов по работе, списка литературы (307 наименований) и приложений. Объем диссертации составляет 305 страниц, в том числе 45 рисунков и 11 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, формулируется цель и задачи исследования, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, изложено краткое содержание глав.

В первой главе дан критический анализ состояния вопросов построения СУ ТП, в ходе которого рассмотрены проблемы выбора математической модели ТП для синтеза управления, учета факторов неопределенности, получения информации и учета динамических свойств измерительной подсистемы, нахождения управляющего воздействия в условиях неопределенности. Отмечается потребность в развитии способов построения СУ ТП, которые должны работать при наличии структурной неопределенности.

Показана необходимость постановки и решения новых задач, обеспечивающих получение оптимальных вариантов структур моделей ТП и частей СУ для меняющихся условий функционирования.

Рассмотрена целесообразность использования качественных исходных оценок при идентификации СФ ТП, позволяющих производить распознавание в отсутствии или при малом объеме статистических данных.

Отмечается острая заинтересованность разработчиков СУ ТП в создании метода выбора оптимального состава измерителей в структуре модели наблюдения.

Выяснено, что актуальным является разработка метода выбора оптимальной структуры функционала, определяющего оценку функционирования СУ ТП.

На основе проведенного анализа сформулированы признаки рассматриваемого класса систем, основные задачи исследования и намечены пути решения.

Вторая глава посвящена разработке концепции построения СУ ТП со структурной неопределенностью, методологии и формализации выбора оптимальной структуры модели ТП и идентификации СФ.

Проблему создания СУ ТП, способных эффективно функционировать при наличии структурной неопределенности, предлагается решать на основе новой исходной концепции их построения. Основой усовершенствования системы взглядов на рассматриваемую проблему является структурная оптимизация модели ТП и частей СУ с учетом изменения СФ (рис. 1).

Для определения оптимальной структуры модели ТП требуется сформировать некое множество структур, предоставляющее возможность выбора, определяющее совокупность заданных отношений между любыми его элементами и характеризующее "близость" между отдельными из них.

Множество структур моделей будет состоять из конечного числа элементов и иметь вид

$$M_s = \{M_{s_1}, M_{s_2}, \dots, M_{s_a}\}, \quad (1)$$

где a – число вариантов структур моделей.

Отдельно взятые структуры моделей M_{s_B} , $B = \overline{1, a}$ представляются матрицами четкого отношения, осуществляющими отображение вида

$$M_{s_B} : Q^{(B)}(D \times L) \rightarrow \{0, 1\}, \quad (2)$$

где D – множество структурных компонентов, состоящее из подмножеств D_i , $i = \overline{1, m}$, предоставляющее набор элементов для образования структуры модели; L – множество, характеризующее возможные СФ l_j , $j = \overline{1, n}$; $Q^{(B)}$ – функция, определяющая многообразие сочетаний элементов d_{ic} , $c = \overline{1, k}$ из подмножеств структурных компонентов D_i , формируемых на основе их принадлежности (непринадлежности) данной структуре модели на соответствующих элементах множества СФ L ; " \times " – знак операции декартова произведения.

Таким образом, архитектура множества структур моделей, описываемых четким отображением (2), иллюстрирующая замысел его формирования, определяется следующим образом:

$$\begin{array}{c}
 M_{s_1} : Q^{(1)}(D \times L) \rightarrow \{0, 1\} \quad \dots \quad M_{s_a} : Q^{(a)}(D \times L) \rightarrow \{0, 1\} \\
 \left. \begin{array}{c} D_1 \\ \vdots \\ D_m \end{array} \right\} \begin{array}{c} \begin{array}{c|cccc} & l_1 & l_2 & \dots & l_n \\ \hline d_{11} & 1 & 1 & \dots & 1 \\ d_{12} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ d_{13} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline & & & & \\ \hline & & & & \\ \hline d_{m1} & 1 & 0 & \dots & 1 \\ d_{m2} & 0 & 1 & \dots & 0 \\ d_{m3} & 0 & 0 & \dots & 1 \\ \vdots & & & & \\ d_{mk} & 0 & 0 & 0 & 0 \end{array} & \dots & \begin{array}{c|cccc} & l_1 & l_2 & \dots & l_n \\ \hline d_{11} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ d_{12} & 1 & 1 & \dots & 1 \\ d_{13} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \hline & & & & \\ \hline & & & & \\ \hline & & & & \\ \hline d_{m1} & 1 & 0 & \dots & 0 \\ d_{m2} & 0 & 1 & \dots & 1 \\ d_{m3} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ d_{mk} & 0 & 1 & 0 & 0 \end{array} \\ \end{array} \quad \vdots \quad \vdots \quad (3)
 \end{array}$$

Применительно к модели ТП (рис. 2) состав множества структурных компонентов D описывается как

$$D = \{T, X, U, W, G, \Phi\}, \quad (4)$$

где T – подмножество моментов времени с элементами $t_e \in T$, $e = \overline{1, o}$; X – подмножество переменных состояния ТП с элементами $x_\gamma \in X$, $\gamma = \overline{1, f}$; U – подмножество допустимых управляющих воздействий с элементами $u_\omega \in U$, $\omega = \overline{1, \delta}$; W – подмножество случайных возмущающих воздействий с элементами $w_p \in W$, $p = \overline{1, r}$; G – подмножество технологических ограничений с элементами $g_v \in G$, $v = \overline{1, z}$; Φ – подмножество операторов связи с элементами $\varphi_\alpha \in \Phi$, $\alpha = \overline{1, \beta}$.

Предложенная архитектура множества структур моделей (3), детализированная подмножеством (4) не вбирает в себя все многообразие свойств, присущих формализованному описанию ТП, поскольку мы не в состоянии, и это очевидно, охватить интересующее абсолютно и полно. Главная цель – не в создании некоего универсального множества, а в представлении принципа его формирования, где в основу положена возможность оперирования лингвистическими представлениями элементов в множествах, использования комбинационных вложений подмножеств и структурирования составляющих, описывающих условия неопределенности.

Заметим, что при переходе к понятиям теории нечетких множеств появляется возможность компактно формализовать довольно громоздкую архитектуру множества структур моделей (3) путем отказа в (2) от функции вариантов $Q^{(B)}$, $B = \overline{1, a}$.

Принимая во внимание сложность проблемы выбора структуры модели ТП для синтеза управления, предположим формализованной постановке задачи ее содержательную формулировку.

Каждый ТП можно охарактеризовать набором его структурных компонентов для моделирования и СФ, в которых он может находиться, а также весовыми характеристиками относительной важности этих компонентов. Глобальная цель оптимизации структуры модели ТП – нахождение компромисса между сложностью, точностью и реализуемостью модели ТП и устранение неадекватности реальному ходу рассматриваемого процесса. Принятие решения об оптимизации заключается в выборе набора элементов структурных компонентов из имеющегося арсенала так, чтобы после их включения в окончательно сформированную модель были достигнуты упомянутые цели. Изложенное можем сформулировать как задачу выбора в следующем общем виде.

Пусть задано конечное множество структурных компонентов модели ТП $D = \{D_1, \dots, D_m\}$, включающее некоррелированные подмножества $D_i = \{d_{i1}, \dots, d_{ik}\}$, $i = \overline{1, m}$, конечное множество СФ $L = \{l_1, \dots, l_n\}$ и матрицы $A^{(i)}$ размера $k \times n$, элементы которой $a_{icj} = \varphi(d_{ic}, l_j)$, $j = \overline{1, n}$, $c = \overline{1, k}$ трактуются как значения c -го элемента структурного компонента D_i (строка) на СФ l_j (столбец) (3). Каждому элементу подмножества D_i множества структурных компонентов D приписывается численная весовая оценка ω_{ic}^0 , $\bar{\omega}_i^0 = (\omega_{i1}^0, \dots, \omega_{ik}^0)$, определяющая важность элемента d_{ic} для формирования структуры модели ТП.

Пусть \bar{l}_j^i – столбец с номером j матрицы $A^{(i)}$. Выделим в матрице $A^{(i)}$ какие-либо b строк, и пусть множество M_{ij}^b – логически упорядоченный набор из b элементов a_{ibj} матрицы $A^{(i)}$, стоящих на пересечении каждой из выбранных строк с j -м столбцом $M_{ij}^b = \{a_{i1j}, \dots, a_{ibj}\}$, $b \leq k$. Пусть функции $F_{ij}^b(M_{ij}^b)$, которые определены при каждом $j = \overline{1, n}$ на всевозможных упорядоченных наборах M_{ij}^b элементов, определяют интегральную оценку b -го варианта i -го структурного компонента.

Иными словами, область определения M_{ij}^b – наборы значений подмножеств подмножества структурных компонентов D_i на l_j , а F_{ij}^b – оценка этих наборов. Следовательно, индекс b в функции F_{ij}^b будет определять количество возможных вариантов набора элементов (подмножеств) для каждого подмножества D_i структурных компонентов при l_j .

Функции F_{ij}^b будем считать слабо монотонными по мощности b подмножеств при каждом значении $j = \overline{1, n}$, если с увеличением мощности подмножеств (числа элементов в подмножествах) значение F_{ij}^b не убывает.

Задан набор чисел P_{ij} , $i = \overline{1, m}$, $j = \overline{1, n}$, используемый при задании ограничений снизу на значения F_{ij}^b . Заданы также числа λ_{icr} , $c \neq r$, $i = \overline{1, m}$, $c, r = \overline{1, k}$, характеризующие возможную корреляцию между отдельными элементами в подмножествах D_i при l_j .

Из множества D структурных компонентов для каждого подмножества D_i при l_j из b вариантов необходимо выбрать подмножество $\bar{S}_{ij}^{\text{оп}} = \{d_{i1j}, \dots, d_{ibj}\}$ так, чтобы была удовлетворена система неравенств

$$\max_{d_{i1}, \dots, d_{ib} \in M_{ij}^b} \{F_{ij}^b(M_{ij}^b)\} = \max_{d_{i1}, \dots, d_{ib} \in M_{ij}^b} \{F_{ij}^b(\varphi(d_{i1}l_j), \dots, \varphi(d_{ib}l_j))\} \geq P_{ij}, \quad (5)$$

$$i = \overline{1, m}, \quad j = \overline{1, n}.$$

Пороги ограничений P_{ij} интерпретируются как уровни притязаний лица, принимающего решения (ЛПР). Чем ниже уровень притязаний P_{ij} , тем легче (меньшими затратами средств) можно достичь поставленной цели.

Данную задачу будем решать методом, допускающим полный перебор возможных вариантов, а также использование меньшего числа итераций, чем при полном переборе, и устанавливающим особые правила определения лучшего варианта, если такой существует.

Рассмотрим матрицу $A^{(i)}$. Каждый столбец \bar{l}_j матрицы составлен из значений оценок элементов структурных компонентов $d_{i1}, d_{i2}, \dots, d_{ik}$ на СФ l_j . С целью удобства дальнейших операций необходимо согласование этих оценок любым из имеющихся способов. Для согласованных шкал сохраним обозначения $\varphi(D_i, l_j)$. В результате будет получена матрица $\|\varphi(D_i, l_j)\|$ оценок с согласованными шкалами. При этом, если $\varphi(D_{i1}, l_1) = \varphi(D_{i2}, l_2)$, то степень "полезности" варианта набора элементов структурных компонентов D_{i1} при СФ ТП l_1 равна степени "полезности" варианта D_{i2} при l_2 .

Заполнение матриц $A^{(i)}$ по каждому элементу структурных компонентов d_{ic} , а также определение весов ω_{ic}^0 и параметров корреляции λ_{icr} производится средними числовыми значениями, назначаемыми N экспертами (операция нормирования).

В начале процесса выбора структуры модели ТП определяется упорядоченный набор элементов M_{ij}^b из матрицы $A^{(i)}$, такой, что

$$M_{ij}^b = \{(d_{i_1}, \mu_{M_{ij}^b}(d_{i_1})), \dots, (d_{i_k}, \mu_{M_{ij}^b}(d_{i_k}))\}, \quad (6)$$

где $\mu_{M_{ij}^b}$ – характеристическая функция принадлежности, принимающая свои значения во вполне упорядоченном множестве M ; M – множество принадлежностей, указывающее степень или уровень принадлежности элемента d_{i_c} множеству M_{ij}^b .

Далее производится вычисление оценки множества M_{ij}^b посредством определения значений функции $F_{ij}^b(M_{ij}^b)$.

Суть определения функции F_{ij}^b состоит в допущении аддитивности общего эффекта действия элементов b -го подмножества i -го структурного компонента, складывающегося из локальных эффектов действия отдельных элементов в вариантах M_{ij}^b с учетом неравнозначности и взаимной корреляции d_{i_c} . В результате, вид интегральной оценки будет следующий

$$F_{ij}^b(M_{ij}^b) = \sum_{d_{i_c} \in M_{ij}^b} \varphi(d_{i_c}, l_j) \omega_{i_c}^0 + \sum_{c \neq r} \lambda_{i_{cr}} \varphi(d_{i_c}, l_j) \varphi(d_{i_r}, l_j) \omega_{i_c}^0 \omega_{i_r}^0. \quad (7)$$

Для обеспечения согласованности значений интегральных оценок с пороговыми значениями ограничений P_{ij} необходимо выполнить выравнивание функции F_{ij}^b . Данная операция позволяет на исходном этапе задания значений придать большую осознанность в работе ЛПР посредством исключения вычислительных процедур. Формульная реализация операции выравнивания имеет вид

$$\tilde{F}_{ij}^b(M_{ij}^b) = \frac{F_{ij}^b(M_{ij}^b)}{n_i^b}, \quad (8)$$

где n_i^b – число элементов в b -м подмножестве i -го структурного компонента.

Вычислив значения функций \tilde{F}_{ij}^b для всех наборов M_{ij}^b , производим выбор наилучшего варианта подмножества структурных компонентов D_i , который в случае выполнения условий пороговых ограничений будет определять оптимальную составляющую структуры модели S_{ij}^{on} .

Искомое подмножество, удовлетворяющее условию максимума интегральной оценки, определяется как

$$S_{ij}^{\text{on}} = \max_{d_{i_c} \in M_{ij}^b} \tilde{F}_{ij}^b(M_{ij}^b). \quad (9)$$

На следующем шаге проверяется выполнение условия, связанного с преодолением порогов ограничений:

$$S_{ij}^{\text{on}} \geq P_{ij}. \quad (10)$$

В случае преодоления пороговых значений полученный оптимальный вариант подмножества структурного компонента $S_{ij}^{\text{on}}, i = \overline{1, m}$ включается в формирующуюся оптимальную структуру модели ТП следующим образом:

$$\bar{S}_j^{\text{on}} = \{S_{1j}^{\text{on}}, \dots, S_{mj}^{\text{on}}\}. \quad (11)$$

Если структура модели для j -х СФ ТП сформирована полностью, работа алгоритма завершается.

Если же условие (10) не выполнено, производится корректировка весовых оценок $\omega_{i_c}^0$ на основе данных о потенциальном рассогласовании между наилучшей текущей интегральной оценкой, сформированной на варианте с элементом d_{i_c} , и требуемым целевым значением, определяемым заданными пороговыми ограничениями. Математически выражение, описывающее этап корректирования, представляется следующим образом

$$\omega_{i_c}^1 = \omega_{i_c}^0 + \left[(P_{ij} - \max_{d_{i_c}, d_{i_r} \in M_{ij}^b} \{ (\varphi(d_{i_c}, l_j) \omega_{i_c}^0 + \sum_{r \neq c} \varphi(d_{i_r}, l_j) \omega_{i_r}^0 + \sum_{c \neq r} \lambda_{i_{cr}} \varphi(d_{i_c}, l_j) \varphi(d_{i_r}, l_j) \omega_{i_c}^0 \omega_{i_r}^0) / n_i^b \}) / P_{ij} \right], \quad c = \overline{1, k}. \quad (12)$$

Далее модифицируется функция $F_{ij}^b(M_{ij}^b)$. Смысл модификации заключается в получении новых значений интегральных оценок вариантов выбора для скорректированных значений весовых оценок. Данная операция предполагает замену в формуле (7) значений весов $\omega_{i_c}^0$ на $\omega_{i_c}^1$.

Затем для максимума выравненного значения модифицированной функции вновь проверяется выполнение условия (10). В случае, если оно опять не выполнено, то снова корректируется вектор весов и модифицируется функция интегральных оценок. Решение продолжается до тех пор, пока условие (10) не будет выполнено.

При возникновении ситуации, когда предложенная процедура выбора не позволяет найти решение поставленной задачи или решение не существует, то уровень притязаний ЛППР по порогам ограничений должен быть пересмотрен.

Отличие предложенного алгоритма выбора от других формальных алгоритмов выбора подмножества из фиксированного множества вариантов состоит в том, что в нем:

– учитывается специфика рассматриваемой задачи, выражаемая в формировании логически упорядоченных наборов элементов M_{ij}^b , составляющих целостную структуру модели ТП и обеспечивающих ее тождественность существующим формам описания реальных процессов, а не всех механически получаемых сочетаний элементов подмножеств, образующих, в том числе, и абсурдные варианты;

– предусматривается возможность варьирования количественным составом элементов в структуре модели ТП, что обеспечивается так называемой операцией выравнивания – вычисление функции \tilde{F}_{ij}^b ;

– корректирование оценок элементов вектора весов $\overline{\omega}_i^0$ производится не на основе мультипликации, а путем аддитивного учета рассогласования максимума интегральной оценки с заданным пороговым ограничением в исходных весовых оценках элементов структурных компонентов;

– корреляционные связи $\lambda_{i_{cr}}$ рассматриваются между отдельными элементами внутри конкретного подмножества, а не между отдельными элементами разных подмножеств, сами же подмножества считаются некоррелированными между собой;

– организация выбора строится на многоканальной основе по СФ.

При реальном функционировании СУ переход от одной структуры модели к другой будет зависеть от правильного распознавания текущего СФ. В контексте настоящей работы под СФ понимаются условия функционирования, при которых не происходит изменения состава элементов и связей между ними в модели ТП и частях его СУ. Формулировка задачи идентификации СФ следующая.

Задано множество СФ L и множество признаков идентификации P' , определяющее наличие различных измерителей, предоставляющих информацию о СФ ТП. Причем каждому СФ $l_j \in L, j = \overline{1, n}$ в той или иной степени присущ каждый из признаков множества P' . Возможные показания измерителей $p_k \in P, k = \overline{1, r}$ определены в i -е группы, характеризующиеся ограничениями по нижнему U_{ni} и верхнему U_{vi} пределам, т.е.

$$U_{ni} \leq p_k^{(i)} \leq U_{vi}, \quad i = \overline{1, s}, \quad k = \overline{1, r}. \quad (13)$$

Для каждой группы показаний измерителей $p_k^{(i)}$ известно нечеткое отношение предпочтения (НОП) γ на множестве СФ L , или, другими словами, известна функция принадлежности $\gamma: L \times L \rightarrow [0, 1] \forall p_k^{(i)}$, значение $\gamma(l_1, l_2, p_k^{(i)})$ которой понимается как степень предпочтительности альтернативы l_1 альтернативе l_2 по i -й группе k -го признака. Таким образом, функция γ описывает семейство НОП на множестве L по параметру $p_k^{(i)}$.

Элементы множества P' , вообще говоря, различны по важности. Поэтому задано нечеткое отношение важности признаков $\Theta: P' \times P' \rightarrow [0, 1]$; величина $\Theta(p_1', p_2')$ понимается как степень, в которой признак p_1' считается не менее важным, чем признак p_2' .

В текущий момент времени показания в i -х группах k -х измерителей образуют комбинацию P^* из $p_k^{(i)}$, описывающую численно данное СФ ТП.

Из множества L по набору признаков P' для текущей комбинации показаний измерителей P^* требуется выбрать элемент l_{j^*} , характеризующий текущее СФ ТП.

Решение заключается в определении нечеткого подмножества недоминируемых альтернатив $\gamma^{\text{нд}}(l_j, p_k^{(i)})$, соответствующего НОП $\gamma(l_f, l_n, p_k^{(i)})$ при фиксированном $p' \in P'$, т.е.

$$\gamma^{\text{нд}}(l_j, p_k^{(i)}) = 1 - \sup_{p_k^{(i)} \in P^*} [\gamma(l_f, l_n, p_k^{(i)}) - \gamma(l_n, l_f, p_k^{(i)})], \quad j = \overline{1, n}, \quad k = \overline{1, r}. \quad (14)$$

Если бы выбор альтернатив осуществлялся лишь с учетом одного признака, то рациональным следовало бы считать выбор альтернатив, доставляющих по возможности большее значение функции принадлежности $\gamma^{\text{нд}}(l_j, p_k^{(i)})$ (степени недоминируемости) на множестве L . В данном же случае требуется осуществить выбор с учетом показаний от совокупности признаков, различающихся по важности. Нетрудно понять, что при фиксированном $l_f \in L$ функция $\gamma^{\text{нд}}(l_f, p_k^{(i)})$ описывает нечеткое подмножество показаний признаков, по которым альтернатива l_f является недоминируемой. Ясно, что если для двух альтернатив l_f и l_n нечеткое множество показаний признаков $\gamma^{\text{нд}}(l_f, p_k^{(i)})$ "не менее важно", чем нечеткое множество показаний признаков $\gamma^{\text{нд}}(l_n, p_k^{(i)})$, то и альтернативу l_f следует считать не менее предпочтительной, чем альтернативу l_n .

В данном случае нужно обобщить заданное нечеткое отношение $\Theta(p'_m, p'_r)$ на множестве признаков P' на класс нечетких подмножеств множества показаний P и считать полученное нечеткое отношение результирующим НОП на множестве альтернатив L .

Основываясь на общей идее максимина в теории принятия решений, получается следующее НОП на множестве L , индуцированное функцией $\gamma^{\text{нд}}(l_j, p_k^{(i)})$ и НОП Θ :

$$\gamma(l_f, l_n) = \sup_{p_m^{(d)}, p_r^{(s)} \in P^*} \min \{ \gamma^{\text{нд}}(l_f, p_m^{(d)}), \gamma^{\text{нд}}(l_n, p_r^{(d)}), \Theta(p'_m, p'_r) \}. \quad (15)$$

Это НОП рассматривается как результат "свертки" семейства нечетких отношений $\gamma(l_f, l_n, p_k^{(i)})$ в единое результирующее НОП с учетом информации об относительной важности признаков p'_k , заданной в форме нечеткого отношения Θ .

Построением НОП γ исходная задача выбора сводится к задаче выбора с единственным отношением предпочтения. Поэтому для ее решения достаточно определить соответствующее множество недоминируемых альтернатив. Согласно (14) формульная реализация нахождения такого множества будет соответствовать выражению вида

$$\tilde{\gamma}^{\text{нд}}(l_j) = 1 - \sup_{l_f, l_n \in L} [\gamma(l_n, l_f) - \gamma(l_f, l_n)], \quad j = \overline{1, n}. \quad (16)$$

Полученное множество $\tilde{\gamma}^{\text{нд}}$ корректируется с тем, чтобы исключить патологические случаи, когда оценка какой-либо альтернативы $\gamma(l_f, l_f)$ неизвестна по причине отсутствия информации о ней. Тогда эта альтернатива оказывается определенно недоминируемой. Математическое описание этого обстоятельства представляется следующим образом:

$$\gamma^{\text{нд}}(l_j) = \min_{l_j \in L} \{ \tilde{\gamma}^{\text{нд}}(l_j), \gamma(l_j, l_j) \}, \quad j = \overline{1, n}. \quad (17)$$

Окончательно СФ определяется выбором альтернативы, доставляющей максимум предыдущей функции $\gamma^{\text{нд}}(l_j)$:

$$l_{j^*} = \sup_{l_1, \dots, l_n \in L} \{ \gamma^{\text{нд}}(l_1), \dots, \gamma^{\text{нд}}(l_n) \}. \quad (18)$$

Если наибольшую степень недоминируемости имеет не одна, а несколько альтернатив, определяющих строго выделенные СФ, то это означает, что ТП пребывает в переходном состоянии от одного СФ к другому. Именно в этом состоит достоинство предлагаемого метода идентификации, который позволяет решить вопрос отслеживания СФ ТП не скачкообразно через четкую границу, а плавно, непрерывно.

Таким образом, в данном разделе разработан метод идентификации, определяемый следующими положениями.

Теоретически обоснована возможность использования не только статистических методов распознавания СФ, имеющих свои достоинства и недостатки, но и решений, которые позволяют оперировать данными в виде нечеткого представления. Это позволяет расширить математический инструментарий решения задачи идентификации СФ и варьировать методами в зависимости от доступности исходной информации в той или иной форме.

Методика разделения диапазона возможных показаний измерителей на отдельные группы изменила постановку задачи идентификации СФ и объективно сделала возможным использование понятия нечеткого отношения предпочтения для ее решения.

Произведенная применительно к задаче идентификации СФ адаптация известных в теории принятия решений математических зависимостей, позволяющих устанавливать искомую альтернативу из числа возможных, сделала предложенный метод реализуемым, пригодным для построения СУ ТП со структурной неопределенностью.

В третьей главе дана общая методология и представлены математические процедуры, делающие возможным оптимизацию процесса наблюдения ТП с позиций концепции построения СУ, предназначенных для функционирования в условиях структурной неопределенности.

К числу важнейших проблем построения СУ в случае неполной и неточной информации относится отслеживание поведения ТП. Процесс формирования структуры модели наблюдения представлен на рис. 3. Используя изложенный принцип образования множества структур моделей, можем формализовать множество структур моделей наблюдения с помощью следующей матрицы нечеткого отношения, осуществляющей отображение вида

$$M_H : D' \times L \rightarrow [0,1]; \quad (19)$$

$$D' = \{R, Y\} = \{(T, X, W, \Phi), Y\}, \quad (20)$$

где D' – множество структурных компонентов модели наблюдения; R – подмножество структурных компонентов, включающее соответственно подмножества типа описания по временному параметру – T , состава переменных состояния ТП – X , типа представления ошибок измерений – W , типа операторов связи – Φ ; Y – подмножество, определяющее состав комплекса измерителей; L – множество СФ ТП; " \times " – операция декартова произведения.

При таком представлении множества структур моделей наблюдения задача получения оптимальной структуры будет заключаться в определении множества с оптимальными элементами по каждому структурному компоненту и составу измерителей на СФ:

$$\tilde{S}_j^{\text{оп}} = \{t_{u*}; x_{1*}, \dots, x_{b*}; w_{c*}; \phi_{v*}; y_{1*}, \dots, y_{i*}\}, \quad (21)$$

где $j = \overline{1, n}$ – индекс СФ ТП.

В работе показано, что установление оптимальных структурных компонентов модели наблюдения производится на основе согласования с идентичными компонентами оптимальной структуры модели ТП. Решение проблемы состава измерителей требует разработки специального метода выбора. В его основу было положено использование подходов теории систем массового обслуживания, где процедуры выбора строятся с учетом относительных приоритетов информационных потоков. Математически задача формулируется следующим образом.

В системе наблюдения с $N = \overline{1, i}$ потоками информации дисциплина обслуживания потоков $\delta_A^{(j)}$, $j = \overline{1, n}$, $A = \overline{1, r}$ выбирается из множества $\Delta^{(j)}$ дисциплин обслуживания с относительными приоритетами

на СФ l_j наблюдаемого ТП.

Под дисциплиной обслуживания $\delta_A^{(l_j)}$ понимается вариант возможного состава информационных потоков в системе наблюдения, сформированный с учетом их относительных приоритетов в возможных СФ.

Графическая интерпретация формирования $\delta_A^{(l_j)}$, как дисциплины класса дисциплин обслуживания с относительными приоритетами, представлена на рис. 4. Из данного рисунка следует, что дисциплину $\delta_A^{(l_j)} \in \Delta^{(l_j)}$ можно трактовать как вариант размещения потоков по $A = \overline{1, r}$ группам возможного их состава на СФ l_j , и внутри каждой группы по $Z = \overline{1, m}$ уровням, определяющим относительный приоритет потоков.

Группа возможного состава потоков A – целесообразный вариант количественного состава потоков информации для возможного СФ ТП.

Относительный приоритет потока Z – мера демонстрации уровня доверия потоку информации (на-

сколько точна и эффективна поступающая информация) в данном СФ ТП.

Таким образом, любая дисциплина $\delta_A^{(l_j)} \in \Delta^{(l_j)}$ задается вектором $\delta_A^{(l_j)} = (\delta_{A1}^{(l_j)}, \delta_{A2}^{(l_j)}, \dots, \delta_{Ai}^{(l_j)})$, где $\delta_{AN}^{(l_j)}$ – целое положительное число, определяющее приоритет потока информации $N = \overline{1, i}$ в СФ l_j , $j = \overline{1, n}$ ТП.

Требуется найти оптимальный вариант дисциплины обслуживания $\delta_{opt}^{(l_j)}$, т.е. вариант, являющийся решением задачи оптимизации

$$\max_{\delta_A^{(l_j)} \in \Delta^{(l_j)}} \{\psi(\delta_A^{(l_j)})\} \geq q^{(l_j)}, \quad j = \overline{1, n}, \quad A = \overline{1, r}, \quad (22)$$

где ψ – функция, определяющая условную точность (достоверность) наблюдения; $q^{(l_j)}$ – ограничения снизу на значения функции условной точности наблюдения по СФ.

Следовательно, суть оптимизации – нахождение состава потоков, при котором обеспечивается максимум достоверности наблюдения состояния ТП при данном СФ.

Описанный подход к формулировке задачи выбора состава измерителей является разновидностью оптимизационного подхода в условиях неопределенности. Неопределенным в процессе выбора $\delta_A^{(l_j)}$ является задание значений уровней относительного приоритета информационных потоков, которые не могут быть получены при помощи математических процедур. Устранить эту неопределенность можно, например, с помощью ЛПР, выявляя его принципиально неформализуемые предпочтения в процессе подготовки исходных данных для формирования дисциплин обслуживания.

Чтобы сделать решение возможным, необходимо определить формульное выражение функции ψ условной точности наблюдения для вариантов процедур обслуживания $\delta_A^{(l_j)}$. Это можно сделать, используя средневзвешенную оценку, которая в нашем случае будет иметь следующий вид:

$$\psi(\delta_A^{(l_j)}) = \frac{\sum_{N=1}^i \delta_{AN}^{(l_j)} \alpha_N}{g}, \quad j = \overline{1, n}, \quad (23)$$

где α_N – коэффициенты, учитывающие важность информационных потоков; g – число ненулевых (заполненных) элементов в дисциплине обслуживания.

Последовательность этапов алгоритма принятия решения следующая:

1 Задаются исходные данные: N , l_j .

2 Назначаются коэффициенты важности потоков информации α_N , задается число интервалов на шкале уровней Z . ЛПР производится размещение потоков информации в группы возможного состава A и их распределение внутри групп по уровням относительного приоритета $\delta_{AN}^{(l_j)}$. Кроме того, задаются ограничения $q^{(l_j)}$ на значения функции условной точности наблюдения ψ по СФ.

3 Вычисляется функция $\psi(\delta_A^{(l_j)})$ условной точности наблюдения для всех дисциплин обслуживания по СФ.

4 Определяется оптимальная дисциплина $\delta_{opt}^{(l_j)}$ из условия максимума критерия условной достоверности информации.

5 Выбирается оптимальный состав измерителей $y^{(l_j)}$, соответствующий группе оптимальной дисциплины обслуживания $\delta_{opt}^{(l_j)}$.

В случае невыполнения для j -го СФ условия (22) по ограничениям, ЛПР производится переопределение относительных уровней приоритета потоков информации в группах этого функционального состояния и повторяются вычислительные процедуры алгоритма.

Важной составляющей процесса наблюдения является получение оценок переменных состояния ТП. Специфика определения структур оптимальных фильтров в данной работе представлена необходимым обобщением на СФ при наблюдении ТП выбранным составом измерителей. С этой целью рассмотрены методы линейной и нелинейной фильтрации при сосредоточенных параметрах, где изложена методология выбора структур оптимальных фильтров, соответствующих предложенной концепции построения СУ.

Четвертая глава посвящена изложению методологии и формализации выбора структуры функционала и определению управления с учетом изменения СФ.

Выбор структуры функционала является одной из самых важных и сложных частей в построении СУ ТП. Требуется одновременно учесть признаки рациональности, приемлемости, технологичности, простоты и пр.

Сущность предлагаемого в работе метода выбора структуры функционала сводится в определенной степени к нахождению компромисса, где учитывается, что данная проблема не должна и не может решаться полностью без участия проектировщика, но в то же время не отрицается значение формального подхода.

Следуя концептуальным представлениям построения СУ ТП рассматриваемого класса, для формализации множества структур функционалов воспользуемся изложенным принципом формирования множества структур. Математическое описание данного множества представляется матрицей нечеткого отношения, осуществляющей отображение вида

$$M_F : D^* \times L \rightarrow [0,1]; \quad (24)$$

$$D^* = \{K^*, T^*, O^*, \Phi^*\}, \quad (25)$$

где D^* – множество структурных компонентов функционала, включающее подмножества типов задания краевых условий K^* , типов задания интервалов времени протекания процесса T^* , типов представления ограничений O^* , типов форм функционалов Φ^* ; L – множество возможных СФ ТП; "×" – знак операции декартова произведения.

Сформировав множество структур функционалов на экстремум, получаем следующую задачу: требуется выбрать приемлемую структуру функционала из числа возможных так, чтобы обеспечить оптимизацию управляемого процесса. При этом имеется конечное множество структурных компонентов функционала D^* на множестве СФ ТП L , образующее область поиска. Допустимое разбиение множества D^* на ряд непустых классов задано подмножествами краевых условий K^* , временных интервалов T^* , ограничений O^* , форм функционалов Φ^* . Используя принцип гладкой обновляемой перестановки элементов в подмножествах разбиений, позволяющий варьировать структурой функционала, требуется получить

в качестве результата выбора одиночный элемент из каждого подмножества структурных компонентов для всех возможных СФ ТП, т.е., из $k_{\alpha}^* \in K^*$, $\alpha = \overline{1, z}$, $t_{\beta}^* \in T^*$, $\beta = \overline{1, m}$, $o_{\gamma}^* \in O^*$, $\gamma = \overline{1, r}$, $\phi_{\omega}^* \in \Phi^*$, $\omega = \overline{1, k}$ выбрать $k_{\alpha(l_j)}^*$, $t_{\beta(l_j)}^*$, $o_{\gamma(l_j)}^*$, $\phi_{\omega(l_j)}^*$ $\forall l_j \in L, j = \overline{1, n}$.

Графическая интерпретация принципа гладкой обновляемой перестановки показана на рис. 5. Процесс получения вариантов структур функционалов изображается в виде совокупности деревьев с множеством вершин и дуг. Гладкость при образовании структур функционалов заключается в перестановках, не ведущих к замене формы функционала, а затрагивающих только заданные условия на оптимизацию. Основу обновления составляют перестановки самих форм функционалов.

С учетом изложенного принципа, окончательно задача выбора оптимальной структуры функционала на множестве СФ будет состоять в определении такого реализуемого подмножества $R^{(l_j)} = \{k_{\alpha}^*, t_{\beta}^*, o_{\gamma}^*, \phi_{\omega}^*\}$, $j = \overline{1, n}$, которое обладает максимальной суммой произведения

$$q_{\alpha, \beta, \gamma, \omega}^{(l_j)} = C^{(l_j)}(k_{\alpha}^*)P^{(l_j)}(\phi_{\omega}^*) + C^{(l_j)}(t_{\beta}^*)P^{(l_j)}(\phi_{\omega}^*) + C^{(l_j)}(o_{\gamma}^*)P^{(l_j)}(\phi_{\omega}^*) = (C^{(l_j)}(k_{\alpha}^*) + C^{(l_j)}(t_{\beta}^*) + C^{(l_j)}(o_{\gamma}^*))P^{(l_j)}(\phi_{\omega}^*);$$

$$\alpha = \overline{1, z}; \beta = \overline{1, m}; \gamma = \overline{1, r}; \omega = \overline{1, k}; j = \overline{1, n},$$

где $C^{(l_j)}(k_{\alpha}^*), C^{(l_j)}(t_{\beta}^*), C^{(l_j)}(o_{\gamma}^*)$ – оценки элементов структурных компонентов в j -м СФ ТП, задействованных при гладкой перестановке; $P^{(l_j)}(\phi_{\omega}^*)$ – вероятность достижения цели управления при данной форме функционала в j -м СФ.

Следовательно, критерий оптимальности структуры функционала будет иметь вид

$$I_F^{(l_j)} = \max_{\substack{k_{\alpha}^* \in K^*, t_{\beta}^* \in T^*, \\ o_{\gamma}^* \in O^*, \phi_{\omega}^* \in \Phi^*}} \{q_{\alpha, \beta, \gamma, \omega}^{(l_j)}\}. \quad (27)$$

Для построения алгоритма выбора структуры функционала вначале необходимо сформировать исходные значения оценок элементов в подмножествах структурных компонентов. Наиболее удобной формой представления численного описания элементов структурных компонентов, подлежащих гладкой перестановке, будет являться таблица, в которой нечетко представлены предпочтения экспертов Ξ_i , $i = \overline{1, N}$, меняющиеся по СФ l_j , $j = \overline{1, n}$ (табл. 1).

Другим важным моментом этапа подготовки исходных данных для выбора является учет отношений к мнениям различных экспертов. Это означает, что некто (ЛПР) к мнениям одного эксперта прислушивается в некоторой степени больше, чем к мнению другого. Важность мнений всех N экспертов представляется вектором относительных весов $W_{\Xi} = (w_{\Xi_1}, \dots, w_{\Xi_N})$.

После подготовки данных, используя правила гладкой перестановки, необходимо получить все воз-

возможные варианты заданных условий на оптимизацию:

$$V_b = (k_{\alpha}^*, t_{\beta}^*, o_{\gamma}^*); \alpha = \overline{1, z}; \beta = \overline{1, m}; \gamma = \overline{1, r}, \quad (28)$$

где b – индекс, определяющий номер варианта гладкой перестановки.

Таблица 1

остав элементов	1			n		
	1		N	1		N
	,8			,2		,3
	,1		,1	,7		,7
	,7		,5	,4		,4
	,4		,5	,9		
	,3		,2	,2		,2
	,8		,9	,6		,7

На следующем шаге вычисляются усредненные суммарные оценки каждого b -го варианта с учетом меры доверия эксперту и по СФ. Цена варианта гладкой перестановки будет определяться следующим выражением:

$$J^{(l_j)}(V_b) = \frac{\sum_{i=1}^N w_{\varepsilon_i} (C_i^{(l_j)}(k_{\alpha}^*) + C_i^{(l_j)}(t_{\beta}^*) + C_i^{(l_j)}(o_{\gamma}^*))}{N}; \quad (29)$$

$$\alpha = \overline{1, z}; \beta = \overline{1, m}; \gamma = \overline{1, r}; j = \overline{1, n},$$

где $C_i^{(l_j)}(\cdot)$ – оценка элемента структурного компонента функционала i -тым экспертом в j -м СФ; N – число экспертов.

Далее, с учетом (27) выбирается вариант состава заданных условий в функционале, соответствующий максимальному значению цены варианта гладкой перестановки в каждом СФ, т.е.

$$\max_{k_{\alpha}^* \in K^*, t_{\beta}^* \in T^*, o_{\gamma}^* \in O^*} \{J^{(l_j)}(V_b)\} \rightarrow V_{b_{\text{оп}}}^{(l_j)} = R^{(l_j)}, \quad (30)$$

$$R^{(l_j)} = \{k_{\alpha(l_j)}^*, t_{\beta(l_j)}^*, o_{\gamma(l_j)}^*\}, j = \overline{1, n}.$$

Для завершения формирования искомой структуры функционала необходимо осуществить перестановки на обновляющейся основе. При этом с помощью имитационной модели для выбранных условий оптимизации и соответствующем параметрическом обеспечении накапливаются статистические данные на использование конкретной формы функционала в возможных СФ ТП. Полученная статистика используется для расчета вероятности $P^{(l_j)}(\phi_{\omega}^*)$, $\omega = \overline{1, k}$, $j = \overline{1, n}$. Очевидно, что в соответствии с (27) форма функционала с наибольшей вероятностью и будет полностью определять оптимальную структуру.

Окончательную целостность развиваемой в работе концепции придает изложение известных методов определения оптимальных стратегий управления, но при их обобщении на возможные СФ с пред-

положением об изменениях в составах измерителей и смены функционалов.

В пятой главе даны решения задач концепции построения СУ ТП со структурной неопределенностью в аналитической форме на гипотетических примерах.

Данная глава вводит в практическую область рассмотрения предложенную ранее формализацию методов и алгоритмов для построения СУ ТП, обладающих свойствами структурной неопределенности. Последовательное представление в аналитической форме решения всех поставленных в предыдущих главах задач демонстрирует полную реализуемость предлагаемых теоретических выводов. Как следствие, в таком случае можно утверждать и о реализуемости в целом подхода построения СУ, основанного на структурной оптимизации модели ТП и частей СУ с учетом изменения СФ. Сама возможность осуществления подобного построения систем оптимального управления дает основание рассматривать предлагаемую концепцию как одно из перспективных направлений в развитии теории автоматического управления.

Следует отметить, что часть предложенных решений затрагивает проблемы ранее вообще не рассматривавшиеся и считавшиеся чрезвычайно сложными из-за слабой расположенности к формализации. Поэтому определенным успехом можно считать получение решений, объединяющих многообразие свойств ТП вместе с математическими процедурами структурной оптимизации.

Шестая глава посвящена построению СУ процессом вулканизации при местном ремонте шин на основе разработанного подхода.

Сформулирована задача оптимального управления, заключающаяся в поддержании требуемого температурного режима нагрева ремонтируемого участка шины с наибольшей степенью точности.

Получена полудетерминированная, мультиструктурная математическая модель ТП, описывающая динамику придания наложенным специальным материалам необходимых эластичных свойств, обеспечения прочных связей между конструктивными элементами шины и применяемыми пластырными субстанциями.

Моменты смены СФ, определяющих возможные структурные изменения в составных частях СУ, определены на этапе формирования опорной траектории управления. Показано, что для распознавания СФ недостаточно только информации о температуре. Дополнительно измеряемыми информационными признаками могут являться степень размягчения вновь наложенных материалов и степень диффузии сегментов макромолекул каучука в граничный слой вулканизата.

Определена модель наблюдения, особенностью структуры которой является переменный по СФ состав комплекса измерителей температуры на внутренних поверхностях нагревательных элементов и давления на участке вулканизации, основанных на различных физических принципах.

Установлена структура и выполнено обобщение на СФ оптимального фильтра, учитывающего комплексирование измерителей, и предназначенного для устранения ошибок, примешиваемых к истинным значениям на этапах усиления, преобразования и прохождения информации внутри измерительных устройств.

Найдена структура функционала, формульная реализация которого обеспечивает минимизацию энергозатрат за счет точного поддержания температурного режима на стадиях нагрева и выдержки покрышки при заданной температуре.

Определена и обобщена на СФ оптимальная стратегия управления токами нагревательных элементов вулканизационного оборудования, удовлетворяющая полученной квадратичной форме функционала.

Исследована динамика изменения основных характеристик, определяющих качественные показатели работы алгоритмов СУ в процессе ремонта покрышки для различных зон повреждения и типоразмеров шин. Получена высокая степень точности поддержания требуемого температурного режима. Расхождения между требуемой траекторией и оценками процесса определяются пределами, соответствующими передовым технологическим требованиям. Это позволяет снизить энергозатраты до минимума, что и является основным показателем качества при управлении данным процессом.

В седьмой главе выполнено построение СУ процессом воздухообмена в замкнутом производственном пространстве на основе разработанного подхода.

Сформулирована задача оптимального управления, состоящая в обеспечении максимальной продолжительности продуктивной способности регенеративных и поглотительных реакторов при полной отработке.

Получена стохастическая, мультиструктурная математическая модель ТП, описывающая динамику изменения концентраций компонентов газовой смеси (ГВС) в замкнутом производственном пространстве (ЗПП).

Обоснован состав информационных признаков и определены качественные исходные оценки, позволяющие использовать разработанный метод идентификации СФ для контроля текущей обстановки по воздухообмену.

Определен комплекс измерителей в подсистеме наблюдения, включающий различные анализаторы содержания кислорода и углекислого газа.

Показано, что для получения оценок переменных состояния возможно использование фильтра калмановской структуры в силу линейности модели ТП и комплексного измерителя.

Получено формульное описание функционала, минимизирующего объемный расход ГВС, пропускаемой через вход соответствующего реактора.

Определена по СФ оптимальная стратегия, являющаяся решением нетерминальной задачи управления.

Исследована реакция построенной СУ на возникновение экстремальных ситуаций в ЗПП по поводу воздухообмена. Сделан вывод о преимуществах разработанной СУ на основании получения меньшего объемного расхода ГВС для регенеративного и поглотительного реакторов, чем при существующем оборудовании. Тем самым достигнут позитивный эффект по наращиванию потенциала живучести людей в ЗПП при сложных экстремальных ситуациях.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1 Разработаны концепция и методология построения систем оптимального управления технологическими процессами (ТП), функционирующих в условиях структурной неопределенности.

2 Поставлены и решены задачи синтеза оптимальных структур моделей ТП, измерителей и функционалов для систем управления (СУ) с учетом изменения состояния функционирования (СФ).

3 Сформулирован принцип формирования множества структур, использующий в качестве математической основы матрицы различного типа отношений и позволяющий проводить оптимальный выбор при всевозможных СФ.

4 С использованием предложенного принципа сформированы и обоснованы множества структур моделей ТП, моделей наблюдения и функционалов СУ, которые определяют области допустимых вариантов при нахождении оптимумов соответствующих структур.

5 Предложен метод идентификации СФ, обеспечивающий распознавание условий протекания ТП с учетом размытости границ переходов и отсутствия точной исходной информации.

6 Предложен метод выбора оптимального состава измерителей в подсистеме наблюдения, основанный на использовании подходов теории систем массового обслуживания и построенный на базе относительных приоритетов.

7 Приведены постановки и решения задач оптимальной фильтрации и управления, удовлетворяющие предложенной концепции построения СУ со структурной неопределенностью.

8 Разработан комплекс математических описаний и алгоритмов решения конкретных задач, приводящих к построению СУ ТП рассматриваемого класса.

9 Созданы программные реализации теоретических разработок, позволяющие автоматизировать процессы построения и исследования СУ ТП, обладающих свойствами структурной неопределенности.

10 Для построения СУ процессами вулканизации при местном ремонте шин и воздухообмена в замкнутом производственном пространстве, относящихся по своим признакам к определенному в работе классу систем, применена предложенная концепция, позволившая: 1) повысить эффективность использования расходуемых энергетических ресурсов; 2) снизить объем средств, направляемых на восполнение запасов исходного сырья, необходимого для производства продукции; 3) снизить затраты на проведение работ по изменению номенклатуры выпускаемой продукции и расширению функциональных возможностей технологического оборудования; 4) повысить эффективность обработки данных, поступающих от обслуживающего инженерно-технического персонала.

11 Результаты работы внедрены: на ОАО "Научно-исследовательский институт резинотехнического машиностроения" (г. Тамбов), ОАО "Торрус" (Авторемзавод) (г. Тамбов), ОАО "Тамбовполимермаш" при разработке, совершенствовании и эксплуатации СУ процессом вулканизации при местном ремонте шин, а также других резинотехнических изделий; на ОАО "Пигмент" (г. Тамбов), ОАО "Там-

бовский завод «Комсомолец» им. Н.С. Артемова», ООО "Диана-Текс" (г. Иваново), ЗАО "Гамма-Металл"

(г. Тамбов) при разработке, вводе в строй, доработке и совершенствовании СУ процессом воздухообмена в производственных цехах по выпуску продукции различного назначения; на ЗАО "Стройпласт – 2000" (г. Тверь) при разработке СУ процессом производства стеклопластиковых профилей в ходе определения состава комплекса измерителей для подсистемы наблюдения; на фабрике "Griferia Marti" (Испания) при совершенствовании СУ технологической линией по производству керамических стержней, используемых для очистки воды; на ОАО "Тамбовский хлебокомбинат" при разработке и внедрении СУ технологической линией по производству хлебобулочных изделий; в учебный процесс Тамбовского государственного технического университета по курсам лекций, читаемых на факультете "Автоматизации химических производств" и факультете военного обучения.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

К н и г и

1. Сергин М.Ю. Системы управления объектами химической технологии в условиях неопределенности / М.Ю. Сергин. – М.: Машиностроение, 1999. – 88 с.

С т а т ь и

2. Громов Ю.Ю. Синтез и алгоритмическая реализация оптимальных полиномиальных фильтров / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Вестник ТГТУ. – 2000. – Т. 6, № 1. – С. 46 – 53.

3. Сергин М.Ю. Методы представления возмущений в задачах моделирования динамических объектов / М.Ю. Сергин, И.В. Захаров // Двойные технологии. – 2000. – № 1. – С. 31 – 36.

4. Сергин М.Ю. Построение систем управления в условиях действия помех / М.Ю. Сергин // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 6. – С. 21 – 23.

5. Громов Ю.Ю. Распределение средств контроля и классификация текущего технологического режима / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Информационные процессы и системы. НТИ. – 2000. – № 9. – С. 20 – 24.

6. Сергин М.Ю. Основы формирования моделей объектов теории управления / М.Ю. Сергин // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 11. – С. 26 – 27.

7. Сергин М.Ю. Новое направление формализации устройств обработки информации / М.Ю. Сергин // Вестник ТГУ им. Г.Р. Державина. – 2000. – Т. 5, № 5. – С. 628.

8. Сергин М.Ю. Описание неопределенностей при исследовании стохастических процессов в системах управления / М.Ю. Сергин // Вестник ТГУ им. Г.Р. Державина. – 2000. – Т. 5, № 5. – С. 628-629.

9. Сергин М.Ю. Выбор оптимальной структуры модели динамического объекта в условиях неопределенности / М.Ю. Сергин // Вестник ТГУ им. Г.Р. Державина. – 2000. – Т. 5, № 5. – С. 629 – 630.

10. Сергин М.Ю. Метод построения оптимальной системы управления на множестве структур моделей динамических объектов / М.Ю. Сергин // Вестник ТГУ им. Г.Р. Державина. – 2000. – Т. 5, № 5. – С. 630 – 631.

11. Сергин М.Ю. Выбор оптимального состава измерителей в структуре модели наблюдения динамического объекта / М.Ю. Сергин // Вестник ТГТУ. – 2000. – Т. 6, № 4. – С. 584 – 589.

12. Громов Ю.Ю. Метод и алгоритм определения ситуации функционирования в замкнутом производственном пространстве / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Двойные технологии. – 2000. – № 4. – С. 36 – 40.

13. Сергин М.Ю. Основы формирования моделей объектов для синтеза систем управлений / М.Ю. Сергин // Справочник. Инженерный журнал. – 2000. – № 11. – С. 41 – 42.

14. Громов Ю.Ю. Идентификация текущего режима функционирования в замкнутом биотехническом комплексе / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Контроль. Диагностика. – 2000. – № 12. – С. 13 – 18.

15. Сергин М.Ю. Выбор оптимальной структуры модели динамического объекта с учетом факторов неопределенности / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 1. – С. 8 – 16.

16. Сергин М.Ю. Выбор оптимальной структуры функционала для синтеза управлений / М.Ю. Сергин // Вестник ТГТУ. – 2001. – Т. 7, № 1. – С. 44 – 54.

17. Сергин М.Ю. Структурная оптимизация процесса наблюдения в системе управления / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 3. – С. 1 – 6.
18. Сергин М.Ю. Методы и алгоритмы структурно-оптимального построения систем управления: выбор и идентификация / М.Ю. Сергин // Вестник ТГТУ: Препр. – 2001. – Т. 7, № 2. – 36 с.
19. Сергин М.Ю. Структурная оптимизация модели состояния динамического объекта / М.Ю. Сергин // Двойные технологии. – 2001. – № 1. – С. 19 – 22.
20. Сергин М.Ю. Алгоритм определения текущей ситуации функционирования на основе нечеткого отношения предпочтения / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 5. – С. 12 – 14.
21. Сергин М.Ю. Алгоритм определения рационального состава измерителей в структуре СУ / М.Ю. Сергин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2001. – № 6. – С. 24 – 26.
22. Громов Ю.Ю. Идентификация режима функционирования системы воздухообмена в пилотируемом космическом комплексе / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Полет (авиация, ракетная техника и космонавтика). – 2001. – № 6. – С. 53 – 58.
23. Сергин М.Ю. Оптимизация информационно-поисковых систем на основе относительных приоритетов потоков информации / М.Ю. Сергин // Информационные процессы и системы. НТИ. – 2001. – № 6. – С. 1 – 4.
24. Сергин М.Ю. Метод оптимизации структур функционалов при построении систем управления / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 7. – С. 7 – 12.
25. Громов Ю.Ю. Формирование множества структур моделей динамического объекта / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Известия АИН РФ. – 2001. – № 1. – С. 67 – 71.
26. Громов Ю.Ю. Выбор оптимальной структуры модели динамического объекта для построения системы управления / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Известия АИН РФ. – 2001. – № 1. – С. 61 – 66.
27. Сергин М.Ю. Метод распознавания ситуации функционирования динамической системы при нечеткой исходной информации / М.Ю. Сергин // Двойные технологии. – 2001. – № 2. – С. 41 – 43.
28. Сергин М.Ю. Методы моделирования возмущающих воздействий при построении систем управления / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2001. – № 11. – С. 1 – 5.
29. Сергин М.Ю. Некоторые особенности формализации моделей состояния динамических объектов (на примерах объектов химической технологии и авиационной техники) / М.Ю. Сергин, И.В. Захаров // Двойные технологии. – 2001. – № 4. – С. 36 – 40.
30. Громов Ю.Ю. Влияние факторов неопределенности на процесс вулканизации при местном ремонте шин / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Справочник. Инженерный журнал. – 2001. – № 11. – С. 18 – 21.
31. Сергин М.Ю. Оптимизация комплекса измерителей в АСУ процессом вулканизации при местном ремонте шин / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 6. – С. 12 – 14.
32. Сергин М.Ю. Выбор оптимальной структуры модели объекта для построения АСУ процессом воздухообмена в замкнутом производственном помещении / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 8. – С. 12 – 15.
33. Громов Ю.Ю. Функционирование систем жизнеобеспечения замкнутых производственных помещений / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Справочник. Инженерный журнал. – 2002. – № 9. – С. 40 – 46.
34. Сергин М.Ю. Выбор оптимальной структуры функционала для синтеза управления процессом вулканизации при местном ремонте шин / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – № 9. – С. 13 – 15.
35. Сергин М.Ю. Оптимизация комплекса измерителей для наблюдения процесса воздухообмена в замкнутых производственных помещениях / М.Ю. Сергин // Экологические системы и приборы. – 2002. – № 10. – С. 35 – 37.
36. Сергин М.Ю. Автоматизация синтеза оптимальной структуры модели технологического процесса для системы управления / М.Ю. Сергин // Автоматизация и современные технологии. – 2002. – № 10. – С. 17 – 22.
37. Сергин М.Ю. Нечеткий математический синтез и анализ работоспособности устройства идентификации ситуаций функционирования для процесса воздухообмена в пилотируемом космическом комплексе / М.Ю. Сергин // Авиакосмическое приборостроение. – 2002. – № 4. – С. 71 – 76.
38. Сергин М.Ю. Выбор оптимальной структуры функционала для синтеза управления процес-

сом воздухообмена в пилотируемом космическом комплексе / М.Ю. Сергин // Полет (авиация, ракетная техника и космонавтика). – 2003. – № 3. – С. 9 – 12.

39. Сергин М.Ю. Идентификация ситуаций функционирования и исследование качественных характеристик управления в процессе вулканизации при местном ремонте шин / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2003. – № 3. – С. 6 – 11.

40. Громов Ю.Ю. Построение систем терминального управления регенерацией воздуха в герметически замкнутом объеме / Ю.Ю. Громов, М.Ю. Сергин // Автоматизация и современные технологии. – 2003. – № 11. – С. 7 – 11.

41. Сергин М.Ю. Современное состояние и возможные пути решения проблем построения систем управления технологическими процессами / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 1. – С. 1 – 8.

42. Сергин М.Ю. Формализация процедуры составления модели динамического объекта для синтеза управления (на примере процесса вулканизации при местном ремонте шин) / М.Ю. Сергин // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 3. – С. 9 – 12.

Тезисы докладов

43. Сергин М.Ю. Синтез стохастических систем управления динамическими объектами на основе структурно-оптимального подхода / М.Ю. Сергин // V науч. конф. ТГТУ: Кр. тез. докл. – Тамбов, 2000. – С. 260 – 261.

44. Сергин М.Ю. Задача формирования структуры модели состояния динамического объекта при случайных воздействиях / М.Ю. Сергин // V науч. конф. ТГТУ: Кр. тез. докл. – Тамбов: ТГТУ, 2000. – С. 261 – 262.

45. Сергин М.Ю. Оптимизация синтеза структуры модели объекта управления / М.Ю. Сергин // Компьютерное и математическое моделирование в естественных и технических науках: Матер. докл. II Всерос. науч. интернет-конф. / ТГУ им. Г.Р. Державина. – Тамбов, 2001. – С. 53 – 54.

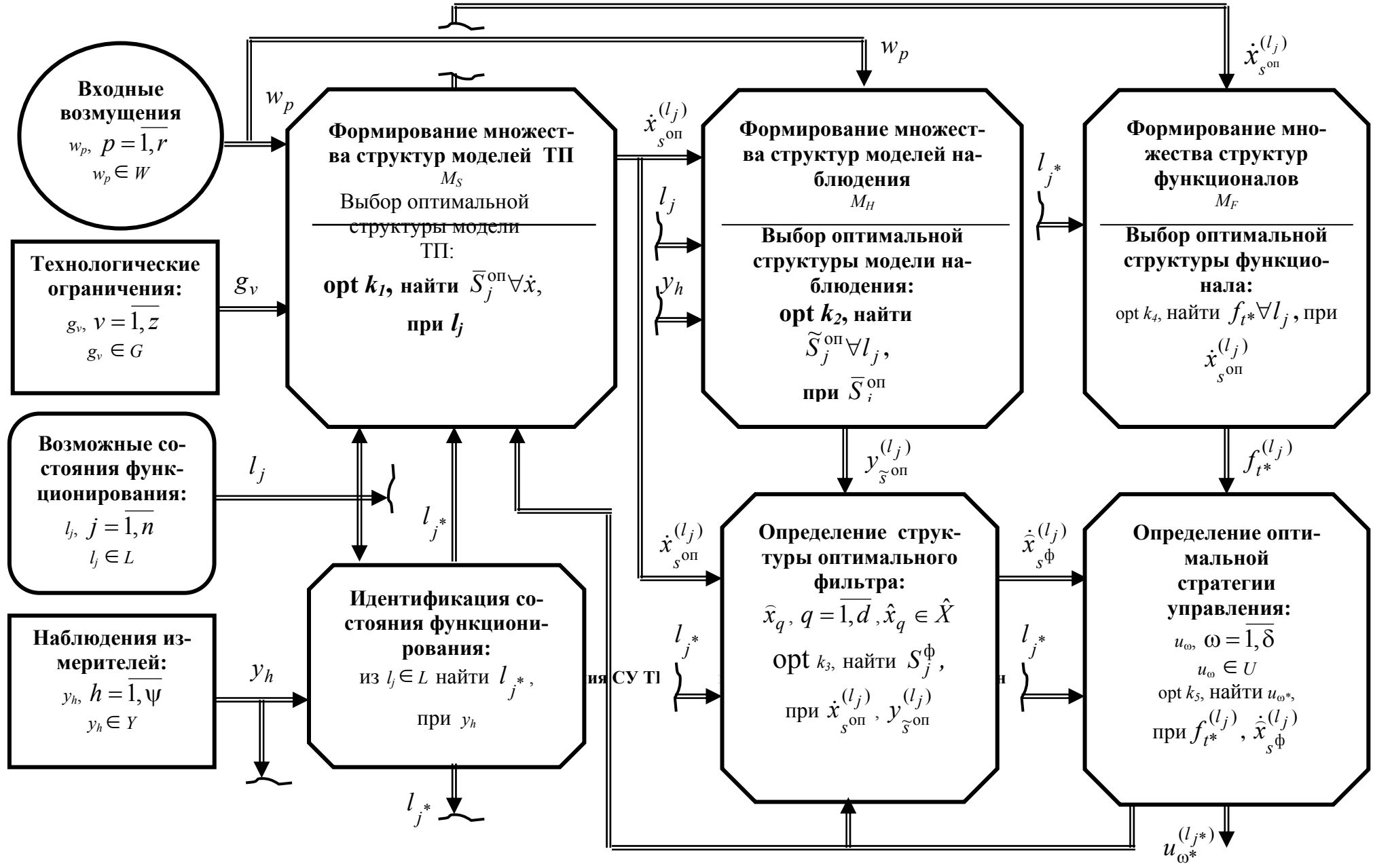
46. Сергин М.Ю. Задача определения оптимальной структуры модели динамического объекта в условиях неопределенности / М.Ю. Сергин // VI науч. конф. ТГТУ: Матер. конф. – Тамбов, 2001. – С. 166.

47. Сергин М.Ю. Принцип формирования множества структур моделей динамического объекта для синтеза системы управления / М.Ю. Сергин // Компьютерные науки и информационные технологии: Тез. докл. междунар. конф. / СГУ. – Саратов, 2002. – С. 58 – 59.

48. Сергин М.Ю. Оптимизация стохастических систем управления динамическими объектами на структурной основе / М.Ю. Сергин // Новые информационные технологии и системы: Тез. докл. V междунар. науч.-техн. конф. / ПГУ. – Пенза, 2002. – С. 208 – 209.

49. Сергин М.Ю. Выбор структуры критерия для синтеза закона управления при множестве состояний функционирования динамического объекта / М.Ю. Сергин // Математическое моделирование физических, экономических, технических, социальных систем и процессов: Тез. докл. V междунар. науч. конф. / УлГУ. – Ульяновск, 2003. – С. 154 – 155.

50. Сергин М.Ю. Оптимальное комплексирование измерителей при множестве состояний функционирования наблюдаемого объекта / М.Ю. Сергин // Актуальные проблемы современной науки: Тез. докл. IV междунар. науч. конф. / СНЦ РАН. – Самара, 2003. – С. 128 – 130.



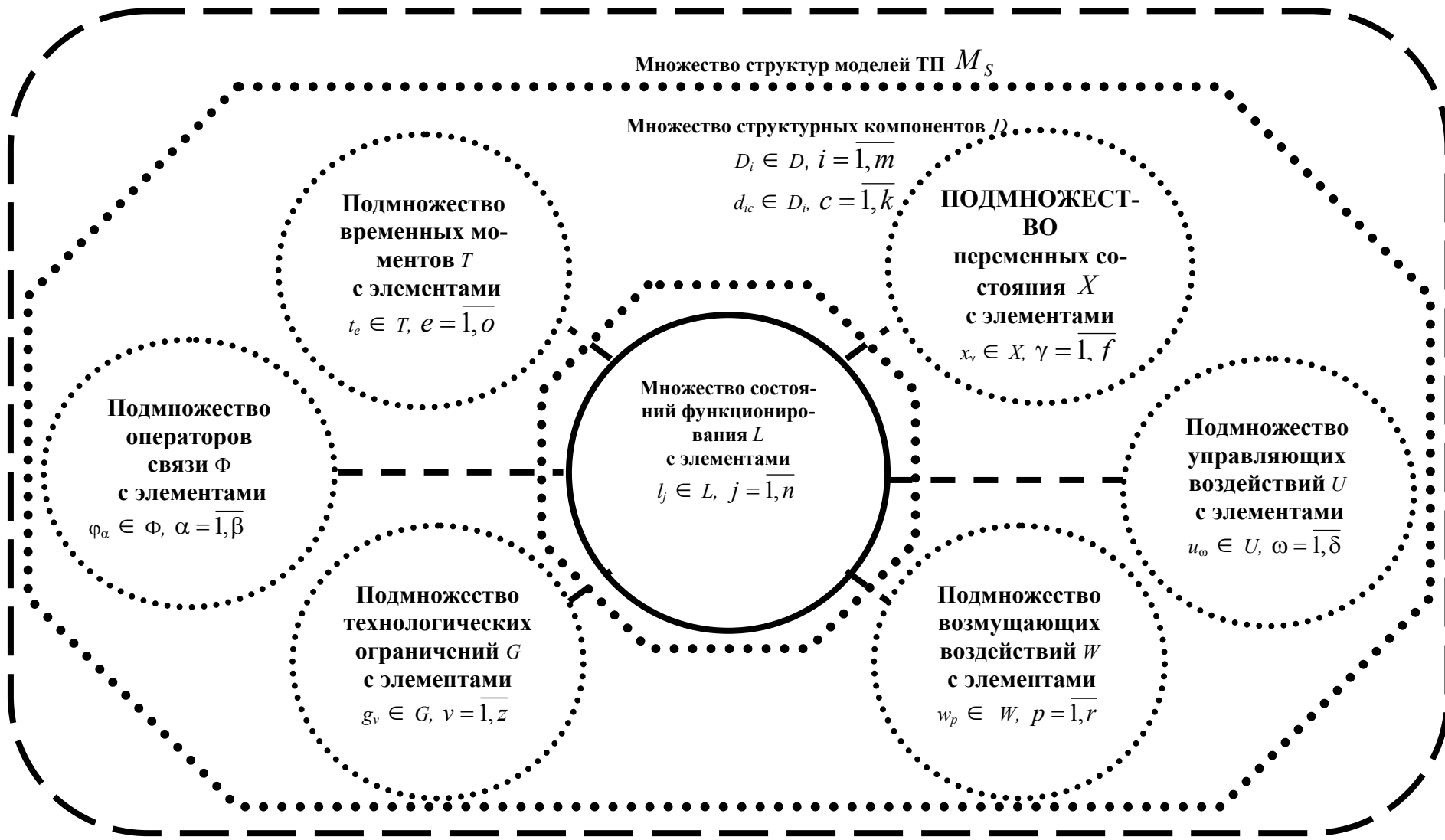
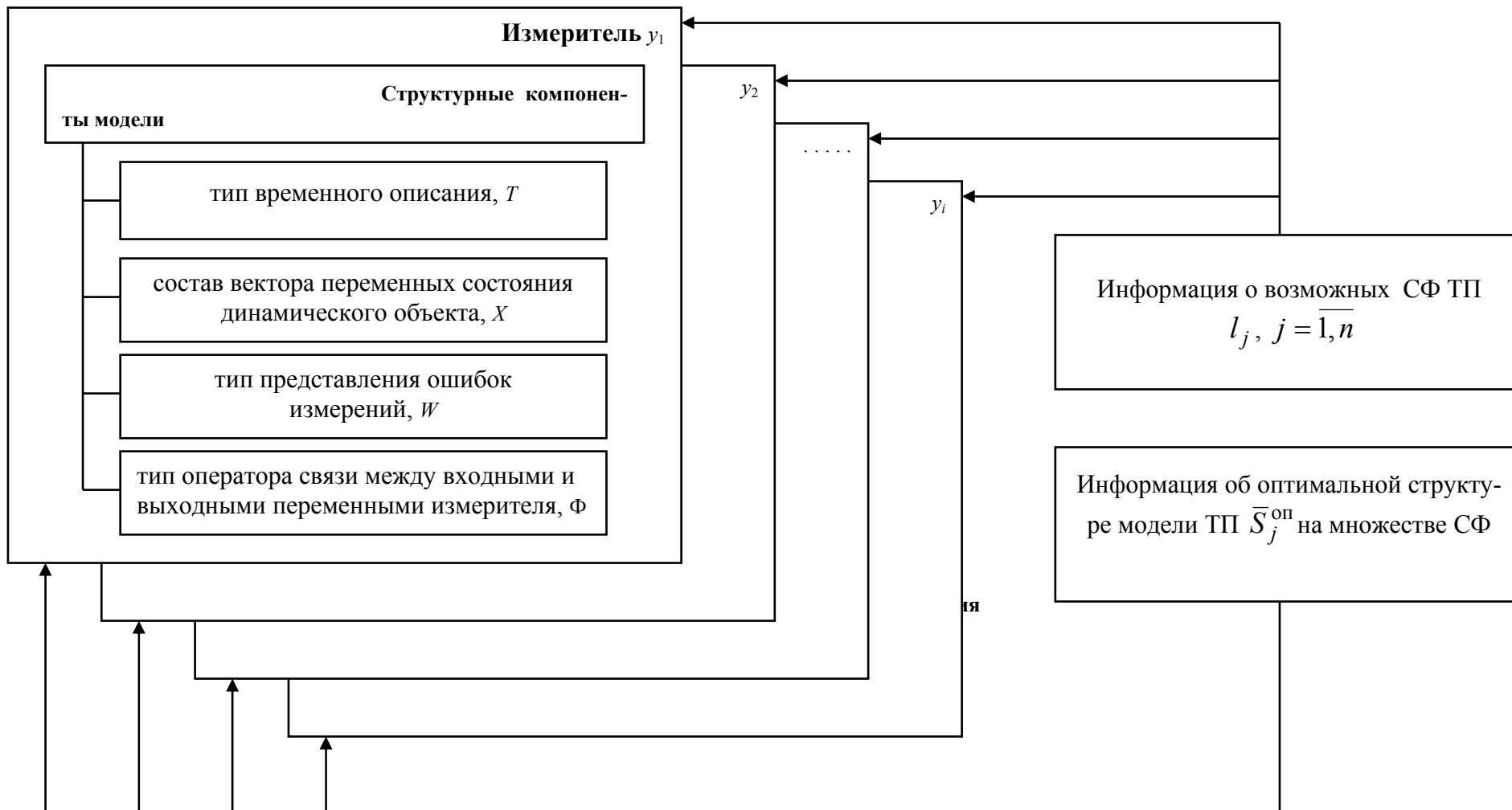
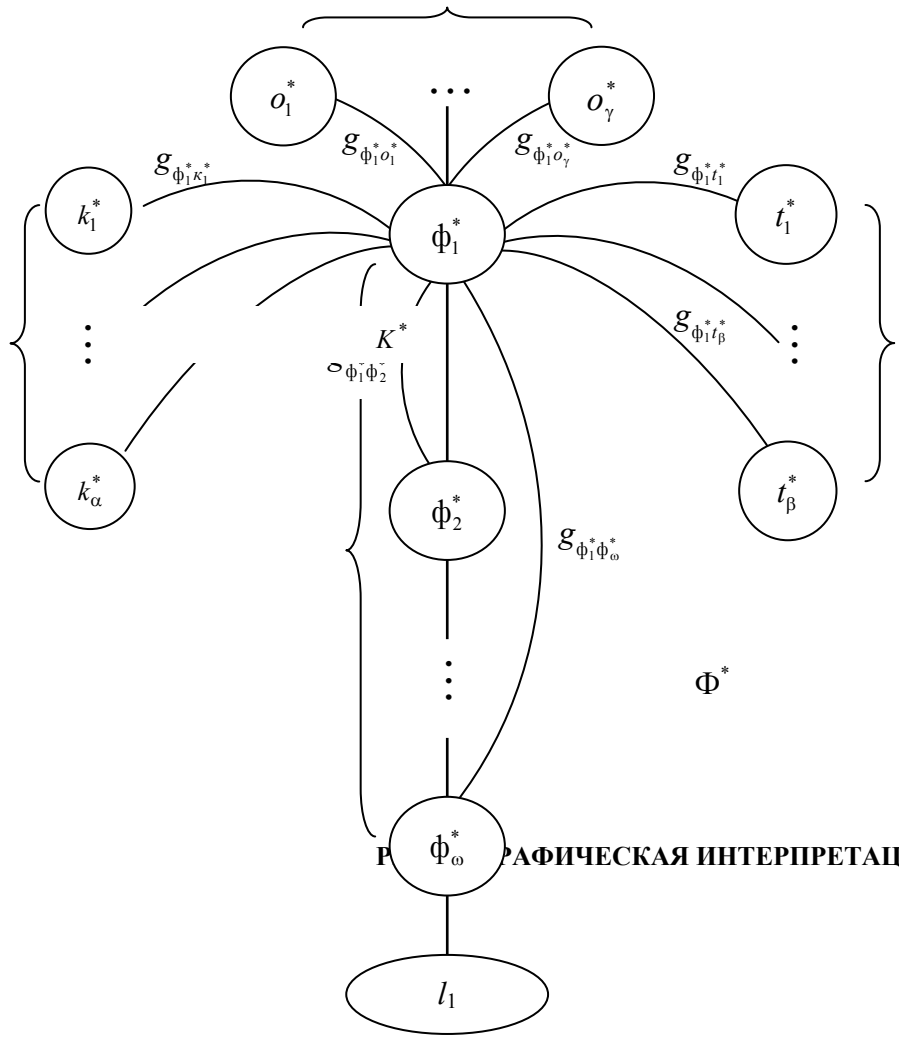


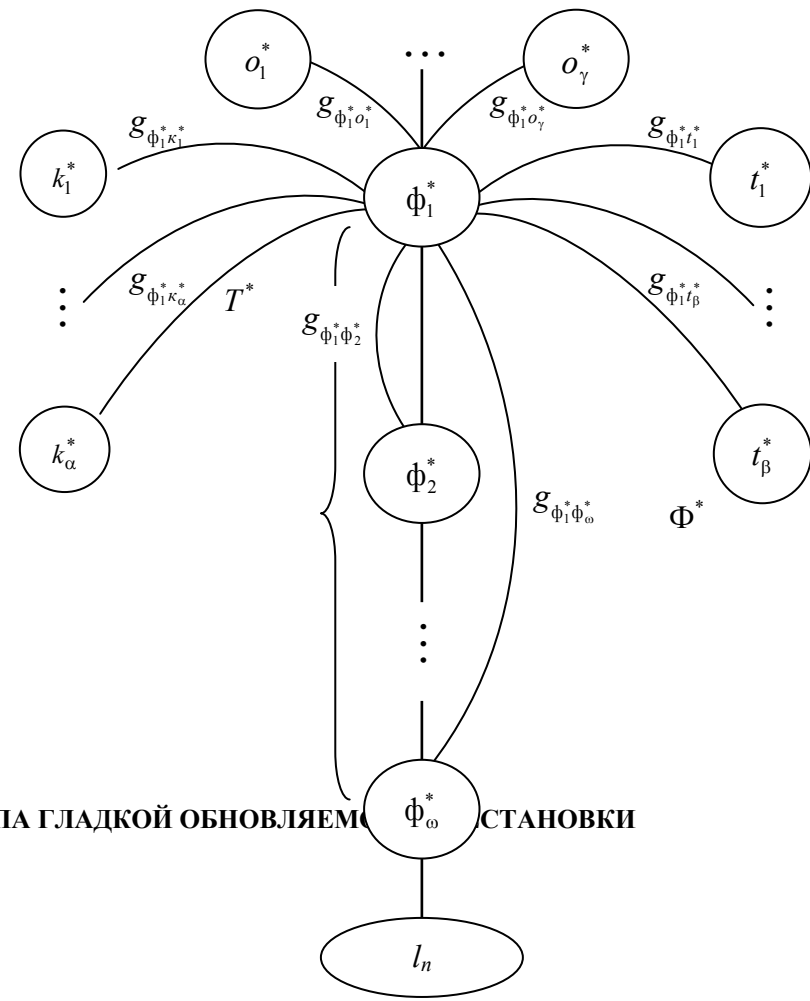
РИС. 2 ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА ФОРМИРОВАНИЯ МНОЖЕСТВА СТРУКТУР МОДЕЛЕЙ ТП



O^*

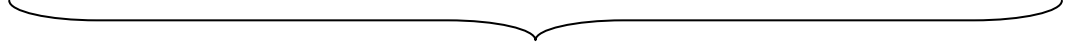


...



ГРАФИЧЕСКАЯ ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ПРИНЦИПА ГЛАДКОЙ ОБНОВЛЯЕМОСТИ

...



l_1

...

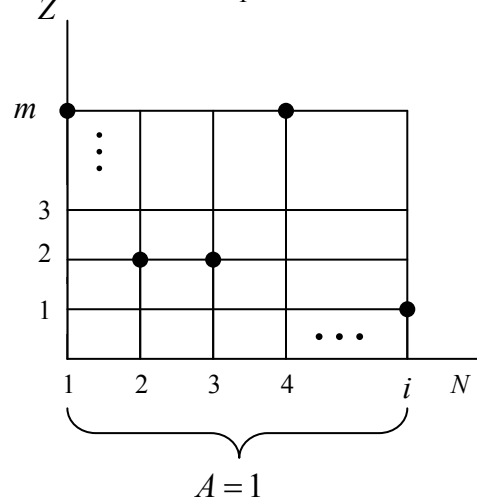
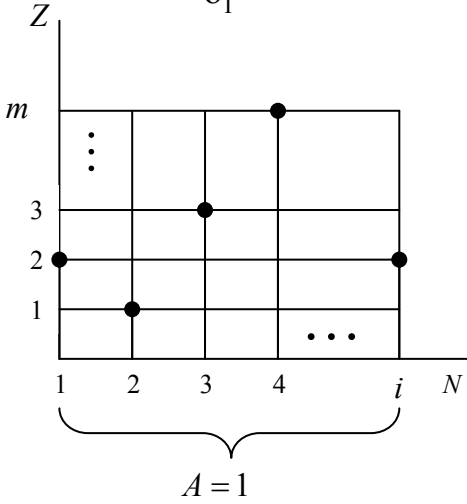
l_n

$\Delta^{(l_1)}$

$\Delta^{(l_n)}$

$\delta_1^{(l_1)}$

$\delta_1^{(l_n)}$

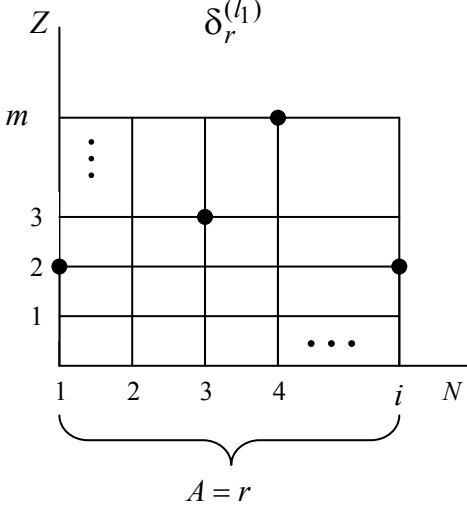


⋮

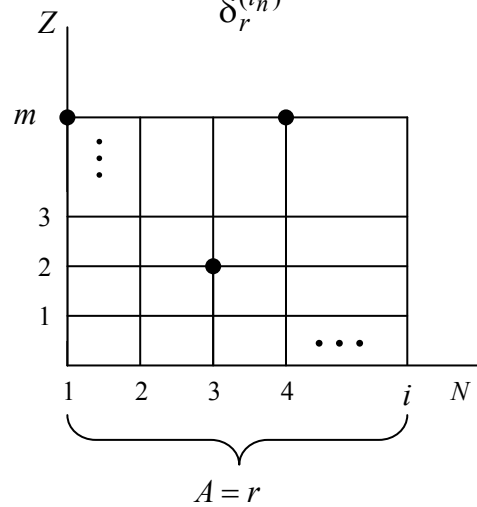
⋮

$\delta_r^{(l_1)}$

$\delta_r^{(l_n)}$



...



ДИСЦИПЛИНЫ;

$N =]$

РОВНЯ О

ПЫ ВОЗМО

ДИИ: